

Klimaänderungen und Klimafolgebetrachtungen für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich

Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

N. H. Schade, S. Hüttl-Kabus, A.-D. Ebner von Eschenbach, J. Hohenrainer, C. Jensen, P. Löwe, J. Möller, C. Rasquin, B. Tinz, B. Wachler, A. Ganske, H. Heinrich



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

Zitiervorschlag

Schade N, Hüttl-Kabus S, Ebner von Eschenbach A-D, Hohenrainer J, Jensen C, Möller J, Rasquin C, Wachler B, Ganske A und Heinrich H (2020) Klimaänderungen und Klimafolgenbetrachtung für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNSN2020.2020.09

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. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Jochen Hohenrainer

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:

Dr. Anette Ganske, Dr. Hartmut Heinrich, Dr. Sabine Hüttl-Kabus, Corinna Jensen, Peter Löwe, Jens Möller, Dr. Nils H. Schade

Bundesanstalt für Wasserbau:

Caroline Rasquin, Benno Wachler

Deutscher Wetterdienst:

Dr. Birger Tinz

Redaktionsschluss: April 2020

Titelbild: Wattflächen und Fahrwasser in der Außenweser (Quelle: Bundesanstalt für Wasserbau)

DOI: 10.5675/ExpNSN2020.2020.09

Inhalt

1	Kernbotschaften.....	1
1.1	Meteorologische Parameter (Abschnitt 5.1).....	2
1.2	Ozeanographische Parameter (Abschnitt 5.2).....	3
1.3	Hydrodynamik in der Deutschen Bucht (Abschnitt 5.3).....	3
1.4	Fokusregion Nord-Ostsee-Kanal (Abschnitt 5.4).....	4
1.5	Relevante Ergebnisse verwandter externer Projekte in Küstengebieten (Abschnitt 5.4.3).....	4
2	Einleitung.....	5
2.1	Hintergrund.....	5
2.2	Zielstellung.....	5
2.3	Generelles Vorgehen.....	6
2.4	Produkte.....	7
2.5	Struktur des Berichts.....	7
3	Schnittstellen und Kooperationen.....	8
3.1	Schnittstellen zu anderen Schwerpunkten des TF1.....	8
3.2	Themenfeldübergreifende Schnittstellen.....	9
3.3	Weitere Schnittstellen und Kooperationen im In- und Ausland.....	10
4	Übersicht der einzelnen Arbeitspakete.....	12
4.1	Meteorologische Parameter.....	12
4.2	Ozeanographische Parameter.....	14
4.3	Hydrodynamik Deutsche Bucht.....	16
4.4	Fokusregionen.....	17
4.4.1	NOK - Modellansatz zur Wassermengenbewirtschaftung (WSV Auftrag).....	18
4.4.2	NOK - Prädiktoransatz zur Bestimmung angespannter Entwässerungssituationen.....	21
4.4.3	Untersuchungen verwandter externer Projekte in Küstengebieten.....	23
5	Ergebnisse.....	24
5.1	Änderungen meteorologischer Parameter.....	24
5.1.1	Wind auf See.....	24
5.1.2	Wetterlagen und Stürme über der Nordsee.....	29
5.1.3	Tägliche Niederschlagssumme.....	33
5.2	Änderungen ozeanographischer Parameter.....	35
5.2.1	Wasserstand/Meeresspiegel.....	35
5.2.2	Seegang/Extremwellen.....	41
5.3	Analysen zur Hydrodynamik in der Deutschen Bucht.....	43
5.3.1	Einfluss der Modellauflösung.....	43
5.3.2	Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs und einer möglichen topographischen Änderung auf die Tidedynamik.....	48

5.4	Analysen in Fokusregionen.....	51
5.4.1	NOK - Modellansatz zur Wassermengenbewirtschaftung (WSV Auftrag).....	52
5.4.2	NOK - Prädiktoransatz zur Bestimmung angespannter Entwässerungssituationen.....	59
5.4.3	Untersuchungen verwandter externer Projekte in Küstengebieten.....	65
6	Fazit und Ausblick	70
6.1	Wesentlicher Erkenntnisgewinn.....	70
6.2	Offene Forschungsfragen.....	71
6.3	Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase.....	71
7	Literaturverzeichnis	74
8	Abkürzungsverzeichnis.....	81
9	Anhang.....	84

1 Kernbotschaften

In diesem Abschnitt werden die Kernaussagen dargestellt und, sofern möglich, konkrete Hinweise auf absehbare Risiken sowohl der Art, der Größe als auch des Zeitpunkts gegeben. Dafür wurden die im Rahmen des Forschungsprogrammes „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“ (KLIWAS, BMVI 2015) ausgewählten gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphäre-Modelle MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 für ausgewählte RCP-Szenarien (IPCC 2019) ausgewertet:

- Das *Klimaschutzszenario* (RCP2.6) zeichnet dabei ein optimistisches Bild, dessen Emissionspfad nur durch einen baldigen weltweiten Stopp aller Treibhausgasemissionen zu erreichen wäre.
- Das *moderate Szenario* (RCP4.5) geht von einer moderaten Entwicklung aus und ist ressourcenschonend orientiert.
- Das *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5) entspricht dabei einer Welt, in der keinerlei Maßnahmen zum Klimaschutz unternommen werden und das Wirtschaftswachstum weiterhin auf der Verbrennung fossiler Energieträger fußt.
- Für den Meeresspiegelanstieg wird zudem das *high-end-Szenario* mit der Annahme eines Meeresspiegelanstiegs von 1,74 m bis 2100 (dies entspricht dem 95. Perzentil für Hamburg aus Grinsted et al. 2015) als *worst case* für die Entwässerung des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) verwendet.

Änderungssignale werden im Folgenden entweder für den kompletten Untersuchungszeitraum der Modellsimulationen oder über Zeitscheibenanalysen bestimmt. Folgende Zeitscheiben wurden ausgewertet:

<i>Bezugszeitraum</i>	1971–2000
<i>Nabe Zukunft</i>	2031–2060 (NOK, Auftrag der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) 2021-2050 ¹)
<i>Ferne Zukunft</i>	2070–2099

Da einige der gekoppelten Modellläufe bereits im Jahr 2099 enden, weicht die Zeitscheibe der *fernen Zukunft* etwas von den Untersuchungen im Binnenland ab, wo die Jahre 2071–2100 verwendet wurden. Die Nutzung gekoppelter Modellläufe wurde aber als notwendig erachtet, um physikalische Konsistenz zwischen ozeanischen und atmosphärischen Parametern für die durchgeführten Untersuchungen gewährleisten zu können.

¹ entsprechend Klimareport Schleswig-Holstein (DWD 2017)

1.1 Meteorologische Parameter (Abschnitt 5.1)

- Die Änderungen in der Häufigkeit und Intensität extremer Windgeschwindigkeiten wurden für 7 Gebiete der Nord- und Ostsee anhand des 2 %-Quantils der Windgeschwindigkeitsverteilungen analysiert. Aufgrund der hohen natürlichen Variabilität ergaben sich nennenswerte Änderungen nur für die *ferne Zukunft* des *Weiter-nie-bisher-Szenarios*. Auf Basis von 8 Realisierungen nahmen die Häufigkeit und Intensität in 43 von 56 Fällen zu. Mehrheitlich signifikante Anstiege konnten nur für die südöstliche Nordsee und die Ostsee festgestellt werden.
- Eine punktuelle Untersuchung des 2 %-Quantils der Verteilung der Effektivwindgeschwindigkeit bei Cuxhaven ergab keine signifikanten Änderungen hinsichtlich Stärke, Andauer und Anzahl potentieller Sturmflutereignisse.
- Die Wetterlage „Nordwest“ wird in Zukunft im *Weiter-nie-bisher-Szenario* signifikant häufiger auftreten, wobei dies vor allem durch eine höhere Anzahl an Episoden und nicht über die Andauer zu erklären ist. Die Wetterlage „Südost“ nimmt hingegen sowohl in der Anzahl der Episoden, als auch in dem mittleren Andauern ab. Auch die mittlere Dauer der Wetterlage „Zyklonal“ wird abnehmen. Für die Wetterlage „Nordost“ ergibt sich ein leichter Rückgang in der Anzahl der Episoden. Für die Wetterlagen „Antizyklonal“ und „Südwest“ lassen sich keine eindeutigen Aussagen treffen.
- Im Rahmen der Wetterlagenanalyse für die Nordseeregion wurden Stürme identifiziert und nach der Stärke klassifiziert: Sturm, starker Sturm und sehr starker Sturm. Auf Basis von 8 verfügbaren *Weiter-nie-bisher* Realisierungen und den drei genannten Sturmklassen wurden für die Zeitscheibe *ferne Zukunft* in insgesamt 18 von 24 Fällen höhere relative Sturmhäufigkeiten festgestellt. Davon entfielen 5 Fälle auf die Klasse Sturm, 6 Fälle auf starke Stürme und 7 Fälle auf sehr starke Stürme. Für die Zeitreihen jährlicher relativer Häufigkeiten der Sturmklassen von 1961–2099 ergaben sich in 8 von 24 Fällen signifikant positive Trends, die auch starke Anstiege im Zeitscheibenvergleich zeigen. Weitergehende statistische Analysen sind erforderlich und geplant.
- Vorläufige Ergebnisse zur Extremwertanalyse von täglichen Niederschlagssummen im Einzugsgebiet des NOK für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* lassen vermuten, dass ein bisher 100-jähriges Ereignis in der *fernen Zukunft* deutlich häufiger eintreten könnte als im *Bezugszeitraum* (im Ensemblemittel einmal in 25 Jahren). Die Unsicherheiten sind aber hoch, da bisher nur eine Methode zur Anpassung der Extremwerte verwendet werden konnte und die Bandbreite der Modellergebnisse dabei groß ist. Aussagen für die *nabe Zukunft* sind derzeit unsicher.

1.2 Ozeanographische Parameter (Abschnitt 5.2)

- Die aktuellen globalen Meeresspiegelanstiegsszenarien projizieren eine wahrscheinliche Bandbreite des Meeresspiegelanstiegs von etwa 61-110 cm bis zum Ende des Jahrhunderts im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (IPCC 2019).
- Die Projektionen zur Entwicklung des globalen Meeresspiegels sind aber weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet, unter anderem aufgrund der bislang noch unzureichend erfassbaren Entwicklung der arktischen und antarktischen Eismassen. Dies betrifft vor allem die Abschätzung der oberen Grenze des Meeresspiegelanstiegs.
- Analysen der historischen Wasserstände bei Cuxhaven zeigen, dass sich seit der Mitte des 19. Jahrhunderts die Verteilung der Wasserstände nicht gleichmäßig ändert, sondern die hohen Wasserstände stärker angestiegen sind als die niedrigen Wasserstände. Diese ungleichmäßige Änderung konnte auch in einem Zukunftslauf eines global gekoppelten Klimamodells (MPI-OM/REMO im *Weiter-wie-bisher-Szenario*) nachgewiesen werden.
- Zu der Änderung der Häufigkeit von Extremwellen im Klimawandel kann noch keine Aussage getroffen werden. Extremwellen treten an verschiedenen Bojenstationen der südlichen Nordsee unterschiedlich häufig, besonders oft vor der Insel Norderney auf. Im untersuchten Zeitraum von 2011–2016 sind etwa 1/5 aller Extremwellen im Verbund von 3 bis 4 hohen Einzelwellen (*die 3 Schwestern*) aufgetreten. Während normale Extremwellen in der südlichen Nordsee etwa so häufig wie theoretisch vorhergesagt auftreten, sind besonders hohe Extremwellen häufiger als theoretisch erwartet.

1.3 Hydrodynamik in der Deutschen Bucht (Abschnitt 5.3)

- Die Modellauflösung in den flachen Bereichen der Küstenzone hat einen Einfluss auf die Reaktion der Tidedynamik auf einen Meeresspiegelanstieg.
- Infolge eines Meeresspiegelanstiegs verstärken sich die Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten in den Rinnensystemen des Wattenmeers. Dabei wird insbesondere die Flutstromgeschwindigkeit erhöht, sodass es zu einem vergrößerten Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeiten kommt. Infolgedessen wird der residuale Schwebstofftransport in Richtung Watt verstärkt.
- In der *fernen Zukunft* des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* werden im Wattenmeer ein Aufwachsen der Watten und eine Vertiefung der Rinnen erwartet. Die Untersuchungen zeigen, dass die Auswirkungen des Meeresspiegels durch die erwartete Topographieänderung in diesem Szenario größtenteils kompensiert werden können. Im *high-end-Szenario* wird erwartet, dass das Wattwachstum nicht in vollem Maße mit dem Meeresspiegelanstieg Schritt halten kann. Dies führt zu einem Rückgang der Wattflächen, was wiederum Folgen für den Natur- aber auch für den Küstenschutz haben kann.

1.4 Fokusregion Nord-Ostsee-Kanal (Abschnitt 5.4)

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG): Die Entwässerungskapazitäten in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau sind ausreichend groß, um unter gegenwärtigen Bedingungen den Wasserstand des NOK weitgehend unterhalb der kritischen Marke von 5,40 m Pegelnullpunkt (Einstellung der Schifffahrt) zu halten. In der Vergangenheit traten temporär Überschreitungen der kritischen Wasserstandsmarke auf. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 170 cm würde sie im Mittel an 85 % der Tage eines Jahres überschritten (300 Tage). Mehrere Anpassungsoptionen wären denkbar, u. a. auch die Installation eines Pumpwerks. Eine Pumpenleistung von 25 m³/s würde die Häufigkeit der Überschreitung um 2/3 reduzieren (von 300 Tage auf 100 Tage). Mit einer Pumpenleistung von 100 m³/s könnten fast wieder gegenwärtige Verhältnisse erreicht werden.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH): Unter den gewählten Szenarienannahmen ist von einer deutlichen Zunahme von bisher bereits auftretenden Grenzzuständen der Bewirtschaftung des NOK auszugehen. Schon ein Meeresspiegelanstieg von 55 cm bis 2100 führt für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* zu einem Rückgang der potentiellen Entwässerungsleistung um über 40 %. Im Falle des *high-end-Szenarios* könnte der Kanal zum Ende des Jahrhunderts fast nicht mehr im freien Gefälle entwässert werden. Zudem ist mit häufigeren Wetterlagen aus Nordwest zu rechnen, die angespannte Entwässerungssituationen zur Folge haben könnten, da sie mit erhöhten Pegelständen wie auch erhöhten Niederschlägen korrelieren.

1.5 Relevante Ergebnisse verwandter externer Projekte in Küstengebieten (Abschnitt 5.4.3)

- KLEVER – „Klimaoptimiertes Entwässerungsmanagement im Verbandsgebiet Emden“ (Spiekermann et al. 2018): Im Verbandsgebiet Emden werden sich die potentiellen Sielzeiten bei einem Meeresspiegelanstieg von 50-110 cm zum Ende des Jahrhunderts bis 2040/2060 halbieren und bis 2060/2080 kaum noch Kapazitäten bestehen. Maximal möglicher Schutz lässt sich nur durch Kombination von Anpassungsmaßnahmen und -typen erreichen.
- AG Niederungen 2050 (2014) – In den Niederungsgebieten [Schleswig-Holsteins] werden die Möglichkeiten zur Entwässerung über Siel gegenüber Schöpfwerken bis 2070 deutlich abnehmen. Handlungsoptionen bestehen in der Optimierung des Siel- und Schöpfwerksbetriebs, dem Aus- und Neubau von Schöpfwerken, aber auch der Einrichtung von Retentionsraum im betreffenden Einzugsgebiet, um u. a. auch die Verkehrsinfrastruktur zu erhalten.
- EXTREMENESS – „Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen“ (Schaper et al. submitted): Die Simulation möglicher Auswirkungen von extremen Sturmfluten und die Diskussion von Handlungsoptionen zeigten, dass der Küstenschutz in Ostfriesland gegenwärtig gut aufgestellt ist, aber Bedarf an weiteren Untersuchungen zum Auftreten und möglichen Auswirkungen kaskadierender Effekte besteht. EXTREMENESS hat damit wesentliche Beiträge zur Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes geliefert, die unter anderem auch Eingang in die aktuelle Katastrophenschutzübung der Stadt Emden fanden.

2 Einleitung

Das Leben in der Küstenzone – die Wirtschaft und insbesondere die Verkehrsinfrastruktur des Bundes – wird sich an verändernde klimatische Bedingungen des 21. Jahrhunderts anpassen müssen, wenn die durch anthropogenes Wirken beeinflussten Veränderungen weiter zunehmen. Die wetter- und klimabedingten Risiken für die Bewohnbarkeit sowie für die wirtschaftliche und verkehrliche Nutzbarkeit dieses Raumes werden voraussichtlich steigen.

2.1 Hintergrund

Das südwestliche Schleswig-Holstein, weitere Teile der deutschen Küsten auf Meeresspiegelniveau, sowie die Seewege werden extremem Wetter und dem Klimawandel in besonderem Maße ausgesetzt sein. Seegang, Stürme und Sturmfluten in Verbindung mit einem steigenden Meeresspiegel werden die Stabilität und Nutzung der Küsten gefährden. Höhere Niederschläge können im Binnenland vermehrt zu Überschwemmungen führen, wenn bei einem erhöhten seeseitigen Wasserstand die Entwässerung der Fließgewässer, des NOK und anderer Kanäle nur eingeschränkt möglich ist.

Sowohl Wasserstraßen, Bahnverbindungen als auch Bundesstraßen und Autobahnen können dadurch beeinträchtigt, bzw. beschädigt werden, wie z. B. das *Weihnachtshochwasser* 2014 im südöstlichen Schleswig-Holstein eindrucksvoll aufgezeigt hat (LKN-SH und LLUR-SH 2016, Schade 2017). Neben dem Straßenverkehr war die Seeschifffahrt im NOK massiv behindert. Der Meeresspiegelanstieg wird diese Probleme verschärfen. Jenseits der Küstenlinie wird die Bahnverbindung nach Sylt durch Meeresspiegelanstieg und Sturmflutrisiko betroffen sein, ebenso die zu erneuernde Fehmarnsundquerung durch möglicherweise veränderte Windverhältnisse. Auf See können extremere Seegangsverhältnisse den Seeverkehr und Offshoreanlagen gefährden. Die Seeschifffahrt an den Küsten hängt stark von der morphologischen Entwicklung im Küstenvorfeld und in den Hafenzufahrten ab. Ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg als Folge des Klimawandels (z. B. IPCC 2019) kann zu morphologischen Veränderungen führen. Insbesondere der Hamburger Hafen, Knotenpunkt für Transport und Logistik, kann durch eine veränderte Hydro- und Morphodynamik nachteilig betroffen werden. Die große Diversität der Risiken stellt anspruchsvolle und komplexe Anforderungen an die Planungen von Küstenschutz- und Infrastrukturmaßnahmen.

2.2 Zielstellung

Ziel der Arbeiten im Schwerpunkt *Fokusgebiete Küsten* war es zu prüfen, inwieweit der Betrieb der küstennahen Verkehrsinfrastruktur unter veränderten klimatischen und hydrologischen Rahmenbedingungen langfristig und nachhaltig gesichert werden kann, welche Defizite und neuen Gefährdungen es gibt, welche Gegenmaßnahmen ggf. ergriffen werden und wie deren Auswahl durch geeignete Informationen (Indikatoren, Kennwerte, etc.) unterstützt werden kann. Betrachtet wurden dabei sowohl die zukünftigen see- als auch die landseitigen raumzeitlichen Entwicklungen.

Es wurden Datenprodukte und Informationen zu Veränderungen des Auftretens dieser Gefährdungen zur Verfügung gestellt und ggf. Vorschläge für Anpassungsoptionen erarbeitet. Neben meteorologischen Größen wie Niederschlag, Luftdruck und Wind wurden auch deren Auswirkungen auf ozeanographische und hydrologische Größen wie z. B. Seegang, Abfluss, Wasserstand sowie der küstennahen Morphodynamik untersucht. Die Wirkung von ausgewählten Anpassungsoptionen wurde an Beispielen simuliert und bewertet. Weitere Anwendungen dieser Informationen sind in der Raumordnung möglich. Eine Fokusregion der Arbeiten war der NOK. Im Rahmen der Projektarbeiten wurden verfeinerte Szenarien der seeseitigen und binnenseitigen Randbedingungen des Kanalmanagements erarbeitet und modellhaft angewendet. So konnten beispielsweise Veränderungen in der Länge des Entwässerungszeitfensters infolge hoher Wasserstände und deren mögliche Konsequenzen für die Wasserbewirtschaftung festgestellt werden.

2.3 Generelles Vorgehen

Bei den Arbeiten im Schwerpunkt *Fokusgebiete Küsten* wurde inhaltlich auf den in KLIWAS erprobten und etablierten Methoden und den bereits vorhandenen Kooperationen aufgebaut. In einzelnen Fokusgebieten wurde zusätzlich auf weitere Modellinstrumente zurückgegriffen. Dies gilt beispielsweise für den NOK. Hier wurde auf Vorarbeiten aus dem Projekt „Wassermengenbewirtschaftung des NOK unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen“ aufgebaut. Es wurde von der BfG im Auftrag der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS ASt Nord) und mit Beratung durch das BSH bis 2018 durchgeführt hat. Dabei wurde ein Wasserhaushalts- und Kanalbilanzmodell aufgebaut, mit dem erste Szenarien berechnet wurden.

Zur Anpassung des NOKs an extreme Wettersituationen und den Klimawandel haben die BfG, das Seewetteramt des Deutschen Wetterdienstes (DWD-HH) und das BSH die Randbedingungen für die Szenarien eines Modellsystems erarbeitet, mit dem die mögliche zukünftige Steuerung des NOK auf Basis aktueller Klimaszenarien simuliert und analysiert werden kann. Mithilfe der Szenarienrechnungen wurden Grenzzustände der Wasserbewirtschaftung und die Häufigkeit ihres Auftretens (bis zum Jahr 2100) simuliert. Damit soll die zukünftige Sicherheit der Anlagen, sowie ein möglichst reibungsloser Ablauf des Schiffsverkehrs und des Betriebs der Wasserstraße gewährleistet werden.

Weil Erdsystemmodelle extreme Zustände auf der angewendeten regionalen Skala noch nicht zuverlässig abbilden können, wurde hier konsistent für Niederschläge, Sturmereignisse, Wasserstände und die Auswirkungen zukünftiger Wetterlagen auf Extremwellen, ein anderes Vorgehen gewählt. Zunächst wurden extreme Zustände in der Vergangenheit ermittelt. Anschließend wurden die auslösenden meteorologischen, ozeanographischen und hydrologischen Rahmenbedingungen bestimmt und anhand einer begrenzten Anzahl von statistischen Kennwerten beschrieben. Dabei wurden vor allem solche Größen und Kennwerte herangezogen, die vergleichsweise gut mit Klima- oder Ozeanmodellen abgebildet werden können. Im Folgenden wurde ermittelt, inwieweit die Kennwerte als Vorhersagegrößen (Prädiktoren) der jeweiligen Extremsituationen im 20. Jahrhundert verwendet werden können. Sofern Vertrauen in einen Prädiktor (oder ein Prädiktorensatz) besteht, wird dieser auf projizierte Klima- oder Ozeanmodelldaten für das 21. Jahrhundert angewendet, um so Aussagen zu zukünftigen Veränderungen zu erhalten. Diese Untersuchungen sollen in Phase II auf andere Küstengebiete, wie z. B. die Eider und ihr Einzugsgebiet, ausgeweitet werden. Langfristiges Ziel ist es, auch für diejenigen Küstengebiete Aussagen treffen zu können, in denen kein komplexes regionales Modellsystem zur Verfügung steht.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt war die Untersuchung möglicher Veränderungen der hydrodynamischen Bedingungen in der Deutschen Bucht aufgrund des Klimawandels seitens der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Dafür wurde ein hydrodynamisch-numerisches Modell der Deutschen Bucht und der Ästuarare verwendet. Hierbei werden Simulationen mit und ohne klimabedingte Änderungen der Randwerte, wie beispielsweise Wasserstand in der Nordsee, Wind oder Abfluss, durchgeführt. Es wurden sowohl Extremwetterlagen als auch veränderte mittlere bzw. häufige Verhältnisse berücksichtigt. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse können Betroffenheiten identifiziert und Vorschläge für Anpassungsoptionen entwickelt werden. Als Anpassungsoptionen sind sowohl wasserbauliche Maßnahmen als auch Empfehlungen für das Sedimentmanagement denkbar. Zudem können die Ergebnisse für den Küstenschutz und für Entwässerungskonzepte genutzt werden. BSH und DWD-HH lieferten die meteorologischen und ozeanographischen Randbedingungen für Nord- und Ostsee. Die BAW untersuchte die Auswirkungen von veränderten maritimen Randbedingungen auf die dynamischen Zustände des Elbeästuars und im Küstenvorfeld.

2.4 Produkte

Die erstellten Produkte basieren auf umfassenden Auswertungen von Beobachtungs-, Reanalysen- und Klimamodelldaten für die Parameter Luftdruck, Wind, Niederschlag, Seegang, Strömungen und Meeresspiegel in Nord- und Ostsee, sowie auf Analysen von hydromorphodynamischen Modelldaten für die Deutsche Bucht. Die meisten Produkte dieser Studie werden für die Unterstützung von Anpassungsarbeiten im gesamten Küstenraum hilfreich sein. Untersucht wurden dabei Ereignisse in der Vergangenheit, in Klimaprojektionen und anhand von Fallbeispielen. Im Einzelnen sind folgende Produkte im Rahmen der Arbeiten entstanden:

- eine Datenbank mit atmosphärischen und ozeanischen Klimatologien der Ostsee als Referenz zur Analyse von Klimamodellen (Erweiterung der KLIWAS Klimatologie der Nordsee)
- meteorologische und ozeanographische Randbedingungen für angespannte Situationen der Binnenentwässerung, insbesondere:
 - Wetterlagen über der Nordsee
 - Häufigkeiten dieser Wetterlagen
 - Bestimmung des Entwässerungspotentials des NOKs
- Veränderungen des Entwässerungspotentials des NOKs
- Veränderungen in den extremen Niederschlägen
- Veränderungen in extremen Windereignissen
- Veränderungen extremer Wellenhöhen in der Nordsee
- Veränderungen der extremen Pegelstände (Sturmfluten, Sturmebben) an den deutschen Küsten
- Sensitivitätsstudien zu möglichen zukünftigen Änderungen in der Hydrodynamik der Deutschen Bucht

Die Ergebnisse der Winduntersuchungen wurden zudem im Schwerpunkt *Sturmgefahren* (Bott et al. 2020) verwendet. Ergebnisse der Analysen an der Küste sind Teil der Untersuchungen im Schwerpunkt *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020) bzw. im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) und liefern Erkenntnisse, die auch für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, die behördenübergreifende Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021 (KWVA 2021) und den Aktionsplan Anpassung (APA III) verwendet werden.

2.5 Struktur des Berichts

Der vorliegende Bericht teilt sich im Folgenden in vier Kapitel: In Kapitel 3 werden die Schnittstellen und Kooperationen des Schwerpunkts aufgeführt. Neben den eigentlichen Ergebnissen der Forschungsarbeit ist die Vernetzung sowohl innerhalb als auch außerhalb des Geschäftsfelds des BMVI der zentrale Bestandteil des Expertennetzwerks. Kapitel 4 gibt eine Übersicht der einzelnen Arbeitspakete. Jedes Unterkapitel/Arbeitspaket enthält dabei einen vorangestellten Steckbrief mit Kurzzinformationen. Den Hauptteil des Berichts macht das Kapitel 5 aus. Hier werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete präsentiert. Vorangestellt ist jeweils eine Box mit den wesentlichen Erkenntnissen/Kernbotschaften, die im betreffenden Arbeitspaket erzielt worden sind. Diese finden sich auch im Kapitel 1 zusammengefasst wieder. Kapitel 6 gibt schließlich ein kurzes Fazit über den wesentlichen Erkenntnisgewinn, offene Forschungsfragen und Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase.

3 Schnittstellen und Kooperationen

In diesem Kapitel werden die Schnittstellen zu den übrigen Schwerpunkten im Themenfeld (Kapitel 3.1), sowie themenfeldübergreifende (Kapitel 3.2) wie auch nationale und internationale Kooperationen und Vernetzungen (Kapitel 3.3) aufgezeigt. Die Vernetzung war und ist eine der wichtigsten Aufgaben des BMVI Expertennetzwerks, damit die hier entwickelten Methoden und Datenprodukte durch verschiedene Akteure im und außerhalb des Geschäftsfelds des BMVI genutzt werden können. Auch im Ausland werden Impulse des Expertennetzwerks bereits als Beispiel guter Praxis aufgenommen (Kapitel 3.3).

3.1 Schnittstellen zu anderen Schwerpunkten des TF1

Abbildung 3-1 zeigt eine schematische Darstellung der Verknüpfung des SP-108 *Fokusgebiete Küsten* innerhalb des Themenfeldes 1:

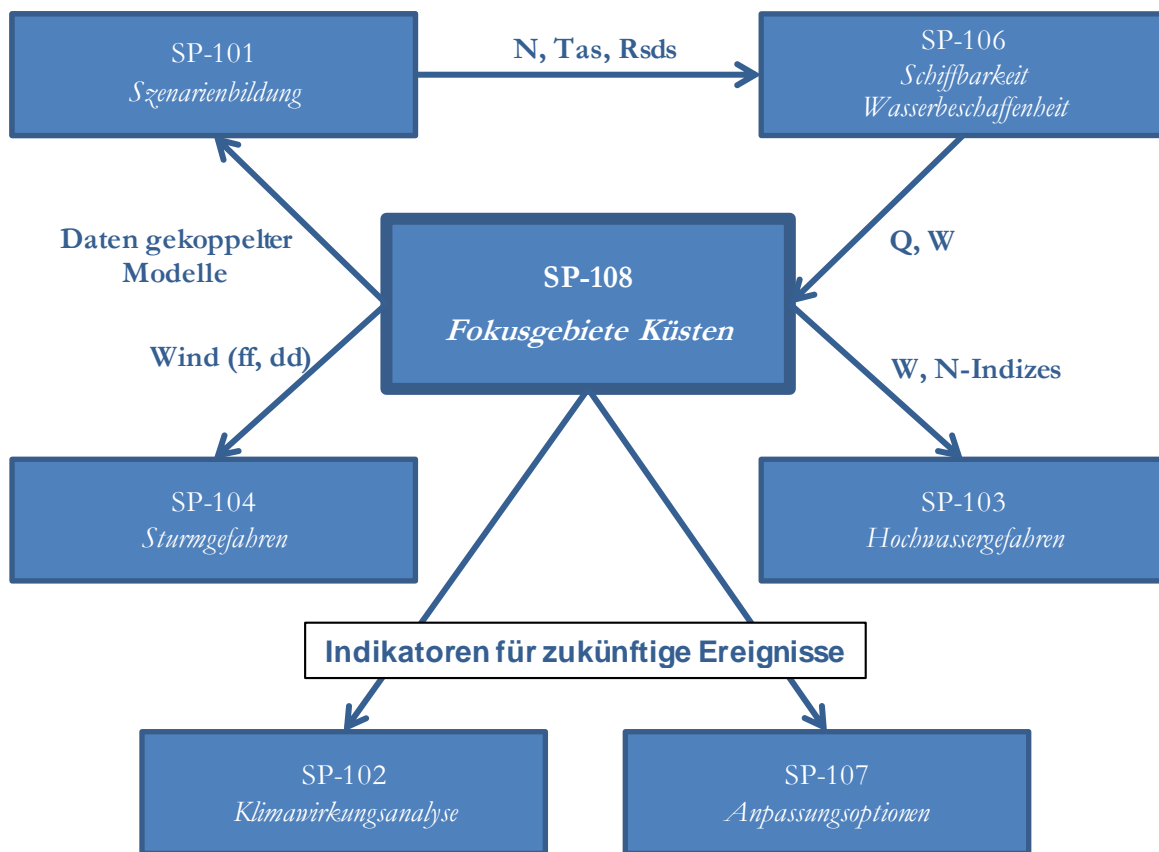


Abbildung 3-1: Verknüpfungsschema der Schwerpunkte im Themenfeld aus Sicht des *Fokusgebietes Küsten* mit einer Auswahl der übergebenen und gelieferten Parameter (N = Niederschlag, Tas = Lufttemperatur in 2 m, Rsds = Globalstrahlung, Q = Abfluss, W = Wasserstand, ff = Windgeschwindigkeit in 10 m, dd = Windrichtung in 10 m). Zu den Schwerpunkten *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) und *Fokusgebiete Binnen* (Hänsel et al. 2020c) bestand keine direkte Verbindung.

Der Schwerpunkt *Fokusgebiete Küsten* benötigte Eingangsdaten aus dem Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) für die Untersuchungen in der Fokusregion NOK und der Hydro- und Morphodynamik. Er lieferte seinerseits (Ergebnis-)Daten an die Schwerpunkte *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020), *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020) und *Sturmgefahren* (Bott et al. 2020).

Ferner wurden Informationen an die Schwerpunkte *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) sowie *Anpassungsoptionen* (Norpoth et al. 2020) geliefert, die die finalen Produkte aus allen Schwerpunkten des Themenfelds bündeln.

3.2 Themenfeldübergreifende Schnittstellen

Themenfeldübergreifend bestehen Verbindungen zum Themenfeld 6 *Verkehrswirtschaftliche Analysen*. Am Beispiel des schweren Seeunfalls des Containerzubringers *Akacia* wurden Einflüsse von Einschränkungen der Verkehrswege auf den Güterverkehr mit Hilfe von Schiffsbewegungsdaten (Automatic Identification System, AIS) am Beispiel des NOK nachvollzogen (Cox et al. 2019). Die *Akacia* hatte am 19.02.2018 das Schleusentor der Neuen Südschleuse in Kiel-Holtenau gerammt und durchbrochen.

Die Auswirkungen dieses Unfalls und der nachfolgenden Sperrung der Schleusenammer für Reparaturen bis zum 06.04.2018 waren selbst Wochen nach der Wiederinbetriebnahme noch deutlich wahrnehmbar: Untersuchungen der von der GDWS zur Verfügung gestellten Daten im Zeitraum vom 01.01 – 31.05.2018 belegen, dass die Schiffspassagen im NOK für Monate deutlich zurückgingen (Abbildung 3.2). Dies kann auf die Sperrung der Schleusenammer und die damit einhergehenden Wartezeiten an der Schleuse Kiel-Holtenau zurückgeführt werden.

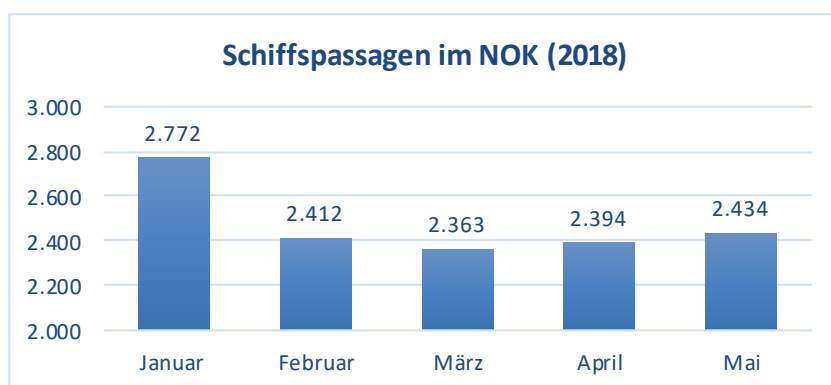


Abbildung 3-2: Übersicht über die Schiffspassagen in den ersten fünf Monaten des Jahres 2018. Die Verlagerungseffekte sind auch nach mehreren Wochen gut sichtbar (Quelle: Cox et al. 2019, Abbildung 37).

Die Auswertung der AIS-Daten im Zeitraum vom 11.02. – 08.03.2018 zeigen, dass sich mehrere Schiffe für einen Umweg über Skagen entschieden haben (Abbildung 3-3), obwohl diese Route mit nachweislich erheblichen Mehrkosten verbunden ist. Seeschiffe, die aufgrund ihrer Größe für die Kanalpassage nicht in Frage kamen oder Zwischenstopps auf der Skagenroute aufwiesen, wurden in dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

Auswirkungen von Verkehrsverlagerungen auf die deutschen Häfen konnten im Rahmen dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Häufung von Störungen und damit einhergehenden langen Wartezeiten am NOK zu längerfristigen Verlagerungen der Warentransporte in konkurrierenden Häfen führen können. Auf Basis der erzielten Ergebnisse sollen in Phase II ausführlichere und tiefgreifendere Untersuchungen durchgeführt werden, die unter anderem mögliche Verkehrseinschränkungen durch veränderte klimatische Randbedingungen (z. B. Meeresspiegelanstieg, Großwetterlage) beinhalten.

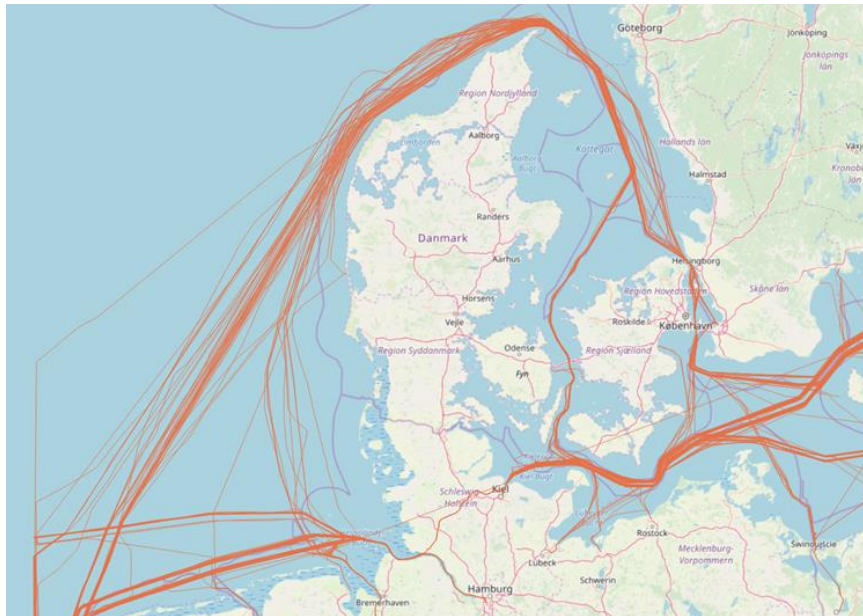


Abbildung 3-3: Schiffsbewegungsdaten von ausgewählten Seeschiffen mit NOK-Durchfahrt oder Skagen-Umweg (Quelle: Cox et al. 2019, Abbildung 39 links).

3.3 Weitere Schnittstellen und Kooperationen im In- und Ausland

National bestehen Verbindungen zu den deutschen Küstenländern über die jeweiligen Landesämter in Schleswig-Holstein (LKN-SH, LLUR-SH), Niedersachsen (NLWKN) und Mecklenburg-Vorpommern (STALU MM), sowie diversen Projekten mit Fokus auf die deutsche Küstenzone, u. a.:

- FREAK WAVES – „Studie zum Auftreten von Extremwellen in der Nordsee im Klimawandel“ (Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) und BSH), gefördert durch Forungs- und Entwicklungsmittel des BSH
- ALADYN² – „Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee“ (Forschungsinstitut für Wasser und Umwelt der Universität Siegen (FWU)), gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)-Rahmenprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA)“
- COMTESS³ – „Nachhaltige Landnutzung in Küstenräumen“ (Universität Oldenburg), gefördert durch das BMBF-Rahmenprogramm FONA
- EXTREMENESS⁴ – „Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen“ (HZG, DWD, BAW, FWU Siegen und Universität Hamburg), gefördert durch das BMBF-Rahmenprogramm FONA 3, Verbundprojekt im Förderschwerpunkt „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)“
- KLEVER⁵ – „Klimaoptimiertes Entwässerungsmanagement im Verbandsgebiet Emden“ (Jade Hochschule Oldenburg, Universität Oldenburg), gefördert durch das BMUB-Programm zur „Förderung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (DAS)“
- SALTSA⁶ – „Grundwasserversalzung durch Meeresspiegelanstieg als gesellschaftliche Herausforderung“ (Universität Oldenburg), gefördert durch das Programm „SPP 1889 Regional Sea Level Change and Society“ der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG)

² <https://www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/forschung/projekte/aladyn/?lang=de>

³ <https://uol.de/comtess>

⁴ <https://www.hzg.de/ms/extremeness/index.php.de>

⁵ <https://uol.de/klever>

⁶ <https://www.spp-sealevel.de/index.php?id=3795>

- StucK7 – „Sicherstellung der Entwässerung küstennaher, urbaner Räume unter Berücksichtigung des Klimawandels“ (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg), gefördert durch das BMBF-Rahmenprogramm FONA

Dabei wurden erzielte Ergebnisse, Methoden und Ideen im Rahmen des jährlich stattfindenden Küstenworkshops am BSH, über Vorträge bei Veranstaltungen mit Bezug zum Thema Küsten- und Binnenentwässerung, sowie über Teilnahmen an projektbezogenen Arbeitstreffen und bilateralen Gesprächen präsentiert und ausgetauscht. Die so entstandene Vernetzung soll in Phase II fortgeführt und weiter intensiviert werden. Ferner wurde im Rahmen eines Dialogs mit der WSV ein Handbuch „Climate Proofing“ erstellt, welches den Mitarbeiter/innen der WSV einen für ihre Arbeitspraxis tauglichen Rahmen zur Integration von Klimawandelüberlegungen in das konkrete Verwaltungshandeln ermöglicht. Begleitend wird derzeit an einem Schulungsprogramm gearbeitet.

Bereits bestehende Kooperationen aus KLIWAS wurden fortgeführt: Zusammen mit dem Integrated Climate Data Center (ICDC) der Universität Hamburg wurde die KLIWAS Nordseeklimatologie auf die Ostsee ausgeweitet. Für die Untersuchungen von Klimaänderungssignalen wurden die gekoppelten Modelle des Max-Planck-Instituts (MPI) in Hamburg (MPI-OM/REMO, Mathis et al. 2018) und des Schwedischen Wetterdienstes SMHI (RCA4/NEMO, Dieterich et al. 2013) genutzt.

Schließlich wurden direkte Verbindungen zum Klimawandel-Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWaS) des BMVI, der DAS und der Interministeriellen Arbeitsgruppe zur Anpassung an den Klimawandel (IMA-A), sowie der Expertengruppe zu Klimafolgen und Klimaanpassung für Verkehrsnetze und -knoten⁸ der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) etabliert. Neben der „Fallstudie NOK“ (Kapitel 5.4.1 & 5.4.2) wurde auch das „Stresstestszenario Mittelrhein“ (Hänsel et al. 2020c) als wichtige Anregung für andere Nationen in ein gemeinsames Abschlussdokument aufgenommen. Beide Fallstudien sind international auf großes Interesse gestoßen. Über den in englischer, französischer und russischer Sprache erscheinenden Endbericht der UNECE-Expertengruppe sind diese Ergebnisse weltweit für eine breite Öffentlichkeit verfügbar.

⁷ <https://www.stuck-hh.de/index.php?id=40>

⁸ Für Informationen zur UNECE Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes siehe <https://www.unece.org/trans/areas-of-work/trends-and-economics/activities/group-of-experts-on-climate-change-impacts-and-adaptation-for-transport-networks-and-nodes-wp5ge3.html>

4 Übersicht der einzelnen Arbeitspakete

Die nachfolgend beschriebenen Arbeitspakete sind thematisch und institutionell definierte Bündel, zwischen denen Zusammenarbeit und Datenfluss innerhalb des Schwerpunkts organisiert wurden. Eine kurze Zusammenfassung der einzelnen Arbeitspakete wird vorangestellt in jedem Unterkapitel in Form von Steckbriefen gegeben. Die Angaben umfassen Titel, Mitarbeitenden, Ansprechpersonen, Gesamtlaufzeiten, Inhalte und Werkzeuge. Die Inhalte umfassen schlagwortartig neben den reinen Datenprodukten auch die wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsaspekte bzw. wissenschaftliche Fragestellungen. Es werden ferner In- und Outputs benannt, die innerhalb des Schwerpunkts bzw. mit anderen Nutzenden ausgetauscht wurden.

4.1 Meteorologische Parameter

Titel	Meteorologische Parameter (BSH/DWD-HH)
<u>Ansprechpersonen</u> , Mitarbeitende	<u>N.H. Schade (BSH)</u> , C. Jensen (BSH), A. Ganske (chem. BSH), L. Gates (DWD-HH), B. Tinz (DWD-HH)
Laufzeit	2016–2019
Inhalt:	Bereitstellung von Klimamodelldaten über See als Randdaten für Ozean- und Ästuarmodelle. Vergleich dieser meteorologischen Felder mit Reanalyse- und/oder Messdaten. Untersuchung der möglichen zeitlichen Entwicklung einzelner Größen.
Dateninput (von)	Luftdruck auf Meeresniveau, Windgeschwindigkeit und -richtung in 10 m, Tagessumme Niederschlag und abgeleitete Indizes aus Reanalysedaten, Messungen, Ost- und Nordseeklimatologie (BNSC), Klimamodellergebnisse (gekoppelt) von BSH/DWD-HH
Zuarbeiten und Ergebnisse (an)	Aufbereitete Felder Windgeschwindigkeit und -richtung (NetCDF) als Randdaten an BfG, BAW (Ganske 2017), charakteristische Wetterlagen NOK, Vorfeuchte bei angespannten Entwässerungssituationen NOK, Zusammenspiel Niederschlag und Außenwasserstand
primäre Werkzeuge	Statistische Programme
Untersuchungsgebiet(e)	Nordsee, Ostsee und Deutsche Küsten.
Vorläuferberichte, Auswertungsbeispiele, etc.	Bollmeyer et al. (2015): Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141, 1-15. https://doi.org/10.1002/qj.2486 Dieterich et al. (2013): Evaluation of the SMHI coupled atmosphere-ice-ocean model RCA4_NEMO, SMHI. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.28917!/RO_47.pdf Mathis et al. (2018): Which complexity of regional climate system models is essential for downscaling anthropogenic climate change in the Northwest European Shelf? Climate Dynamics, 50, 2637-2659. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3761-3

Im Küstenschwerpunkt wurden der Luftdruck auf Meeresniveau und der Wind in 10 m Höhe über der Nord- und Ostsee untersucht, da sie für die Auswertungen zum NOK, zu den *Sturmuntersuchungen* auf See und an der Küste und den Analysen zu Überflutungen und Wetterlagen im Küstenbereich (Schwerpunkte *Hochwassergefahren* und *Fokusgebiete Küste*) benötigt wurden. Untersuchungen zum Niederschlag beschränken sich hier auf das Einzugsgebiet des NOK. Alle genannten Parameter wurden für alle verfügbaren Läufe der in aufgelisteten gekoppelten Klimamodelle MPI-OM/REMO (Mathis et al. 2018) und NEMO/RCA4

(Dieterich et al. 2013) für die verschiedenen, repräsentativen Szenarien der weiteren Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgewertet (Representative Concentration Pathways = RCP 2.6 *Klimaschutzszenario*, 4.5 *moderates Szenario* und 8.5 *Weiter-wie-bis-her-Szenario*; van Vuuren et al. 2011). NEMO/RCA4 wurde dabei am Modellrand jeweils von den globalen Klimamodellen MPI-ESM LR (Giorgetta et al. 2013), HadGEM2 ES (Collins et al. 2011), GFDL ESM2M (Zadeh et al. 2012), EC-Earth (Hazeleger et al. 2010) und IPSL CM5A (z. B. Hourdin et al. 2012) angetrieben.

Die Nord- und Ostseeklimatologie (BNSC, Hinrichs und Jahnke-Bornemann 2017) ist eine Erweiterung der im Rahmen von KLIWAS entwickelten Nordseeklimatologie und entstand in Zusammenarbeit zwischen dem BSH und dem ICDC. Die BNSC basiert auf atmosphärischen und ozeanographischen Messdaten und wird auf einem korrespondierenden regelmäßigen Gitter (Atmosphäre: $1^\circ \times 1^\circ$, Ozean: $0,25^\circ \times 0,25^\circ$) bereitgestellt. Aktuell stehen für die Atmosphäre jeweils bodennahe Felder für 2 m Lufttemperatur, Taupunkt, und Luftdruck auf Meeresebene zur Verfügung. Für den Ozean gibt es Felder in mehreren Tiefenstufen jeweils für die Wassertemperatur und den Salzgehalt. Die atmosphärischen Daten liegen in Form von Feldern von Monatsmittelwerten in den jeweiligen Gitterboxen für den Zeitraum 1950–2015 vor. Zusätzlich gibt es Felder mit klimatologischen Mittelwerten für die Bezugszeiträume 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1981–2010, sowie die Möglichkeit, zusätzliche Zeiträume berechnen zu lassen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden die Luftdruckdaten der BNSC, sowie zusätzliche unabhängige Stationsdaten über Land genutzt, um Reanalyse- und Klimamodelldaten zu validieren (Ganske et al. 2019). Alle Daten der BNSC stehen über die Homepage des ICDC zum freien Download bereit⁹.

Die Verteilung des Luftdrucks bestimmt die Wetterlagen und damit die Wind- und Niederschlagsfelder. In diesem Bericht wird ausschließlich Luftdruck auf Meeresebene (SLP) verwendet und im weiteren Verlauf nur als Luftdruck bezeichnet. Zur Validation wurde die Reanalyse ERA-40 (Uppala et al. 2005) gewählt, die auch den Antrieb für die Validationsläufe der regional gekoppelten Klimamodelle liefert. Außerdem wurden ERA-Interim (Berrisford et al. 2009, Dee et al. 2011) und die regionale Reanalyse COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015) in die Untersuchungen mit einbezogen. Die Validationsläufe der Klimamodelle NEMO/RCA4 (Dieterich et al. 2013) für und MPI-OM/REMO (Mathis et al. 2018) wurden zusätzlich zu der BNSC auch mit ERA40 und COSMO-REA6 validiert. Da die Luftdruckdaten der BNSC nur in Monatsmittelwerten vorliegen, wurden in den gesamten Analysen auch bei den Reanalysen und Klimamodellen nur Monatsmittelwerte bzw. monatliche Standardabweichungen betrachtet (Ganske et al. 2019, Hänsel et al. 2020a). Auswertungen der Projektionsläufe beschränken sich auf die aus den Luftdruckdaten abgeleiteten Wetterlagen.

Ferner wurden ausschließlich die Windfelder in 10 m Höhe über See betrachtet, da sie für die Beschreibung der Wirkung des Windes auf Wasserstand und Wellen verwendet wurden. Deshalb wird im Folgenden nur noch von Windfeldern, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen die Rede sein, ohne dass explizit auf die Höhe von 10 m über Grund bzw. NN verwiesen wird. Für die Auswertungen im Expertennetzwerk wurden die Ergebnisse der Reanalyse COSMO-REA6 als Referenzdaten für die Windfelder in 10 m Höhe über See verwendet. Diese Reanalyse ist wegen ihrer hohen räumlichen Auflösung für die Vergleiche besonders gut geeignet. Borsche et al. (2016) haben bei einem Vergleich von COSMO-REA6 mit Messdaten gezeigt, dass die Windfelder von COSMO-REA6 eine gute Approximation für die Windfelder auf der Nordsee sind. Zudem wurde durch einen Vergleich von Windmessungen an den Forschungsplattformen FINO1-3 mit den Windwerten aus COSMO-REA6 an einzelnen Gitterpunkten gezeigt (Fery et al. in Vorbereitung), dass auch die extremen Windgeschwindigkeiten von Stürmen bei COSMO-REA6 gut mit den Messungen übereinstimmen.

Für die Auswertungen der täglichen Niederschlagssumme wurden ebenfalls die Ergebnisse der räumlich hoch aufgelösten Reanalyse COSMO-REA6 als Referenz über See verwendet. Bollmeyer et al. (2015) haben bei einem Vergleich von COSMO-REA6 mit Messdaten und der globalen Reanalyse ERA-Interim gezeigt,

⁹ <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/projekte/bnsc/>

dass die Niederschlagsfelder von COSMO-REA6 deutlich besser mit den Messungen über Land übereinstimmen und auch Tagesgang und Extreme besser abbilden als ERA-Interim. Da über See keine weiteren Referenzdaten vorliegen, muss angenommen werden, dass COSMO-REA6 auch hier besser geeignet ist als globale Reanalysen. Im Einzugsgebiet des NOK wurde der REGNIE Datensatz des DWD (z. B. Rauthe et al. 2013) als Referenz genutzt. Extreme der täglichen Niederschlagssummen wurden stationär über die Anpassung mit der allgemeinen Extremwertverteilung (Generalized Extreme Value Distribution (GEV)) untersucht. Künftig soll die Methodik erweitert werden, um Unsicherheiten besser darstellen und quantifizieren zu können und um die Anpassung zu optimieren. Für die Untersuchungen der Extremwerte wurden die Programmroutinen der Matlab Toolbox WAFO (Brodtkorb et al. 2000) genutzt. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Kapitel 5.1 beschrieben.

4.2 Ozeanographische Parameter

Titel	Ozeanographische Parameter (BSH)
<u>Ansprechpersonen</u> , Mitarbeitende	<u>J. Möller</u> , S. Hüttl-Kabus
Laufzeit	2016–2019
Inhalt:	Bereitstellung von Beobachtungs- und Klimamodelldaten mit Fokus auf den Meeresspiegelanstieg
Dateninput (von)	Salzgehalt, Wassertemperatur, Wellenhöhen und Meeresspiegel aus BSH-Daten, KLIWAS-Nordseeklimatologie, BMBF-Verbundvorhaben RACE! (Regionale Atlantikzirkulation im Globalen Wandel, U. Mikolajewicz, MPI-M Hamburg)
Zuarbeiten und Ergebnisse (an)	Salzgehalt, Wassertemperatur, Meeresspiegel an BAW
primäre Werkzeuge	Gekoppelte Klimamodelle, Nordseeklimatologie, Statistikprogramme
Untersuchungsgebiet(e)	Nordsee, Deutsche Küste
Vorläuferberichte, Auswertungsbeispiele, etc.	Bülow et al. (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse von Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.01 (KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-31/2014). http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_31_2014_2.01.pdf Carson et al. (2016): Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century, <i>Climatic Change</i> , 134(1), 269-281. Dangendorf et al. (2017): Reassessment of 20th century global mean sea level rise. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences</i> , 201616007. https://doi.org/10.1073/pnas.1616007114

Der globale Meeresspiegelanstieg (SLR, Sea Level Rise) hat natürliche wie anthropogene Ursachen und lässt sich mit verschiedenen Einflussfaktoren erklären. Zu einer Änderung des absoluten Meeresspiegels führen:

- a. Die thermische Ausdehnung des Ozeanwassers
- b. Das Abschmelzen von Inlandgletschern
- c. Verlust von arktischen und antarktischen Festlandseismassen
- d. Die Änderungen des Salzgehalts
- e. Veränderte Ozeanströmungen

Der regionale Meeresspiegel wird außerdem beeinflusst durch:

- f. Die Ausgleichsbewegung der Erdkruste nach der letzten Eiszeit hat an den betroffenen Küsten eine Änderung des relativen Meeresspiegels zur Folge. Diese Ausgleichsbewegungen finden besonders auf der Nordhalbkugel statt und können regional sowohl zu einem stärkeren relativen SLR (wie für die südliche Nordsee) als auch zu einer Abschwächung bzw. sogar zu einer Umkehr des relativen SLR (nördliche Ostsee) führen.
- g. Lokale (regionale) Landhebungen und -senkungen, z. B. verursacht durch Entwässerungsmaßnahmen, Erdöl-/Erdgasförderung und Salztektonik, führen zu relativen Meeresspiegelbewegungen.

Die gelisteten Faktoren werden durch Messungen und Abschätzungen bestimmt, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Langjährige Zeitreihen des Wasserstands werden im deutschen Pegelarchiv der BfG in Form von Stationsdaten der einzelnen Pegel zur Verfügung gestellt. Diese Zeitreihen reichen mindestens bis 1997, teilweise sogar bis 1843 (für Cuxhaven) und fast immer länger als 30 Jahre zurück und sind daher mit wenigen Ausnahmen für die Analyse langjähriger Trends bzw. auch für extremwertstatistische Untersuchungen geeignet. Es wurden dabei die linearen Trends sowohl der mittleren Wasserstände verschiedener Pegelstationen der deutschen Nordseeküste als auch die Trends der höheren (70.-99. Perzentil) wie niedrigeren (1.-30. Perzentil) Wasserstände bestimmt. Damit wurde nicht nur der langjährige Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht, sondern auch regionale Unterschiede zwischen den Stationen bestimmt.

Zusätzlich wurden mit verschiedenen extremwertstatistischen Methoden die besonders hohen Niedrigwasser wie Hochwasser analysiert. So interessieren für den Küstenschutz v. a. die zu erwartenden extremsten Wasserstände, in Schleswig-Holstein wird beispielsweise der Bemessungswasserstand für die Landesschutzdeiche für das Wiederkehrintervall von $T = 200$ Jahren bestimmt, d. h. der Deich soll einem Hochwasserereignis, das durchschnittlich alle 200 Jahre eintritt, standhalten können.

Für die extremwertstatistischen Untersuchungen wurden verschiedene Methoden verwendet, die sich grundsätzlich in zwei unterschiedliche Vorgehensweisen aufteilen lassen, in „klassische“ stationäre und in die „neueren“ instationären Methoden. Bei den **stationären Methoden** (hierbei müssen die Daten erst trendbereinigt und normalisiert werden) werden die Parameter einer bestimmten Verteilung entweder an die **gesamte** Datenreihe angepasst (beispielsweise eine Verteilung aus der Familie der GEV nach Gumbel, Frechet oder Weibull), oder die Anpassung erfolgt nur mithilfe der extremeren Werte aus der Verteilung. Vorteil hierbei ist eine bessere Anpassung an die höheren Werte, die bei der Extremwertstatistik vor allem interessieren, Nachteil ist das breitere Konfidenzintervall aufgrund der kleineren Datenlage. Die extremeren Werte können wiederum mit verschiedenen Methoden ausgewählt werden (Block Maxima, R-largest order, peak over threshold (POT)). Für die POT-Methode erfolgte die Anpassung mit der generalisierten Pareto-Verteilung (GPD = Generalized Pareto Distribution). Dabei wurden alle (voneinander unabhängigen) Werte über einem gewissen Schwellwert genutzt. Die Bestimmung des Schwellwertes erfolgte über zwei unterschiedliche objektive Methoden: Mean residual life (MRL) und Dispersion Index (DI).

Bei der **instationären Methode** können Originaldaten verwendet werden, sowohl Trends des Mittelwertes wie auch der Standardabweichung bleiben dabei erhalten. Alle Berechnungen wurden hier für 30-jährige gleitende Mittel durchgeführt, sowohl Mittelwert wie auch Standardabweichung wurden als variabel angenommen. Der Shape (Schiefe und Kurtosis) konnte für die Nordseepegel als stationär angenommen werden. Für diesen Bericht erfolgte die Berechnung ausschließlich mithilfe der Gumbelverteilung, die sich für die Nordseepegel als passend erwiesen hat. Weitere Informationen zu den extremwertstatistischen Untersuchungen finden sich im Bericht zu den Meilensteinen M108b-2 und M108c-4 (Möller 2019).

Ferner wurde das Seegangsfeld der Nordsee näher untersucht. Seegang lässt sich als eine Überlagerung von vielen einzelnen Wellen beschreiben. Das Seegangsfeld wird dabei typischerweise durch eine Reihe von abgeleiteten Größen wie z. B. der signifikanten Wellenhöhe (das Mittel über das höchste Drittel aller Wellen) beschrieben. Die Verteilung der Wellen innerhalb eines Seegangsfeldes, insbesondere das Auftreten von Einzelwellen mit Höhen deutlich über der signifikanten Wellenhöhe (sogenannten Extremwellen), wurde

hier das erste Mal für die Bojen des BSH in der südlichen Nordsee systematisch untersucht. Im Detail verfolgte die Untersuchung folgende Ziele:

1. Aufarbeitung der vorhandenen Daten und Identifizierung von Extremwellen
2. Erstellung einer Klimatologie und Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Variabilität
3. Untersuchung, inwieweit sich Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Extremwellen und dem Hintergrundfeld (Seegangsspektrum, Großwetterlagen) etc. identifizieren lassen.

Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Kapitel 5.2 näher dargestellt.

4.3 Hydrodynamik Deutsche Bucht

Titel	Hydrodynamik (BAW)
<u>Ansprechpersonen</u> , Mitarbeitende	<u>C. Rasquin</u> , E. Rudolph, R. Seiffert, B. Wachler, N. Winkel
Laufzeit	2016–2019
Inhalt:	Ermittlung der Änderungen von Tidekennwerten des Wasserstands und der Strömung unter klimawandelbedingten Szenarien zum Meeresspiegelanstieg, Wind, Oberwasserzufluss und möglichen topographischen Änderungen der Watten in der Deutschen Bucht
Dateninput (von)	Salzgehalt, Wassertemperatur, Meeresspiegel von BSH, Abflusszeitreihen von der BfG
Zuarbeiten und Ergebnisse (an)	BMVI, WSV, Länder
primäre Werkzeuge	Hydronumerisches Modell (UnTRIM)
Untersuchungsgebiet(e)	Deutsche Bucht
Vorläuferberichte, Auswertungsbeispiele, etc.	<p>BAW (2015): Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg in den Ästuaren Elbe, Jade-Weser und Ems. Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg, Dezember 2015.</p> <p>BAW (2018): Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg, https://hdl.handle.net/20.500.11970/105573</p> <p>Seiffert et al. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports - Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02 (KLIWAS Schriftenreihe, 36).</p>

Die zukünftige Entwicklung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht entsteht aus einem komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren wie dem Meeresspiegelanstieg, dem Wind und dem Abfluss in den Ästuaren. Daneben gibt es weitere Faktoren, die im Wechselspiel mit den erstgenannten stehen. Hierzu zählt unter anderem die Reaktion der Topographie auf den Meeresspiegelanstieg. Um Aussagen über eine

mögliche zukünftige Entwicklung treffen zu können, müssen für alle Faktoren Randbedingungen für mögliche zukünftige Zustände erstellt werden. In diesem Schwerpunkt wurden die Randwerte von den jeweiligen Behörden generiert und gemeinsam in einem Modell der Deutschen Bucht zusammengeführt. Das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren mit den jeweils beteiligten Behörden ist in Abbildung 4-1 dargestellt und die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Kapitel 5.3.2 beschrieben.

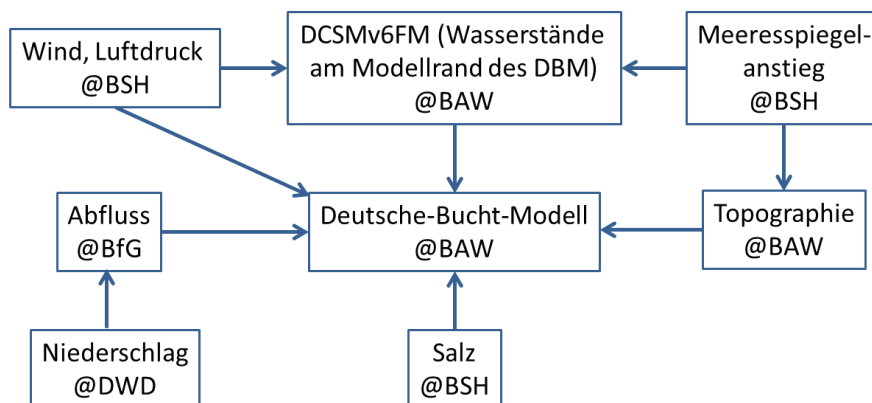


Abbildung 4-1: Schema der behördenübergreifenden Erstellung von Randbedingungen im Arbeitspaket Hydrodynamik Deutsche Bucht.

4.4 Fokusregionen

Als Fallstudie für den Küstenbereich wurde der NOK bezüglich seiner Resilienz gegenüber den zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen (insbesondere Meeresspiegelanstieg und Änderungen in der Binnenhydrologie) untersucht. Der NOK ist eine der meistbefahrenen künstlichen Wasserstraßen für seegehende Schiffe weltweit. Jährlich werden ungefähr 100 Millionen Tonnen Güter zwischen Nord- und Ostsee transportiert. Schiffszahlen nehmen mit ca. 30.000 (im Jahr 2016) weltweit eine Spitzenposition ein. Neben seiner Hauptfunktion als Wasserstraße dient der NOK auch der Entwässerung eines Einzugsgebiets von etwa 1.530 km², was etwa 10 % des Gesamtgebiets Schleswig-Holsteins ausmacht. Er ist damit der größte künstliche Vorfluter Schleswig-Holsteins.

Um mögliche Klimaauswirkungen auf dieses komplexe System belastbar zu erfassen, haben die BfG (Kapitel 4.4.1) im Rahmen eines WSV Auftrags und das BSH (Kapitel 4.4.2) unterschiedliche Ansätze und Methoden vergleichend nebeneinandergestellt. Beide zielten darauf ab, Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOK zu identifizieren und Häufigkeitsänderungen von Problemsituationen für die Zukunft abzuleiten. Diese sowie im Rahmen anderer Projekte erzielten Ergebnisse können wertvolle Hinweise liefern, worauf zu achten ist bzw. was getan werden muss, um die Entwässerung der Küstengebiete (Kapitel 4.4.3) auch in Zukunft gewährleisten zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Kapitel 5.4 näher dargestellt.

4.4.1 NOK - Modellansatz zur Wassermengenbewirtschaftung (WSV Auftrag)

Titel	Fokusregion NOK (BfG, WSV-Auftrag)
<u>Ansprechpersonen</u> , Mitarbeitende	<u>A.-D. Ebner von Eschenbach</u> , J. Hohenrainer
Laufzeit	2014–2019
Inhalt:	Ableitung von Indikatoren für Grenzzustände der Wassermengenbewirtschaftung des NOK anhand tatsächlich abgelaufener Ereignisse und die Ermittlung der Häufigkeit ihres Auftretens unter Berücksichtigung zukünftigen klimatischer Veränderungen
Dateninput (von)	BSH: Bereitstellung einer lückenlosen Zeitreihe von Wasserstandsdaten für den Pegel Cuxhaven von 01/1918 bis 07/2016
Zuarbeiten und Ergebnisse (an)	<p>BfG-Bericht zur Phase 1 liegt der WSV (als Auftraggeber) vor, BfG (in Vorbereitung), die Finalisierung und Veröffentlichung schließt sich an.</p> <p><i>Für die WSV als Auftraggeber</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufbau eines praxisorientierten Modellsystems (Bilanzierungs- und Steuerungsmodell für die Simulation einer vorausschauenden langfristigen Wassermengenbewirtschaftung und eines Wasserhaushaltsmodells zur Simulation des kontinuierlichen Zuflusses zum Kanal) – letzteres ist zusätzlich Bestandteil des zusätzlich aufgebauten operationellen Vorhersagesystems für den Kanal; ▪ Identifizierung tatsächlich abgelaufener Ereignisse mit kritischen Bewirtschaftungssituationen anhand im Vorfeld ermittelter Kennwerte, ▪ Ermittlung deren Auftretenshäufigkeit unter zukünftigen klimatischen Veränderungen und Vergleich mit der Referenz, ▪ Untersuchung einer Anpassungsoption (am Beispiel von Pumpwerken) zur Reduzierung der Auftretenshäufigkeit in der Zukunft ▪ Ermittlung des hierzu erforderlichen Energieaufwands <p><i>Für das BSH</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ mehrere Zuflusszeitreihen zum Kanal zur Validierung des Prädiktorenansatzes ▪ Bereitstellung der Wasserstands-Abgabe/Entwässerungs-Beziehung für den Standort Brunsbüttel
primäre Werkzeuge für eine praxisorientierte Modellierung	<p>BEWASYS NOK (Bewirtschaftung Wasserwirtschaftlicher Systeme): Bilanz- und Steuermodell zur Simulation der Wassermengenbewirtschaftung, mit Steuerung auf einen Zielwasserstand im Kanal unter Ausnutzung der Entwässerungsanlagen an den Kanalenden als Regelorgane, basierend auf dem Modellsystem BEWASYS, Preuß (2010)).</p> <p>SOBEK NOK: Für die operationelle Vorhersage (kurzfristige Wasserbewirtschaftung, Vorhersagezeitraum bis zu 5 Tage) wurde das eindimensionale hydrodynamische Modell SOBEK NOK als Bestandteil eines operationellen Vorhersagesystems für den NOK aufgebaut, kalibriert und validiert (aktuell noch in der Testphase).</p> <p>LARSIM NOK: Simulation des Gebietszuflusses aus dem 1.530 km² großen Einzugsgebiet bei sich verändernder Meteorologie, basierend auf dem Modellsystem LARSIM (Bremicker 2000).</p> <p>Nähere Informationen zu den Modellen finden sich in BfG (in Vorbereitung)</p>
Untersuchungsgebiet(e)	Einzugsgebiet NOK (Abbildung 4-2)

Titel	Fokusregion NOK (BfG, WSV-Auftrag)
Vorläuferberichte, Auswertungsbeispiele, etc	<p>BfG (in Vorbereitung) Wassermengenbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen.: Phase 1 von 2014 bis 2019, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. (finalisierter Entwurf vom 23.08.2019)</p> <p>Ebner von Eschenbach (2017): Simulation der Wasserbewirtschaftung des NOK - Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Veranstaltungen "Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen", Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) 5, 114-129. DOI: 10.5675/ BfG_Veranst_2017.5</p>

Das Ziel des WSV-Gesamtauftrages (beauftragt durch die GDWS, Standort Kiel) war die Entwicklung von Grundlagen für eine vorausschauende kurz- (wenige Tage) und langfristige (bis Ende des 21. Jahrhunderts) Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems, um einen möglichst reibungslosen Ablauf des Schiffsverkehrs und des Betriebes der Wasserstraße einschließlich des Querverkehrs durch die Fähren gewährleisten zu können. Die Untersuchungen zur langfristigen Wassermengenbewirtschaftung sind dabei verbunden mit den Fragen: „Wie entwickeln wir das System zukünftig weiter? Wie passen wir es langfristig an veränderte Verhältnisse und Bedürfnisse an? (Maurer und Ebner von Eschenbach 2011)“. Entsprechend wurde ein Bilanzierungs- und Steuerungsmodell für den Kanal entwickelt, welches (i) auf einen einzigen, räumlich konstanten Zielwasserstand im Kanal steuert, (ii) verschiedene Entwässerungskombinationen summarisch berücksichtigt und (iii) in der Lage ist, über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten Wasserstände und Entwässerungswassermengen im Stundenzeitschritt als Reaktion auf verschiedene Randbedingungen möglicher zukünftiger Veränderungen zu simulieren, um darauf aufbauend die Veränderungen des Systems ermitteln zu können.

Im Speziellen wurden durch die WSV folgende Leistungen bei der BfG beauftragt: **Ableitung von Indikatoren für Grenzzustände der Bewirtschaftung** des NOK anhand tatsächlich abgelaufener Ereignisse und **Ermittlung der Häufigkeit ihres Auftretens** unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger klimatischer Änderungen (BfG in Vorbereitung).

Die Bearbeitung erfolgte in folgenden Schritten:

1. **Identifizierung kritischer Bewirtschaftungssituationen in der Vergangenheit** anhand der Wasserstandszeichnungen der fünf Betriebspegel (siehe orange Fünfecke in Abbildung 4-2 und Ermittlung deren ursächlicher Randbedingungen (Höhe des Gebietszuflusses, Höhe der Außenwasserstände). Als Grenzzustand der Bewirtschaftung wurde der Wasserstand 5,40 m Pegelnullpunkt (PNP) gewählt, bei dessen Erreichen oder Überschreitung die Schifffahrt eingestellt werden muss. Die Höhe des täglichen bzw. stündlichen kontinuierlichen Gebietszuflusses in den Kanal wurde dabei in einem ersten Schritt anhand von Abflussbeobachtungen (siehe mündungsnahsten grünen Quadrate in Abbildung 4-2) abgeschätzt.
2. **Aufbau** inklusive Kalibrierung/Validierung bzw. Plausibilisierung des Modellinstrumentariums. Bilanzierungs- und Steuerungsmodell für den Kanal (BEWASYS NOK) und Wasserhaushaltsmodell (LARSIM NOK) zur Ermittlung des Gesamtzuflusses aus dessen Einzugsgebiet.
3. **Sensitivitätsuntersuchungen:**
 - a. Untersuchung des Einflusses der Spannweite von drei unterschiedlich ermittelten Einzugsgebietszuflüssen zum Kanal (auf der Basis von Beobachtungsdaten regionalisierte Stundenwertreihe und Tageswertreihe sowie mit dem Wasserhaushaltsmodell simulierte Tageswertreihe) auf die Simulation der Kanalwasserstände.
 - b. Untersuchung des Einflusses der Wahl der Entwässerungsorgane am Standort Brunsbüttel (4 Schütze, 8 Schütze und 16 Schütze) auf die Simulation der Kanalwasserstände.

4. Ableitung von **Szenarien** für den Klimawandel:
 - a. Veränderung der Meteorologie und somit Veränderung des Zuflusses aus dem Einzugsgebiet.
 - b. Festlegung von Annahmen zum Anstieg des Meeresspiegels in Nord- und Ostsee (im Sinne von Sensitivitätsuntersuchungen).
5. Untersuchungen zur **Kanalbewirtschaftung unter Klimawandel** mit dem Schwerpunkt auf kritische Bewirtschaftungssituationen, in denen der Wasserstand im Kanal den Grenzwasserstand von 5,40 m PNP (Einstellung der Schifffahrt) überschreitet und Vergleich mit der Referenz.
6. Untersuchung der **Auswirkungen einer möglichen Anpassungsoption** (Installation von Pumpen zur Entwässerung des Kanals) hinsichtlich der Möglichkeit der Reduzierung von zukünftigen kritischen Bewirtschaftungssituationen, in denen der Grenzwasserstand von 5,40 m PNP überschritten wird.

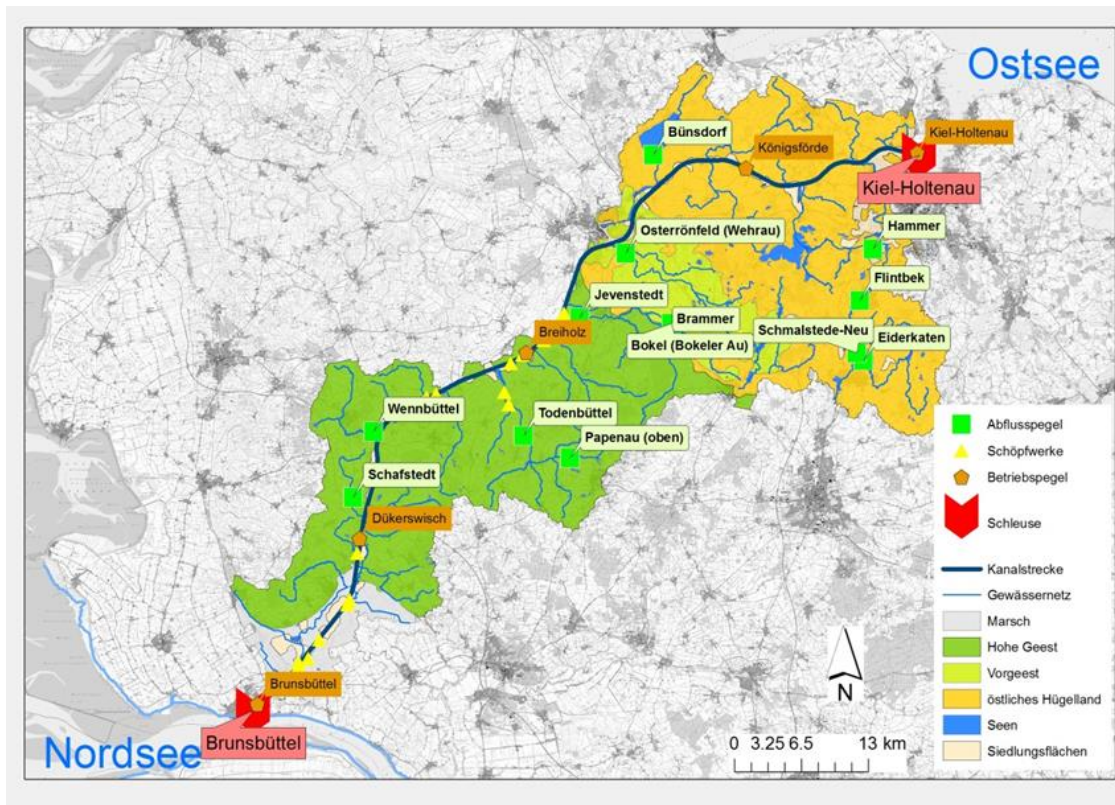


Abbildung 4-2: Einzugsgebiet des NOK. Ein Großteil des 1.530 km² großen Gebietes befindet sich südlich des Kanals. Zusätzlich zu den Hauptnaturräumen sind die Schleusen- und Entwässerungsstandorte in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau sowie die Lage der Schöpfwerke in Marsch und Hohe Geest dargestellt. Die Darstellung erfolgte durch die BfG auf der Grundlage von Daten der Landesämter für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume sowie Natur und Umwelt Schleswig-Holsteins und den in der BfG verfügbaren WMS-Diensten.

4.4.2 NOK - Prädiktoransatz zur Bestimmung angespannter Entwässerungssituationen

Titel	Fokusregion NOK (BSH)
<u>Ansprechpersonen</u> , Mitarbeitende	<u>N.H. Schade</u> , <u>J. Möller</u> , C. Jensen, A. Ganske (chem. BSH)
Laufzeit	2016–2019
Inhalt:	Windstau in der Deutschen Bucht und Niederschlagsindizes für das Einzugsgebiet des NOK. Berechnung von kritischen Werten von Windstau und Niederschlagsindizes, ab denen eine Störung der Entwässerung des NOK zu erwarten ist. Berechnung der Häufigkeiten des gleichzeitigen Eintretens dieser kritischen Größen.
Dateninput(von)	Niederschlag, Wind, Wasserstand, Luftdruck aus Klimamodellen, Reanalysen und Beobachtungen
Zuarbeiten und Ergebnisse (an)	Zeitreihen von Windstau, Wasserstand und Niederschlagsindizes sowie Listen von Phasen, in denen kritische Ereignisse in der Vergangenheit möglich waren oder in der Zukunft möglicherweise eintreten können.
primäre Werkzeuge	Analyse von Messdaten, Reanalysen und Ergebnissen von Klimamodellen
Untersuchungsgebiet(e)	Hydrologisches Einzugsgebiet des NOK, Deutsche Bucht mit Elbe Ästuar, Kieler Bucht
Vorläuferberichte, Auswertungsbeispiele, etc.	<p>Ganske A, Schade NH, Hüttl-Kabus S, Möller J, Heinrich H, Tinz B und Gates L (2017) Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979–2015, Bericht zum Meilenstein M108b-1 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.</p> <p>LKN–SH und LLUR–SH (2016) Bericht zum Weihnachtshochwasser 2014, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) und Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR-SH). https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/H/hydrologie_niederschlag/Downloads/hochwasserbericht2014.html</p> <p>Schade (2017): Evaluating the atmospheric drivers leading to the December 2014 flood in Schleswig-Holstein, Germany, Earth System Dynamics, 8, 405-418. https://doi.org/10.5194/esd-8-405-2017</p> <p>Schröter K, Kunz M, Elmer F, Mühr B und Merz B (2015) What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. Hydrology and Earth System Sciences 19(1), 309-327. DOI:10.5194/hess-19-309-2015</p> <p>Uhlemann S, Thieken AH und Merz B (2010) A consistent set of trans-basin floods in Germany between 1952-2002. Hydrology and Earth System Sciences 14(7), 1277-1295. DOI:10.5194/hess-14-1277-2010</p>

Alternativ zum Modellierungsansatz wurde ein Ansatz über Prädiktoren (Abbildung 4-3) implementiert. Die jeweiligen Prädiktoren stammen dabei direkt aus dem Output (regionaler) Klimamodelle und lassen mit Hilfe statistischer Analysen auf beobachtete und zukünftige Veränderungen schließen. Für Prädiktoren-Set 1 wurden die Wasserstände (W) vom BSH analysiert und als Randdaten für das Modell der BfG geliefert.

Messdaten des Zuflusses in den NOK sind nur sporadisch und nicht flächendeckend vorhanden. Eine Validierung des Zuflusses auf Basis von Beobachtungen war somit nicht möglich. Hierfür wurden stattdessen die von der BfG im Prädiktoren-Set 1 berechneten Zuflüsse (Q) verwendet.

Da angespannte Entwässerungszustände im NOK gegenwärtig nicht allein durch erhöhte Wasserstände in Brunsbüttel/Kiel verursacht werden, sondern in Kombination mit erhöhten Zuflussmengen auftreten (Ganske et al. 2017), wurden die Indizes zur Bestimmung des Zuflusses direkt aus Niederschlagsdaten abgeleitet (Prädiktoren-Set 2). Eine Ermittlung kombinierter Auftretenswahrscheinlichkeiten von erhöhten Zuflussmengen und erhöhten seeseitigen Wasserständen soll in Phase II weitere Aussagen über mögliche zukünftige Änderungen liefern, z. B. auch in wie weit es zu Problemen für die kanalfahrenden Schiffe führen kann. Schließlich sollen Zusammenhänge mit der vorherrschenden atmosphärischen Zirkulation mit Hilfe von Wetterlagenanalysen (Prädiktoren-Set 3) detaillierter erfasst und untersucht werden (wie z. B. Sturm-
wetterlagen mit erhöhten Niederschlägen im Binnenland und erhöhten seeseitigen Wasserständen).

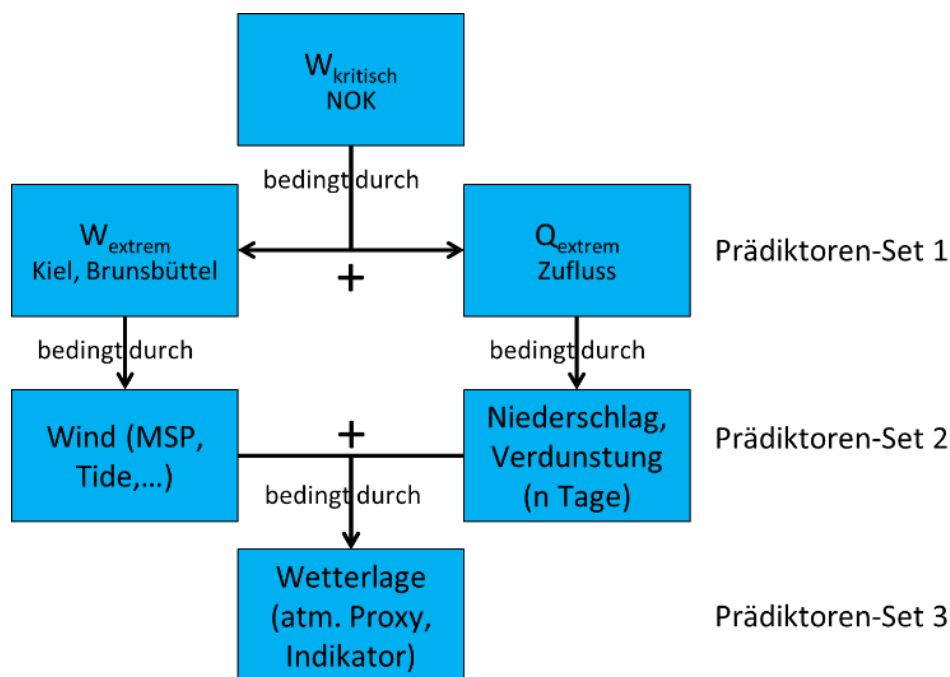


Abbildung 4-3: Prädiktoren-Ansatz zur Bestimmung des Abflusses in den NOK. Hier bezeichnet „ W “ den Wasserstand (sowohl im NOK selbst, als auch den Außenwasserstand in Kiel & Brunsbüttel), „ Q “ den Zufluss in den NOK, „MSP“ den Luftdruck auf Meeresniveau und „ n “ die Anzahl (Tage). Als „atm. Proxy oder Indikator“ wurden in Kapitel 5.1.2 der aus den Wetterlagen bestimmte Sturmindex und die in Kapitel 5.4.2 definierten Indizes zur Vorfeuchte und Ereignisniederschlag genutzt.

4.4.3 Untersuchungen verwandter externer Projekte in Küstengebieten

Titel	Untersuchungen in Küstengebieten (BSH)
<u>Ansprechpersonen</u> , Mitarbeitende	<u>N.H. Schade</u> , J. Möller
Laufzeit	2016–2019
Inhalt:	Ansätze zur Ausweitung der Arbeiten am NOK auf die Küstengebiete unter Einbeziehung der Forschungsergebnisse der Landesämter sowie Küstenprojekten.
Dateninput (von)	Niederschlag, Wind, Wasserstand, Luftdruck aus Klimamodellen, Reanalysen und Beobachtungen
Zuarbeiten und Ergebnisse (an)	Zeitreihen von Windstau, Wasserstand und Niederschlagsindizes.
primäre Werkzeuge	Analyse von Messdaten, Reanalysen und Ergebnissen von Klimamodellen, Auswertung/Einbeziehung von Ergebnissen anderer Projekte im Küstenbereich
Untersuchungsgebiet(e)	Hydrologisches Einzugsgebiet „Küste“ (Nord- und Ostsee)
Vorläuferberichte, Auswertungsbeispiele, etc	<p>AG Niederungen 2050 (2014) Abschlussbericht: Grundlagen für die Ableitung von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel, Marschenverband Schleswig-Holstein, Hamburg. https://schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/naturschutz/Downloads/abschlussberichtAG2050.html</p> <p>Spiekermann J, Ahlhorn F, Bormann H und Keschull J (2018) Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Klimawandels - Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden, Universität Oldenburg, Jade Hochschule, Firma Küste und Raum. https://uol.de/fileadmin/user_upload/proj/klever/KLEVER/KLEVER-Ergebnisbroschuere.pdf</p> <p>Schade (2017): Evaluating the atmospheric drivers leading to the December 2014 flood in Schleswig-Holstein, Germany, Earth System Dynamics, 8, 405-418, https://doi.org/10.5194/esd-8-405-2017</p>

Basierend auf den Ergebnissen laufender und bereits abgeschlossener Projekte an der Küste und in Küstenregionen, sowie den Erkenntnissen aus den Untersuchungen am NOK wurden erste Ansätze zusammengetragen, wie die zukünftige Entwässerung der Küstengebiete gewährleistet werden kann. Einige Forschungsprojekte, wie z. B. das Projekt KLEVER im Verbandsgebiet Emden, haben bereits die Anwenderseite mit in die Forschungsarbeit einbezogen und können neben ersten Ergebnissen auch möglichen Ansprechpartnern und hilfreiche Hinweise für die Implementierung von Partizipationsprozessen liefern. Die AG Niederungen 2050 hat die Niederungsgebiete [Schleswig-Holsteins] untersucht und u. a. auch in Bezug auf mögliche Anpassungsmaßnahmen bewertet.

Ferner existieren regionale Studien zur Grundwasserversalzung der Küstengebiete durch den Meeresspiegelanstieg (SALTSA) und zur nachhaltigen Landnutzung in Küstenräumen (COMTESS). Lokal wurde im Hamburger Raum ein Projekt des BMBF zur Sicherstellung der Entwässerung küstennaher, urbaner Räume unter Berücksichtigung des Klimawandels (StuCK) vom Expertennetzwerk begleitet und beraten (Gennis 2016, LSBG 2017). Untersuchungen bezüglich extremer Nordseesturmfluten und möglichen Auswirkungen wurden im Projekt EXTREMENESS durchgeführt (siehe Kapitel 5.4.3 sowie Schlussbericht *Hochwassergefahren*, Rauthe et al. 2020).

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die im Rahmen des Schwerpunkts *Fokusgebiete Küsten* erzielten Ergebnisse der beschriebenen Arbeitspakete zusammenfassend dargestellt. Ausführlichere Informationen finden sich in den jeweiligen Meilensteinberichten (Tabelle 9-1).

5.1 Änderungen meteorologischer Parameter

Die präsentierten Analysen zu möglichen meteorologischen Klimaänderungen in der Nord- und Ostseeregion basieren auf Realisierungen von Klimaszenarien mit den gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4. Beide Modelle wurden vorab hinsichtlich bodennahem Wind, Luftdruck im Meeresniveau und Niederschlagssummen anhand von Reanalysen und Stationsdaten validiert (M108a-2, Ganske et al. 2019). Das Kapitel „Wind auf See“ (5.1.1) beschäftigt sich mit extremen Windgeschwindigkeiten in diversen Subregionen der Nord- und Ostsee, aber auch mit dem lokalen Effektivwind und Potentiellen Sturmfluten bei Cuxhaven. „Wetterlagen und Stürme“ (5.1.2) beruht auf einer objektiven Klassifizierung der atmosphärischen Zirkulation über der Nordsee anhand täglicher Luftdruckfelder. Unter „Tägliche Niederschlagssumme“ (5.1.3) schließlich werden vorläufige extremwertstatistische Ergebnisse für das Einzugsgebiet des NOK vorgestellt.

5.1.1 Wind auf See

- Die Änderungen in der Häufigkeit und Intensität extremer Windgeschwindigkeiten wurden für 7 Gebiete der Nord- und Ostsee anhand des 2 %-Quantils der Windgeschwindigkeitsverteilungen analysiert. Aufgrund der hohen natürlichen Variabilität ergaben sich nennenswerte Änderungen nur für die *ferne Zukunft* des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*. Auf Basis von 8 Realisierungen nahmen die Häufigkeit und Intensität in 43 von 56 Fällen zu. Mehrheitlich signifikante Anstiege konnten nur für die südöstliche Nordsee (SO) und die Ostsee (ZO und MB) festgestellt werden. Die Anstiege (m/s) betragen für den Ensemblemedian (Bandbreite: P15; P85) der unteren Grenzgeschwindigkeit des 2 %-Quantils in SO | ZO | MB: 0,3 (0; 0,5) | 0,4 (0,1; 0,5) | 0,3 (0,2; 0,5). Das gegenwärtige 2 %-Quantil verbreitert sich hier auf: 2,4 (1,9; 2,7) | 2,5 (2,1; 3,1) | 2,7 (2,4; 3,0).
- Eine punktuelle Untersuchung des 2 %-Quantils der Verteilung der Effektivwindgeschwindigkeit bei Cuxhaven ergab keine signifikanten Änderungen hinsichtlich Stärke, Andauer und Anzahl potentieller Sturmflutereignisse.

Umfangreiche Untersuchungen zu möglichen künftigen Änderungen von Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen über der Nord- und Ostsee wurden im Meilensteinbericht M104a-4 abgehandelt (Ganske 2019a). Der Bericht enthält Auswertungen für alle verfügbaren Realisierungen der drei Szenarien (*Weiter-wie-bisher*, *moderat* und *Klimaschutz*), die mit den Ozean-Atmosphäre-Modellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 durchgeführt wurden (vgl. Tabelle 9-2).

An dieser Stelle werden in erster Linie Ergebnisse für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* präsentiert. Darüber hinaus liegt der Fokus auf der Entwicklung extremer Windgeschwindigkeiten, die u. a. für den Küstenschutz Relevanz haben. Da beide Modelle die landläufig mit Stürmen assoziierten Windgeschwindigkeiten erheblich unterschätzen (M104a-2, Ganske 2019b), sind realistische Sturmschwellwerte – etwa auf Basis der Beaufortskala – nicht geeignet, um Sturmhäufigkeiten aus den Datensätzen abzuleiten. Stattdessen werden hier Modellwindgeschwindigkeiten betrachtet, die das 98. Perzentil der Geschwindigkeitsverteilungen erreichen oder überschreiten. Auch im Rahmen der Analyse der atmosphärischen Zirkulation über der Nordsee wird das 98. Perzentil verwendet, allerdings als Klassengrenze zwischen „Stürme“ und „schweren Stürmen“ (vgl.

Kap. 5.1.2). Dass im klimatologischen Jahresmittel an etwa 7 Tagen ($7/365 \approx 2\%$) Stürme zu Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste führen (S. Müller-Navarra, pers. Mitteilung), scheint das 98. Perzentil als Untergrenze für extreme Windgeschwindigkeiten zu plausibilisieren, wobei natürlich nicht notwendig alle Sturmfluten verursachenden Stürme dem höchsten 2 %-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung zuzurechnen sind. Die Verwendung des 2 %-Quantils ist ein pragmatischer Ansatz für die nachstehende Untersuchung von Änderungen im rechten Rand regionaler Windgeschwindigkeitsverteilungen in Nord- und Ostseegebieten im Rahmen des Klimawandels. Natürlich unterscheiden sich die Gebiete sturmklimatologisch; die tatsächlichen (gegenwärtigen) Sturmquantile sind jedoch nicht hinreichend bekannt, geschweige denn modellierbar. Deshalb verbietet es sich grundsätzlich, das 2 %-Quantil als (relative) Sturmhäufigkeit zu interpretieren.

5.1.1.1 Windgeschwindigkeit in Nord- und Ostseeregionen

Für die Nord- und Ostseeregionen (Abbildung 5-1) wurden die stündlichen Geschwindigkeitsbeträge der lokalen Windvektoren über die zur jeweiligen Region gehörigen Modellgitterpunkte gemittelt. Die räumliche Mittelung wurde für alle Stundenwerte im Zeitraum 1961–2009 durchgeführt. Aus jährlichen empirischen Häufigkeitsverteilungen (bzw. durch aufsteigende Sortierung der stündlichen regionalen Windgeschwindigkeiten eines Jahres) wurden die zum 98. Perzentil gehörige Geschwindigkeit (P98-Windgeschwindigkeit) für jedes Jahr abgeleitet, um die Entwicklung im Zeitraum 1961–2009 zu beschreiben.

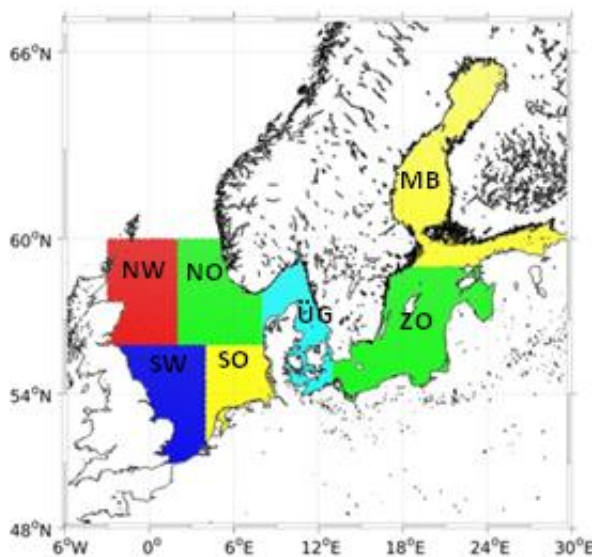


Abbildung 5-1: Teilgebiete der Nordsee (NW = NordWest, NO = NordOst, SW = SüdWest, SO = SüdOst) und Ostsee (ÜG = Übergangsgebiet, ZO = Zentrale Ostsee, MB = Meerbusen), für die regionale Mittelwerte bestimmt wurden.

Exemplarisch ist diese Entwicklung für die südöstliche Nordsee (SO) auf Basis von 8 Szenarienrechnungen im *Weiter-nie-bisher-Szenario* in Abbildung 5-2 dargestellt. Alle Zeitreihen zeigen eine erhebliche zwischenjährige Variabilität; die Standardabweichung der P98-Geschwindigkeiten vom Langzeitmittel liegt bei etwa $\pm 0,5$ m/s. Der Anstieg der Trendlinien ist für 6 der 8 Läufe positiv und liegt ebenfalls bei $\sim 0,5$ m/s über den Gesamtzeitraum. Lediglich die 4 steilsten Anstiege sind signifikant (nach Mann-Kendall-Test). Obgleich die P98-Geschwindigkeiten auch in den anderen Regionen tendenziell ansteigen, ergaben sich mehrheitlich signifikante Trends lediglich für die zentrale (ZO, 5 von 8) und nördliche Ostsee (MB, 7 von 8). Nur 25 % der Zeitserien (alle Regionen) zeigten negative Tendenzen, die sich in nur 2 Fällen als signifikant erwiesen (Ganske 2019a).

Um extreme stündliche Windgeschwindigkeiten auf klimatologischen Zeitskalen zu vergleichen, werden anstatt jährlicher P98-Geschwindigkeiten solche für die 30-jährigen Zeitscheiben 1971–2000 (*Bezugszeitraum*), 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2070–2099 (*ferne Zukunft*) betrachtet (Abbildung 5-3). Die Änderungen der klimatologischen Geschwindigkeiten in der *fernen Zukunft* belegen die aus der Zeitreihenanalyse abgeleiteten

Erkenntnisse. Außer in der nördlichen Nordsee (NO und NW) nehmen die klimatologischen Geschwindigkeiten zu. Die Änderungen sind jedoch häufig so gering, dass sie sich nicht signifikant von der natürlichen Variabilität abheben. Dies gilt erst recht für Änderungen der klimatologischen P98-Geschwindigkeiten in der *nahen Zukunft* sowie für analog durchgeführte Analysen von Projektionen der gleichen Modelle für das *moderate* und das *Klimaschutzszenario* (Ganske 2019a).

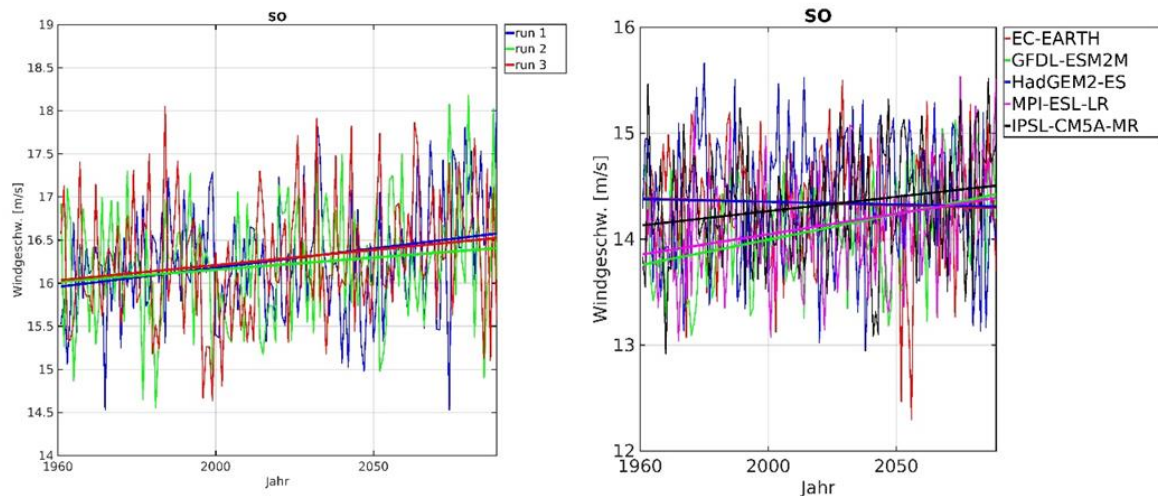


Abbildung 5-2: Zeitreihen des 98. Perzils jährlicher Häufigkeitsverteilungen der Gebietsmittelwerte stündlicher Windgeschwindigkeiten in der südöstlichen Nordsee (SO) im *Weiter-nie-bisher-Szenario*. Die Ergebnisse beruhen auf 3 Realisierungen mit MPI-OM/REMO (links) und 5 Realisierungen mit NEMO/RCA4 mit verschiedenen GCM-Antrieben (General Circulation Model) (rechts). Dick: Trendlinien.

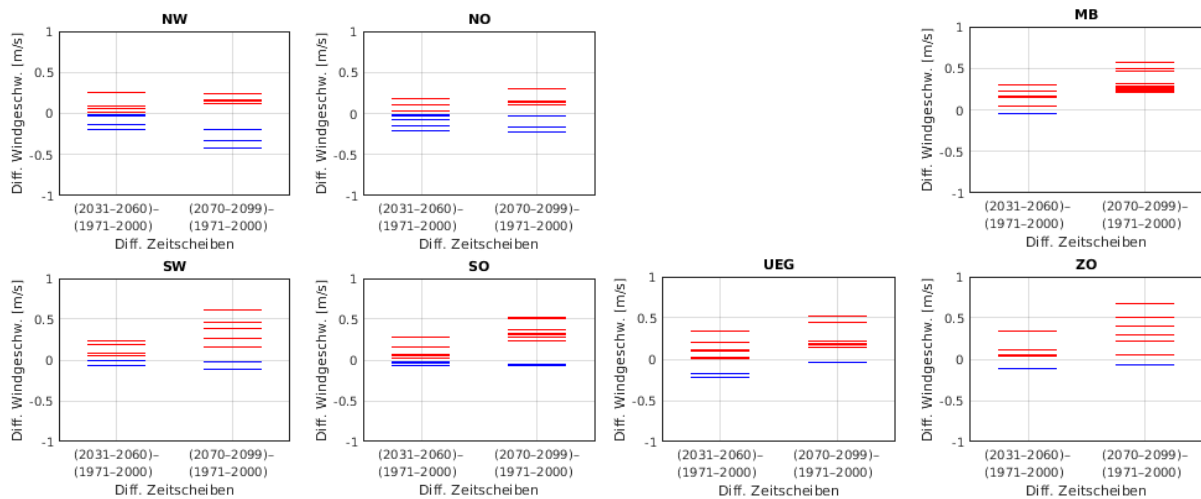


Abbildung 5-3: Abweichung der stündlichen regionalen P98-Windgeschwindigkeit in der *nahen* (jeweils links) und *fernen Zukunft* (rechts) von derjenigen im *Bezugszeitraum* (1971–2000) für die in Abbildung 5-1 dargestellten Nord- und Ostseeregionen. Ausgewertet wurden 8 Realisierungen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* mit den Klimamodellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4. Positive Differenzen sind in rot und negative Differenzen in blau dargestellt.

Eine tendenzielle Zunahme der P98-Geschwindigkeit um $\sim 0,5$ m/s oder ~ 2 km/h in der *fernen Zukunft* des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* gegenüber ~ 16 m/s oder ~ 58 km/h im *Bezugszeitraum* (vgl. Abbildung 5-2, Abbildung 5-3) entspricht einem geringen Anstieg um $\sim 3\%$. Ein Anstieg der P98-Geschwindigkeit beinhaltet eine Rechtsverbreiterung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung, sodass die gegenwärtige P98-Geschwin-

digkeit künftig nicht nur häufiger erreicht und überschritten werden muss, sondern auch, dass es zu extremeren Überschreitungen kommen muss als gegenwärtig. Wir beschränken uns hier darauf, die Änderungen der Häufigkeit der stündlichen Extremwindgeschwindigkeiten für die Zeitscheiben *nabe Zukunft* und *ferne Zukunft* gegenüber derjenigen für den *Bezugszeitraum* zu quantifizieren.

Im Gegenwartsklima beträgt die klimatologische relative Häufigkeit der stündlichen Windgeschwindigkeiten, welche die P98-Geschwindigkeit erreichen oder überschreiten, definitionsgemäß 2 %; die klimatologische absolute Häufigkeit beträgt demnach etwa 175 h/Jahr. Die gegenwärtige P98-Geschwindigkeit dient auch für die Zukunftsklimata als Schwellwert zur Bestimmung der künftigen Häufigkeiten. Dazu werden die stündlichen Geschwindigkeiten der Zukunftszeitreihen zunächst aufsteigend sortiert, um festzustellen in welchem Verhältnis der Schwellwert die beiden Datensätze aufteilt bzw. welchem Perzentil der Schwellwert in den Zukunftszeitreihen entspricht. Eine Aufteilung 96:4, beispielsweise, entspräche einer Verdoppelung der stündlichen Extremwindgeschwindigkeiten von 2 auf 4 % oder 350 h/Jahr im klimatologischen Jahresmittel. Die Ergebnisse der Analyse der 8 Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* sind für die 7 Regionen als Differenzen der klimatologischen Jahresmittel „Zukunft“ minus „Gegenwart“ in Abbildung 5-4 zusammengefasst.

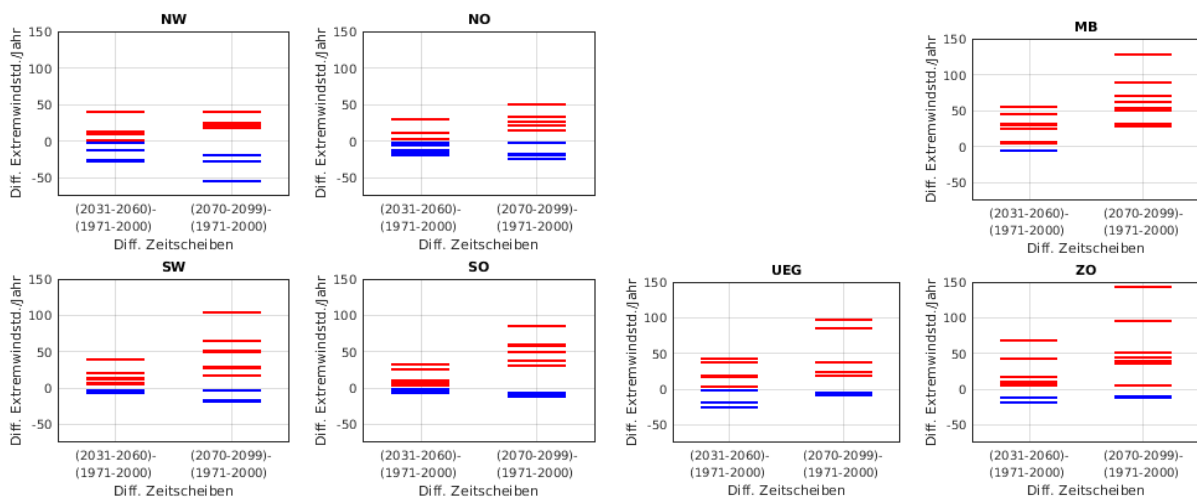


Abbildung 5-4: Abweichung der klimatologischen Anzahl von Extremwindstunden pro Jahr in der *naben* (jeweils links) und *fernen Zukunft* (rechts) von derjenigen im *Bezugszeitraum* (1971–2000) für die in Abbildung 5-1 dargestellten Nord- und Ostseeregionen. Eine stündliche Windgeschwindigkeit zählt als Extremwindstunde, wenn sie die für den Beobachtungszeitraum bestimmte P98-Schwellwertgeschwindigkeit erreicht oder überschreitet. Ausgewertet wurden 8 Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* mit den Klimamodellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4. Positive Differenzen sind in rot und negative in blau dargestellt.

Erwartungsgemäß korrespondieren die regionalen Änderungen der Häufigkeiten der Extremwindstunden mit denen der stündlichen P98-Geschwindigkeiten (Abbildung 5-3), denn letztere wurden lediglich in eine anschaulichere Dimension transformiert, die einer Einschätzung ihrer Bedeutung besser zugänglich ist. Wie sich durch Vergleich beider Abbildungen leicht einsehen lässt, entspricht der geringe Anstieg der P98-Geschwindigkeit um $\sim 3\%$ immerhin einer Zunahme der jährlichen Extremwindstunden um ~ 100 h oder $\sim 60\%$. Im Übrigen ergeben sich aufgrund der Äquivalenz beider Darstellungen (Abbildung 5-3 vs. Abbildung 5-4) keine anderen oder zusätzlichen Schlussfolgerungen als diejenigen, die bereits im Rahmen der Diskussion der P98-Geschwindigkeiten gezogen wurden. So ergeben sich entsprechend geringere Änderungen der Häufigkeiten der Extremwindstunden für analog durchgeführte Analysen der *moderaten* und *Klimaschutz* Projektionen der gleichen Modelle, vgl. Ganske (2019a).

5.1.1.2 Effektiver Wind bei Cuxhaven und Potentielle Sturmflut

Zwischen der Häufigkeit, Stärke und Andauer von Extremwindereignissen und Sturmfluten besteht ein enger Zusammenhang. Die genannten Qualitäten und ihre aus Szenarienrechnungen abgeleiteten möglichen Änderungen werden für solche Extremwindereignisse bei Cuxhaven untersucht, die Sturmfluten auslösen können. Diese potenten Extremwindereignisse werden hier als Potentielle Sturmfluten bezeichnet.

Die Wirkung des Windes auf den Wasserstand in einem Küstenabschnitt ist dann am stärksten bzw. effektivsten, wenn er orthogonal zur Küstenlinie steht. Diese effektive Windrichtung wurde von Müller-Navarra und Giese (1999) anhand von Regressionsbeziehungen zwischen gleichzeitig beobachteten Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und Wasserständen für die niedersächsische und schleswig-holsteinische Küste sowie für Cuxhaven bestimmt. Der effektive Wind lässt sich für alle Winde angeben. Wind ist ein Vektor, dessen Richtung und Länge (bzw. Geschwindigkeit) üblicherweise durch zonale und meridionale Komponenten bestimmt sind. Der gleiche Windvektor lässt sich in einem gedrehten Koordinatensystem durch Komponenten darstellen, die parallel bzw. orthogonal zur Küstenlinie stehen. Die Orthogonalkomponente heißt effektiver Wind; die zugehörige effektive Windgeschwindigkeit ist betraglich stets kleiner als die des Windvektors (sofern die Parallelkomponente des Windvektors ungleich Null ist).

Eine Untersuchung historischer Sturmfluten ergab, dass schwere Sturmfluten in Cuxhaven immer auch an der Niedersächsischen und der Schleswig-Holsteinischen Küste auflaufen (Gerber et al. 2016), weshalb die Windbedingungen für Potentielle Sturmfluten hier nur für Cuxhaven analysiert wurden (Ganske 2019b). Vergleiche von effektiven Windgeschwindigkeiten mit Wasserständen haben gezeigt, dass Sturmfluten erst dann entstehen, wenn die effektive Windgeschwindigkeit einen Schwellwert für mindestens 10 Stunden überschreitet (Ganske et al. 2018). Als Schwellwert wurde für MPI-OM/REMO 13,8 m/s und für NEMO/RCA4 12 m/s festgelegt. Die Schwellwerte entsprechen dem 98. Perzentil der stündlichen effektiven Windgeschwindigkeiten bei Cuxhaven im Zeitraum 1961–2000 auf Basis der 3 bzw. 5 historischen Läufe der beiden Modelle (Ganske 2019b). Sind die genannten Anforderungen erfüllt, liegt ein Extremwindereignis mit Sturmflutpotential bzw. eine Potentielle Sturmflut vor.

Für einen „nassen“ Gitterpunkt bei Cuxhaven wurden zunächst die stündlichen effektiven Windgeschwindigkeiten im Gesamtzeitraum 1961–2009 für die 8 Realisierungen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* berechnet. Als effektive Windrichtung wurde 295° angenommen (nach Müller-Navarra und Giese 1999). Anschließend wurden auf Basis des Schwellwert- und Andauerkriteriums Potentielle Sturmflutereignisse identifiziert. Für jedes Ereignis wurden Andauer und höchste effektive Windgeschwindigkeit protokolliert. Für die drei Zeitscheiben *Bezugszeitraum*, *nabe* und *ferne Zukunft* wurden Andauer und effektive Höchstwindgeschwindigkeit über alle Ereignisse gemittelt. Die klimatologische Anzahl Potentieller Sturmflutereignisse pro Jahr ist die durch 30 dividierte Anzahl aller in der jeweiligen Zeitscheibe identifizierten Ereignisse. Die Änderungen der Mittelwerte der drei Parameter in der *nahen* und *fernen Zukunft* gegenüber dem *Bezugszeitraum* sind in Abbildung 5-5 zusammengefasst.

Die Differenzen der Zeitscheibenmittelwerte für Andauer und effektive Höchstwindgeschwindigkeit erwiesen sich als uneinheitlich im Vorzeichen (Abbildung 5-5). Das Ensemblemittel (der Differenzen) über die 8 analysierten Realisierungen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* geht für beide Parameter gegen Null. Für die Anzahl der Potentiellen Sturmflutereignisse pro Jahr liefern die Simulationen mehrheitlich eine Zunahme gegenüber dem Referenzzeitraum, die sich im Ensemblemittel auf 0,2 (*nabe Zukunft*) bzw. 0,3 (*ferne Zukunft*) beläuft. Die zeitliche Entwicklung der jährlichen Parameter im Gesamtzeitraum 1961–2009 erwies sich in nahezu allen Realisierungen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* als (linear) trendfrei (diese Aussage gilt gleichermaßen für hier nicht diskutierte Realisierungen des *moderaten* und des *Klimaschutzszenarios*). Signifikante Änderungen in Andauer, effektiver Höchstwindgeschwindigkeit und der Häufigkeit Potentieller Sturmflutereignisse konnten auf Basis der verfügbaren Szenarienrechnungen und der verwendeten Methoden weder für die *nabe* noch für die *ferne Zukunft* an diesem Gitterpunkt festgestellt werden.

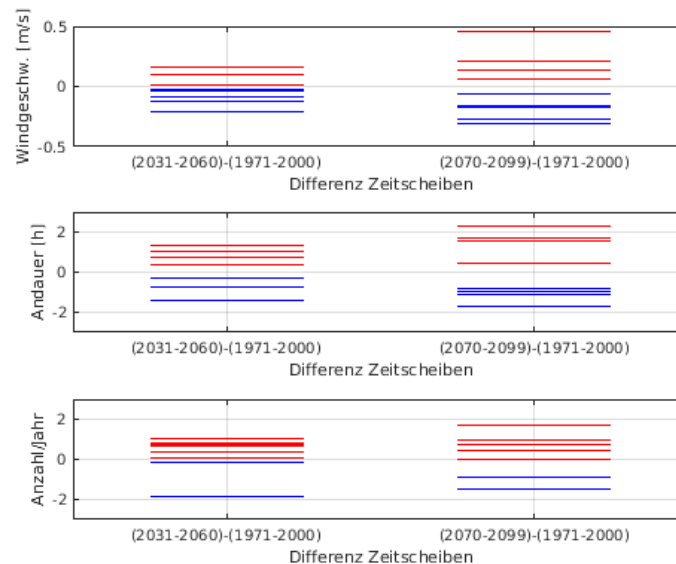


Abbildung 5-5: Differenzen (*nabe* (links) bzw. *ferne Zukunft* (rechts) minus *Bezugszeitraum*) der klimatologischen Mittel für die Anzahl Potentieller Sturmflutereignisse bei Cuxhaven (unten), deren Andauer (Mitte) sowie die dabei eingetretene effektive Höchstwindgeschwindigkeit (oben). Die Ergebnisse beruhen auf 8 Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* mit den gekoppelten Klimamodellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4. Positive Differenzen sind in rot und negative in blau dargestellt.

5.1.2 Wetterlagen und Stürme über der Nordsee

- Die Wetterlage „Nordwest“ wird in Zukunft im *Weiter-wie-bisher-Szenario* signifikant häufiger auftreten, wobei dies vor allem durch eine höhere Anzahl an Episoden und nicht über die Andauer zu erklären ist. Die Wetterlage „Südost“ nimmt sowohl in der Anzahl der Episoden, als auch in dem mittleren Andauern ab. Auch das mittlere Andauern der Wetterlage „Zyklonal“ wird abnehmen. Für die Wetterlage „Nordost“ ergibt sich ein leichter Rückgang der Anzahl der Episoden. Für die Wetterlagen „Antizyklonal“ und „Südwest“ lassen sich keine eindeutigen Aussagen treffen.
- Im Rahmen der Wetterlagenanalyse wurden für die Nordseeregion Stürme identifiziert und nach Stärke klassifiziert: Sturm (G), starker Sturm (SG) und sehr starker Sturm (VSG). Auf Basis von 8 verfügbaren *Weiter-wie-bisher* Realisierungen und den drei genannten Sturmklassen wurden für die Zeitscheibe *ferne Zukunft* in insgesamt 18 von 24 Fällen höhere relative Häufigkeiten festgestellt. Davon entfielen 5, 6 und 7 auf die Klassen G, SG und VSG. Für die Zeitreihen jährlicher relativer Häufigkeiten der Sturmklassen von 1961–2099 ergaben sich in 8 von 24 Fällen signifikant positive Trends, die mit den stärksten Anstiegen im Zeitscheibenvergleich assoziiert sind. Weitergehende statistische Analysen sind erforderlich und geplant.

Da die Wetterlagenklassifizierung auf der Analyse von Luftdruckfeldern im Meeresniveau (SLP) beruht, wurden diese zunächst für die regional gekoppelten Modelle NEMO/RCA4 und MPI-OM/REMO mit Hilfe von Reanalysen, der BNSC und Messdaten validiert. Für NEMO/RCA4 stimmen die SLP-Felder sehr gut mit den Referenzdatensätzen überein. Die MPI-OM/REMO SLP-Felder hingegen zeigen leichte negative Abweichungen zu den Referenzdatensätzen in der gesamten Nord- und Ostseeregion. Da es sich um einen relativ konstanten Offset über dem Gesamtgebiet handelt, werden dennoch die Hoch- und Tiefdruckgebiete und deren Laufbahnen ausreichend gut abgebildet. Genauere Informationen zur Validierung sind im Meilensteinbericht M108a-2 (Ganske et al. 2019) zu finden.

5.1.2.1 Wetterlagen-Klassifizierungsverfahren

Eine integrale Beschreibung der regionalen atmosphärischen Zirkulation ist mithilfe definierter Zirkulationsmuster oder Wetterlagen möglich (Lamb 1950). Am BSH wird dazu im Rahmen der Analysen des Nordseezustands das von Jenkinson und Collison (1977) zur Objektivierung der „Lamb Weather Types“ entwickelte automatische Klassifizierungsverfahren verwendet (Loewe et al. 2005). Dieses Verfahren wurde auch für die nachstehenden Untersuchungen verwendet, die sich vorerst auf das *Weiter-nie-bisher-Szenario* beschränken.

Das Verfahren besteht in der Auswertung von Luftdruckfeldern im Meeresniveau an 16 Gitterpunkten im weiteren Nordseeraum, die zur Bestimmung repräsentativer Indizes für Wind und Wirbelstärke herangezogen werden. Aus Relationen zwischen diesen Indizes lassen sich Wetterlage und Sturmstärke ableiten. Während das Klassifizierungsverfahren originär 27 verschiedene Wetterlagen zulässt, wurde hier mit einem auf 6 Wetterlagen reduzierten Set gearbeitet (Loewe 2009). Diese 6 charakteristischen Wetterlagen sind: Antizyklonal (A), Zyklonal (C), Nordost (NE), Nordwest (NW), Südost (SE), Südwest (SW).

5.1.2.2 Häufigkeitsanalyse für zwei gekoppelte Klimamodelle

In Abbildung 5-6 sind die Jahresklimatologien für die relativen Häufigkeiten der Wetterlagen in 3 verschiedenen 30-Jahreszeiträumen (*Bezugszeitraum*, *nabe Zukunft*, *ferne Zukunft*) beispielhaft für einen Modelllauf (MPI-OM/REMO Lauf 3) dargestellt. Die Wetterlagen SW und A treten mit 26 % und 22 % in der Gegenwart am häufigsten auf, gefolgt von NW (16 %), C (16 %), SE (13 %) und NE (7 %). Diese Rangfolge ergibt sich auch für alle anderen Modellläufe. Die Rangfolge ändert sich auch zum Ende des Jahrhunderts nicht, obwohl die individuellen Häufigkeiten durchaus variieren.

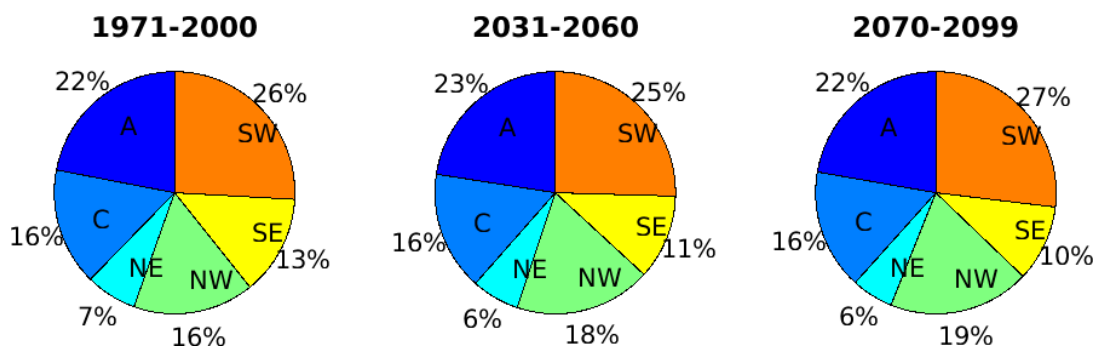


Abbildung 5-6: Jahresklimatologien der relativen Häufigkeiten der 6 Lamb-Wetterlagen-Klassen (A, C, NE, NW, SE, SW) in [%], beispielhaft für die Modellkopplung MPI-OM/REMO im Lauf 3 für den *Bezugszeitraum* (1971–2000), die *naben* (2031–2050) und *ferne Zukunft* (2070–2099) im *Weiter-nie-bisher-Szenario*.

In Abbildung 5-7 ist dargestellt, ob sich für die komplette Zeitreihe (1961–2099) der jährlichen relativen Häufigkeiten der Wetterlagen aus dem jeweiligen gekoppelten Modelllauf (siehe Tabelle 9-2) ein Trend ergab. Die Vorzeichen geben an, ob es sich um einen positiven oder negativen Trend handelt.

Für die Zeitreihen aus beiden Modellfamilien wurde meist ein positiver Trend der NW Wetterlage und ein negativer Trend der SE Wetterlage ermittelt. Der signifikant positive Trend der NW Wetterlage ist in 6 der 8 verfügbaren Läufe zu erkennen und ein signifikant negativer Trend für die SE Wetterlage in 5 von 8 verfügbaren Läufen. In den anderen Wetterlagen sind keine über die Läufe identischen Trends zu erkennen. Die Modellläufe zeigen im *Weiter-nie-bisher-Szenario* für die Wetterlage NW für die *ferne Zukunft* (2070–2099) einen relativen Anstieg der relativen Häufigkeit von 7-30 % gegenüber der relativen Häufigkeit im *Bezugszeitraum* (1971–2000). Für die Wetterlagen SE ergibt sich eine relative Abnahme der relativen Häufigkeit von -13 bis -35 %.

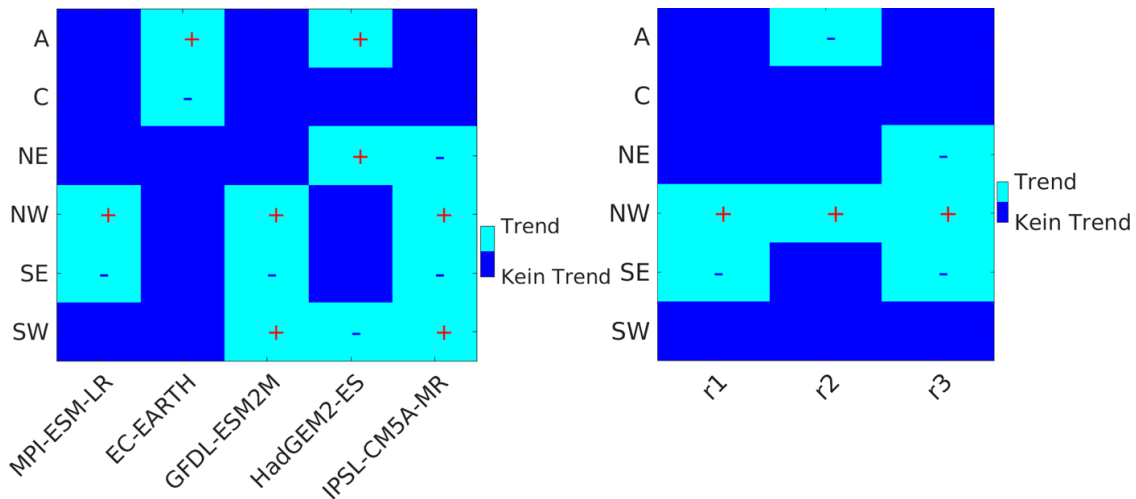


Abbildung 5-7: Trendanalyse der jährlichen relativen Häufigkeiten der 6 verschiedenen Wetterlagen (A, C, NE, NW, SE, SW) über den gesamten Zeitraum von 1961–2009 für die fünf NEMO/RCA4 (links) und die drei MPI-OM/REMO (rechts) Läufe aus Tabelle 9-2 (Anhang) im Weiter-wie-bisher-Szenario. In türkis sind die Wetterlagen dargestellt, für die sich ein signifikanter Trend ergab (Mann-Kendall-Test mit 5 % Signifikanzgrenze). Die Vorzeichen zeigen, ob es sich um einen positiven (+) oder einen negativen (-) Trend handelt.

5.1.2.3 Episoden und Andauern

Für den Einfluss auf ein Untersuchungsgebiet ist nicht nur die Häufigkeit von Wetterlagen interessant, sondern auch deren Andauer (Loewe et al. 2013). Beispielsweise entsteht bei einer regenreichen Wetterlage, die lange andauert, auch ein deutlich erhöhter Abfluss. Das mittlere Andauern oder Lebensdauer einer Wetterlage W ist das Verhältnis der Gesamthäufigkeit von W (in Tagen) zur Gesamtanzahl der W -Episoden. Letztere sind zeitdiskrete Folgen oder Sequenzen von W -Tagen, die andersartige Wetterlagen ablösen oder durch solche abgelöst werden. Für beide Modellfamilien lieferten fast alle Läufe das längste mittlere Andauern für die SW-Wetterlage. Die mittlere Dauer der südlichen Anströmungen (SE, SW) und der antizyklonalen Wetterlage (A) liegen oberhalb von 2 Tagen, diejenigen der nördlichen Anströmungen (NW, NE) und der zyklonalen Wetterlage (C) unter 2 Tagen. Für 4 der 8 verfügbaren Läufe ergaben sich signifikante negative Trends sowohl für das mittlere Andauern der SE-Wetterlagen als auch der C-Wetterlagen. Die mittlere Dauer dieser Wetterlagen wird sich demnach bis zum Ende des Jahrhunderts verkürzen. Detailliertere Informationen sind dem Meilensteinbericht M108b-2 (Jensen 2019) zu entnehmen.

5.1.2.4 Stürme: Klassen und Häufigkeiten

Die extremen Windereignisse werden in den untersuchten Klimamodellen schlecht abgebildet (siehe Abschnitt 5.1.1). Die simulierten Windgeschwindigkeiten unterschätzen die mit Stürmen assoziierten Windstärken der Beaufortskala erheblich. Deshalb wurde im Rahmen des Meilensteines M108c „Veränderung in extremen Windereignissen“ das von Jenkinson und Collison (1977) vorgeschlagene Sturmidentifizierungs- und -klassifizierungsverfahren angewendet, welches auf der oben genannten Wetterlagenklassifizierung basiert. Dabei ergibt sich der für die Nordseeregion repräsentative Sturmindex G^* über eine elliptische Beziehung zwischen Windindex V^* und Wirbelstärke (Vorticity) ζ^* :

$$G^* = \sqrt{V^{*2} + \frac{\zeta^{*2}}{4}}$$

Die Klassen *NUL* (No Gale, kein Sturm), *G* (Gale, Sturm), *SG* (Severe Gale, starker Sturm) und *VSG* (Very Severe Gale, sehr starker Sturm) sind im Gegenwartsklima (1971–2000) durch das 90., 98. und 99,73. Perzentil der G^* -Verteilung gegeneinander abgegrenzt (Loewe et al. 2013).

Die Schwellwerte für die einzelnen Sturmklassen wurden anhand dieser Perzentile für beide Regionalmodelle aus dem mit der Reanalyse ERA40 angetriebenen Validationslauf für den Zeitraum 1971–2000 bestimmt. Zur Veranschaulichung der Bedeutung der G^* -Schwellwertellipsen wurden die zugehörigen Halbachsen $V^*_{\max}=G^*$ und $\zeta^*_{\max}=2G^*$ in adäquate physikalische Einheiten umgerechnet (Tabelle 5-1). Diese Werte stellen die maximal möglichen Geschwindigkeiten bzw. Wirbelstärken dar für den Fall, dass der jeweils andere Index identisch Null ist. Natürlich ist das Sturmkriterium für alle (V^*, ζ^*) -Kombinationen erfüllt, die auf (oder außerhalb) der Schwellwertellipse liegen.

In Abbildung 5-8 ist die relative Änderung der relativen Häufigkeiten der jeweiligen Sturmkategorie als auf die relative Häufigkeit der Periode 1971–2000 bezogene Differenz zwischen der relativen Häufigkeit in der *fernen Zukunft* (2070–2099) und der relativen Häufigkeit im *Bezugszeitraum* für die zwei Modellfamilien wiedergegeben. Innerhalb der NEMO/RCA4 Modellfamilie zeigen 4 von 5 Modellen im *Weiter-nie-bis-her-Szenario* für sehr starke Stürme (VSG) am Ende des Jahrhunderts (2070–2099) einen Anstieg der relativen Häufigkeit von 18-139 % gegenüber dem *Bezugszeitraum*. Lediglich für HadGEM2-ES ergab sich eine Abnahme von 11 %. Die Läufe des Klimamodells MPI-OM/REMO weisen alle ebenfalls eine positive relative Änderung der relativen Häufigkeit der höchsten Sturmkategorie (VSG) von 56-163 % auf. Die höchste Sturmkategorie ist dadurch gekennzeichnet, dass sie im klimatologischen Mittel der Gegenwart einmal pro Jahr auftritt. Für die stärkste relative Erhöhung um 163 %, die im MPI-OM/REMO Lauf 3 realisiert wurde, erhöht sich diese Eintrittswahrscheinlichkeit sehr starker Stürme auf 2,63/Jahr. Eine relative Erhöhung der relativen Häufigkeit der höchsten Sturmkategorie (VSG) um 68 % (Ensemblemittel über alle 8 Läufe) entspricht einem Anstieg der Eintrittswahrscheinlichkeit auf 1,68/Jahr.

Tabelle 5-1: Schwellwerte für den Sturmindex G^* mit der dazugehörigen maximal möglichen Windgeschwindigkeit (V_{\max}) in m/s und der maximal möglichen Wirbelstärke (ζ_{\max}) in Umdrehungen pro Tag (UPT) für die Modellkopplungen NEMO/RCA4 (links) und MPI-OM/REMO (rechts) jeweils für den Zeitraum 1971–2000 im Validationslauf angetrieben mit ERA40.

NEMO/RCA4				MPI-OM/REMO			
Perzentil	G^* [hPa]	V_{\max} [m/s]	ζ_{\max} [UPT]	Perzentil	G^* [hPa]	V_{\max} [m/s]	ζ_{\max} [UPT]
90.	26,9	16,7	0,41	90.	28,1	17,4	0,43
98.	33,8	21,0	0,51	98.	36,7	22,8	0,56
99,73.	39,3	24,4	0,60	99,73.	46,1	28,6	0,70

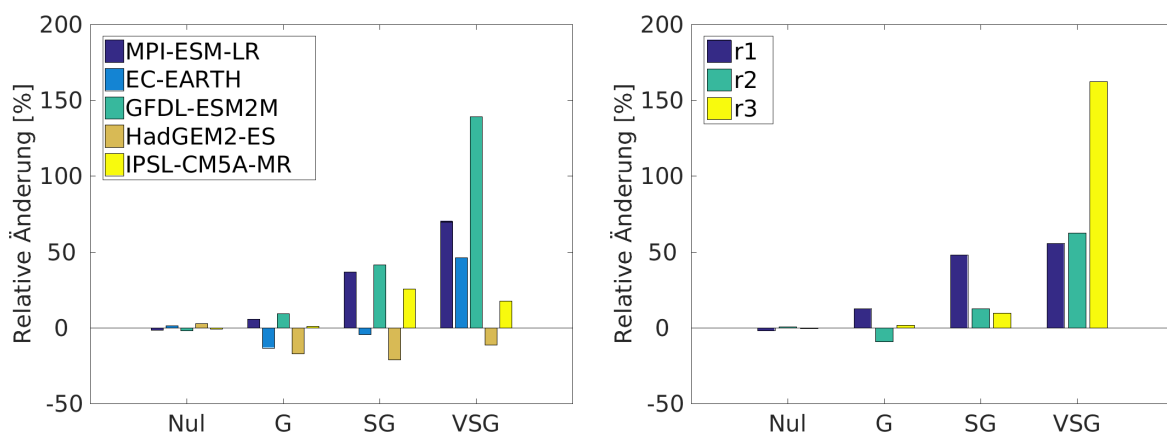


Abbildung 5-8: Änderung [%] der relativen Häufigkeit der Sturmklassen (NUL (kein Sturm), G (Sturm), SG (Starker Sturm), VSG (sehr starker Sturm)) von 1971–2000 zu 2070–2099 für die NEMO/RCA4 (links) und MPI-OM/REMO Läufe (rechts) im *Weiter-nie-bis-her-Szenario*. Die Farben kennzeichnen den Lauf des Modells. Eine positive Änderung bedeutet eine Zunahme der relativen Häufigkeit einer Sturmkategorie zum Ende des Jahrhunderts.

Hinsichtlich der Änderung der relativen Häufigkeit starker Stürme (SG) im Zeitscheibenvergleich (Abbildung 5-8) ergaben sich für 6 der 8 Realisierungen Anstiege zwischen 10 und 48 %. Neben EC-Earth projizierte HadGEM2-ES auch in dieser Klasse einen Abfall. Im Ensemblemittel erhöht sich die relative Häufigkeit bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit für starke Stürme von 1,7 % (6,3/Jahr) im *Bezugszeitraum* auf 2,1 % (7,5/Jahr) in der *fernen Zukunft*.

Für die vollständigen Zeitreihen der jährlichen relativen Häufigkeit sehr starker Stürme (VSG) ergab sich lediglich für zwei Läufe ein signifikant positiver Trend. Für starke Stürme (SG) wurde für 4 der 8 Zeitreihen ein signifikant positiver Trend festgestellt (Abbildung 5-9). Diese Trends sind mit den stärksten Änderungen der relativen Häufigkeit der Sturmklassen im Zeitscheibenvergleich assoziiert (Abbildung 5-8).

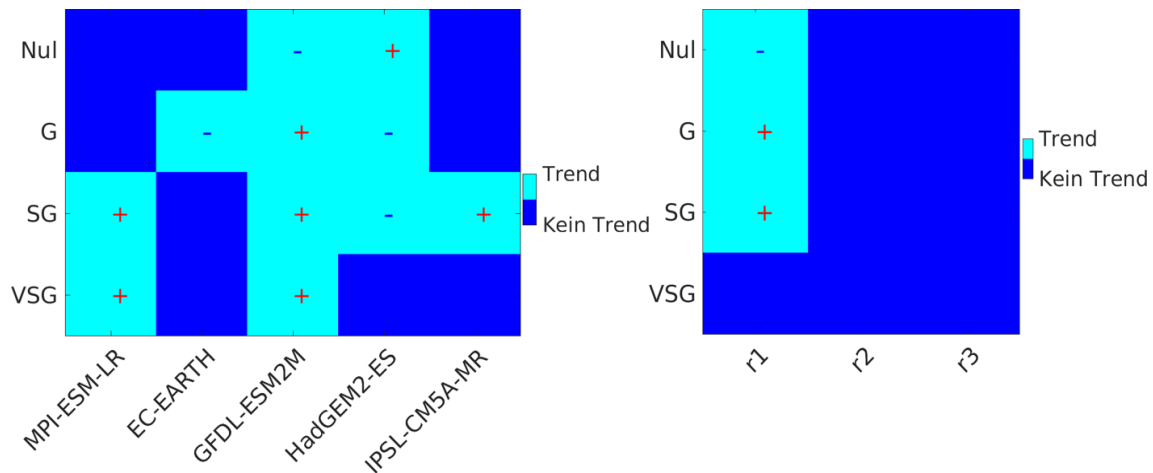


Abbildung 5-9: Trendanalyse der jährlichen relativen Häufigkeiten der Sturmklassen für den Zeitraum 1961–2099 aus Projektionen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* mit den Modellfamilien NEMO/RCA4 (links) und MPI-OM/REMO (rechts). In türkis sind die Sturmklassen dargestellt, für die sich ein signifikanter Trend ergibt (Mann-Kendall-Test mit 5 % Signifikanzgrenze). Die Vorzeichen zeigen, ob es sich um einen positiven (+) oder einen negativen (-) Trend handelt.

5.1.3 Tägliche Niederschlagssumme

- Vorläufige Untersuchungsergebnisse zur Extremwertanalyse von täglichen Niederschlagssummen im Einzugsgebiet des NOK für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* lassen vermuten, dass ein bisher 100-jähriges Ereignis in der *fernen Zukunft* deutlich häufiger (im Ensemblemittel einmal in 25 Jahren) eintreten könnte als im *Bezugszeitraum*.
- Die Unsicherheiten sind aber hoch, da bisher nur eine Methode zur Anpassung der Extremwerte verwendet werden konnte und die Bandbreite der Modellergebnisse dabei groß ist. Aussagen für die *nabe Zukunft* lassen sich nicht treffen.

Die Validierung von Tageswerten des Niederschlags aus den gekoppelten Klimamodellen MPI-OM/REMO und NEMO/RCA4 mit COSMO-REA6 in den in Abbildung 5-1 dargestellten Teilgebieten der Nord- und Ostsee, sowie mit REGNIE im Einzugsgebiet des NOK hat ergeben, dass höhere Perzentile von den gekoppelten Modellen entweder deutlich überschätzt oder deutlich unterschätzt werden (siehe Meilenstein M108a-2, Ganske et al. 2019). Somit können immer nur relative Änderungen in den einzelnen Modellläufen, also z. B. Änderungen von Wiederkehrperioden bezogen auf den jeweiligen Modelllauf, betrachtet werden. Abgeleitete Indizes aus den Tageswerten, wie der kumulierte 30-tägige Vorfeuchteindex (API), liefern im Einzugsgebiet NOK gute Übereinstimmungen für die Gegenwart (siehe auch Kapitel 5.4.2).

Neben den bzw. auch aufgrund der angesprochenen Unterschiede in den Modelldaten lieferte die Anpassung von Extremwertverteilungen uneinheitliche Ergebnisse hinsichtlich der Eigenschaften des äußersten Endes der Niederschlagsverteilungen (schwer, leicht, nach oben begrenzt). Die Ergebnisse erwiesen sich als abhängig von der Analysemethodik (Blockmaxima oder Peak-Over-Threshold), vom Parameterschätzverfahren und von der Länge des analysierten Zeitraums.

5.1.3.1 Änderung von Extremen im Einzugsgebiet des NOK

Nachstehend werden vorläufige Ergebnisse zu den Änderungen von Wiederkehrzeiten extremer Niederschläge präsentiert. Diese basieren auf der Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung an die Niederschlagsmaxima im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) für 30-jährige Zeitabschnitte. Das Winterhalbjahr als Block wurde deshalb gewählt, weil die Entwässerung der Küstengebiete besonders in diesem Zeitraum problematisch sein kann und die meisten Hochwasser (30 % im Januar, 15 % im Februar) in der Mitte dieses Zeitraums auftreten (pers. Kommunikation T. Hirschhäuser).

Für das Einzugsgebiet des NOK sind die Änderungen der 100-jährigen Wiederkehrperiode extremer Niederschlagstagesummen im hydrologischen Winterhalbjahr in Abbildung 5-10a auf Basis gleitender 30-jähriger Zeitscheiben im Zeitraum 1961–2099 dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der individuell analysierten 8 Projektionen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* zu Ensemblemitteln und Kompositmaxima bzw. -minima aggregiert. Das Ensemblemittel für ein anfänglich 100-jähriges Ereignis erreicht am Ende des 21. Jahrhunderts eine Wiederkehrzeit von 25 Jahren (Abbildung 5-10a). Ein Jahrhundertereignis wäre demnach in der *fernen Zukunft* einmal in 25 Jahren zu erwarten.

Allerdings variieren die Wiederkehrzeiten zum Ende des Jahrhunderts zwischen 2 und 35 Jahren. Auch ist die Bestimmung von 100-jährigen Wiederkehrwerten auf Basis 30-jähriger Stichproben problematisch. Aufgrund der relativ geringen Wahrscheinlichkeit, dass solche Stichproben überhaupt ein derart seltenes oder selteneres Ereignis enthalten, beruht die Abschätzung derart langer Wiederkehrzeiten auf Extrapolationen in äußere Bereiche der Verteilung, für die bei der GEV Anpassung keinerlei Stützpunkte verfügbar sind. Dementsprechend sind die Unsicherheiten hoch.

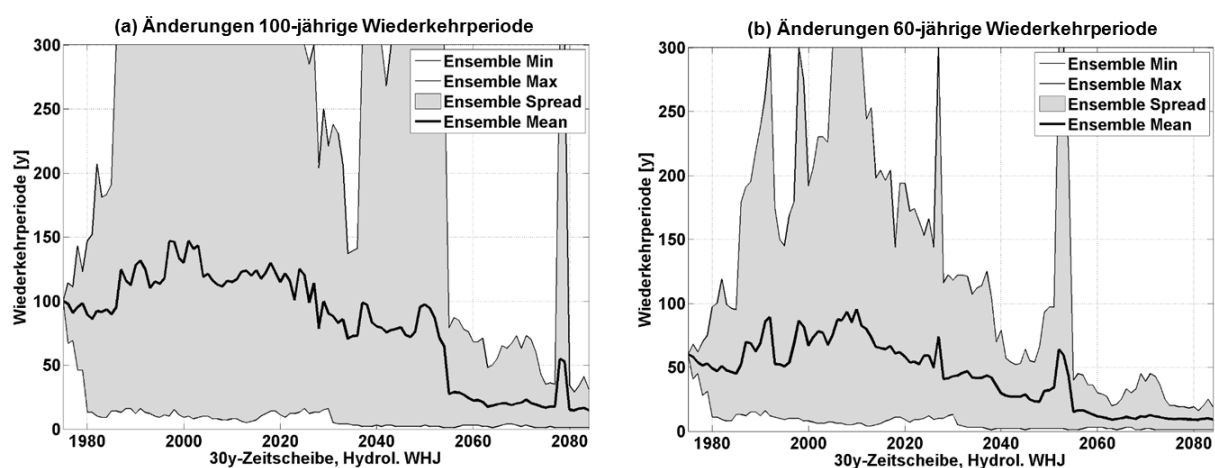


Abbildung 5-10: Änderungen der (a) 100-jährigen und (b) 60-jährigen Wiederkehrperiode extremer Niederschlagstagesummen im Einzugsgebiet des NOK auf Basis von GEV Verteilungen für gleitende 30-Jahreszeiträume und 8 individuell analysierten Projektionen des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* mit den gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen MPI-OM/REMO (3) und NEMO/RCA4 (5). Die Allgemeinen Extremwertverteilungen wurden an die jeweiligen Maxima der hydrologischen Winterhalbjahre angepasst (Blockmaxima Methode).

Dieser Sachverhalt wird an der erheblich geringeren Bandbreite der Änderungen der 60-jährigen Wiederkehrperiode deutlich (Abbildung 5-10b). Die grundsätzlichen Entwicklungen der Ensemblemittel unter-

scheiden sich hingegen wenig. Beide Ereignisse treten bis ~2010 zunehmend seltener ein und werden anschließend zunehmend häufiger erwartet. Erst ab etwa ~2055 kommt es zu einer starken Verringerung der Bandbreite, in der das anfänglich Jahrhundert- bzw. 60-jährige Ereignis nicht mehr enthalten ist. Insofern weisen alle Realisierungen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* ab der Mitte des 21. Jahrhunderts auf ein häufigeres Auftreten von extremen Niederschlägen hin.

Grundsätzlich erschwert die hohe natürliche Variabilität des Niederschlags (BMVI-Expertenetzwerk 2020, Brien et al. 2020) die Detektion signifikanter Änderungssignale. Auch wenn höhere Lufttemperaturen in Zukunft bedeuten, dass die Atmosphäre mehr Wasserdampf enthalten kann, muss es nicht notwendigerweise heftiger regnen oder zu extremeren Extremniederschlägen kommen. Denn neben dem zur Verfügung stehenden Wasserdampfgehalt spielen die Schichtung der Atmosphäre (stabil / instabil) und der notwendige Vorrat an Kondensationskernen in der Luft bedeutende Rollen. Nur wenn sich genügend niederschlagsfähiges Wasser bilden kann, wird es auch ausfallen.

Tiefgreifendere Untersuchungen sind notwendig, um belastbare extremwertstatische Ergebnisse zu erzielen. Die bisherigen Analysen bestätigen anderswo dargestellte Probleme im Anwendungsbereich der klassischen Verfahren der Extremwertanalyse (z. B. Nikulin et al. 2011). Die dadurch motivierte andauernde Entwicklung neuer Verfahren und Methoden (z. B. Makkonen und Tikanmäki 2019) zeigt, dass es keinen extremwertstatistischen „Königsweg“ gibt (Kapitel 5.2.1). Insbesondere zum Zusammenhang Feuchte/Abfluss, sowie möglichen gemeinsamen Auftrittswahrscheinlichkeiten von erhöhtem Außenwasserstand und erhöhtem Abfluss können darum zurzeit keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Die Anwendung der Ergebnisse zur Entwässerung am NOK (Kapitel 5.4.1 und 5.4.2) auf andere Einzugsgebiete ist zudem nicht ausreichend verifizierbar, da lokale Gegebenheiten wie Bodenart, Versiegelungsgrad oder Lage, aber auch der lokale Anstieg des Meeresspiegels und ggf. Landhebungs- bzw. Senkungsprozesse einen großen Einfluss haben. Ferner müssen bereits vorliegende und in Planung befindliche Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden.

5.2 Änderungen ozeanographischer Parameter

5.2.1 Wasserstand/Meeresspiegel

- Die aktuellen globalen Meeresspiegelanstiegsszenarien projizieren eine wahrscheinliche Bandbreite des Meeresspiegelanstiegs von etwa 61-110 cm bis zum Ende des Jahrhunderts im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (IPCC 2019).
- Die Projektionen zur Entwicklung des globalen Meeresspiegels sind aber weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet, unter anderem aufgrund der bislang noch unzureichend erfassbaren Entwicklung der arktischen und antarktischen Eismassen. Dies betrifft vor allem die Abschätzung der oberen Grenze des Meeresspiegelanstiegs.
- Analysen der historischen Wasserstände bei Cuxhaven zeigen, dass sich seit der Mitte des 19. Jahrhunderts die Verteilung der Wasserstände nicht gleichmäßig ändert, sondern die hohen Wasserstände stärker angestiegen sind als die niedrigen Wasserstände. Diese ungleichmäßige Änderung konnte auch in einem Zukunftslauf eines global gekoppelten Klimamodells (MPI-OM/REMO im *Weiter-wie-bisher-Szenario* nachgewiesen werden.

Während für das vorige Jahrhundert etwa 50 % des Meeresspiegelanstiegs (Sea Level Rise (SLR)) auf die Dichteänderungen des Wassers im Ozean zurückzuführen sind, wurde dieser Effekt um etwa das Jahr 2005 herum durch die Änderungen der Eismassen als Haupttreiber des Anstiegs abgelöst (Slangen et al. 2017). Zurzeit sind die Beiträge der Landgletscher zum Meeresspiegelanstieg noch größer als die von Grönland und der Antarktis, da sie zumeist in wärmeren Klimazonen liegen (Gregory et al. 2013). Es wird erwartet,

dass in näherer Zukunft der Beitrag von Grönland und (in fernerer Zukunft) derjenige der Antarktis stärker ansteigen wird. Das verstärkte Abschmelzen der Eismassen wird zu einer Beschleunigung des SLR führen.

In der Nordsee lag der regionale SLR im 20. Jahrhundert bei etwa 1,7 mm/Jahr (Jensen et al. 2014) und damit etwas höher als für das globale Mittel. Dies ist hauptsächlich auf die isostatische Landsenkung im Bereich der Nordsee zurückzuführen. Der Wert von 1,7 mm/Jahr wurde in den eigenen Untersuchungen des Expertennetzwerks für Cuxhaven (die Pegelstation mit der am längsten zurückreichenden Zeitreihe ab 1843) bestätigt. Es zeigten sich dabei allerdings auch regionale Unterschiede in der Deutschen Bucht, die nicht nur auf unterschiedliche Landsenkungsraten, sondern teilweise auch durch lokale Besonderheiten (wie Baumaßnahmen ab den 1950er Jahren) erklärbar sind.

5.2.1.1 Szenarien des globalen Meeresspiegelanstiegs

Globale Klimamodelle sind in der Lage, den Effekt von Temperatur- und Salzgehaltsänderungen, der Ozeandynamik (beispielsweise veränderten Strömungen) und des hydrologischen Zyklus auf den SLR plausibel abzubilden (Kapitel 4.2). Allerdings können die Klimamodelle die Änderung der Eismassen sowohl an Land (Arktis und Antarktis) aufgrund der zu groben Auflösung und eines teilweise noch unzureichenden physikalischen Verständnisses nicht adäquat berechnen. Auch fehlt bei den globalen Modellen eine Kopplung zwischen Landeis, Ozean und Atmosphäre. Diese ist aber für eine realistische Modellierung der komplexen Eisdynamik nötig. Daher nutzt man zurzeit noch Abschätzungen aus regionalen, hoch aufgelösten Eismodellen, die dann auf globale Verhältnisse extrapoliert werden müssen. Die Unsicherheiten für diese Einflussfaktoren sind daher verhältnismäßig hoch und nach Carson et al. (2016) in etwa in der gleichen Größenordnung wie die oben erwähnten großen Unsicherheiten für die Ausgleichsbewegung der Erdkruste nach dem glazialen Maximum.

Gleichzeitig reagieren die Eismassen besonders sensitiv auf eine Erwärmung. Vor allem die über das antarktische Festland hinausragenden südlichen Eisschilde könnten in Zukunft einen sehr viel größeren Beitrag zum SLR liefern, da sie nicht nur von oben durch die wärmer werdende Atmosphäre, sondern in größerem Maßstab auch durch das wärmer werdende Ozeanwasser angetaut werden können. Damit wird deutlich, dass in den derzeitigen globalen Klimamodellen (beispielsweise aus CMIP5) die Unsicherheit gerade für den eisdynamischen Effekt besonders groß ist und von dem in Zukunft die größten Steigerungsraten zu erwarten sind. Dies erhöht die Bandbreite für Projektionen des Meeresspiegelanstiegs.

Um eine Bandbreite von Projektionen des SLR für die nächsten 100 Jahre zu erhalten, nutzt man

- verschiedene globale Klimamodelle,
- unterschiedliche RCP-Szenarien, die mit differierenden Annahmen zum künftigen CO₂-Ausstoß der Menschheit arbeiten und
- verschiedene oben erwähnte Abschätzungen der Eisdynamik.

Da der Meeresspiegelanstieg von der Temperatur der Atmosphäre sowie des Ozeans abhängt und beide sehr sensitiv auf den CO₂-Gehalt der Atmosphäre reagieren, zeigen sich für lange Zeitperioden die größten Unterschiede der Projektionen des SLR zwischen den verschiedenen RCP-Szenarien und den unterschiedlichen Abschätzungen der Eisdynamik. Für kürzere (dekadische) Zeitperioden liefert der Unterschied zwischen den einzelnen Modellen die größte Bandbreite. Tabelle 5-2 gibt einen Überblick neuerer Studien zum globalen SLR, teilweise sind die Unsicherheiten mit angegeben.

Tabelle 5-2: Zusammenstellung neuerer Studien zum projizierten globalen Meeresspiegelanstieg, die teilweise nicht nur den Median (50 %), sondern auch die Bandbreite des wahrscheinlichen (17-83 %) beziehungsweise sehr wahrscheinlichen Bereichs (5-95 %) angeben. Die angegebenen Studien sind im Anhang in der Literaturliste zu finden. Die jeweiligen RCP-Szenarien sind farblich markiert.

Szenario	Studie	Min	5 %	17 %	50 %	83 %	95 %	Max
RCP2.6	IPCC (2013) ^{a)}			0,26	0,40	0,55		
RCP2.6	IPCC (2013)			0,28	0,44	0,61		
RCP2.6	IPCC (2019)			0,29	0,43	0,59		
RCP4.5	IPCC (2013) ^{a)}			0,32	0,47	0,63		
RCP4.5	Carson et al. (2016) ^{c)}				0,54			
RCP4.5	IPCC (2019)			0,39	0,55	0,72		
RCP6.0	IPCC (2013) ^{a)}			0,34	0,48	0,64		
RCP8.5	IPCC (2013) ^{a)}			0,45	0,63	0,82		
RCP8.5	IPCC (2013)			0,52	0,73	0,98		
RCP8.5	Kopp et al. (2014)		0,52	0,62	0,79	1,00	1,21	
RCP8.5	Horton et al. (2014)		0,50	0,70		1,20	1,50	
RCP8.5	Carson et al. (2016) ^{c)}				0,71			
RCP8.5	Grinsted et al. (2015)		0,45	0,58	0,80	1,20	1,83	
RCP8.5	Le Bars et al. (2017)	0,96	1,21	1,46 ^{b)}	1,84	2,21 ^{b)}	2,47	2,73
RCP8.5	Le Bars et al. (2017)	0,71	1,04	1,36 ^{b)}	1,84	2,32 ^{b)}	2,65	2,98
RCP8.5	IPCC (2019)			0,61	0,84	1,10		
Kombination	Johansson et al. (2014)		0,26	0,41	0,72	1,18	1,55	

Projizierter globaler Anstieg des Meeresspiegels [in m] bis 2100 (von 2000)

^{a)} SLR nicht für 2000–2100, sondern für 20-Jahresperiode von 1981–2000 bis 2081–2100 berechnet

^{b)} abgeschätzt aus Verteilung

^{c)} SLR nicht für 2000–2100, sondern für 1986–2005 bis 2081–2100 berechnet

5.2.1.2 Szenarien für den regionalen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee

Der regionale Meeresspiegelanstieg in der Nordsee folgt grundsätzlich dem globalen SLR, kann sich aber von diesem aufgrund einiger Einflussfaktoren unterscheiden. Die Wichtigsten dieser Faktoren, die regional bedeutsam werden können, sind im Folgenden kurz aufgelistet.

- Der Gravitationseffekt der arktischen und antarktischen Eismassen zieht die Wassermassen in seinem Nahfeld (Größenordnung 1.000 km) an. Bei einem Abschmelzen dieser Eismassen verringert sich die Eigengravitation im Nahfeld und führt zu einem Sinken des Meeresspiegels, während weiter entfernt von diesen Eismassen der Meeresspiegel überproportional steigt. Dieser Gravitationseffekt wird in Tamisiea et al. (2010) näher beschrieben. Die Nordsee befindet sich im Nahfeld des grönländischen Eisschildes und im Fernfeld des antarktischen Eises und würde dementsprechend auf unterschiedliche Abschmelzraten dieser beiden Eisschilde auch unterschiedlich reagieren.
- Regionale vertikale Landbewegungen führen für einen Großteil der Nordsee zu einem stärkeren Meeresspiegelanstieg, siehe Kapitel 4.2.
- Auch eine veränderte Strömungsdynamik wie auch regionale Änderungen der Frischwasserflüsse und Temperaturen beeinflussen den regionalen Meeresspiegel.

Innerhalb des Expertennetzwerks wurden ausgehend von den globalen Projektionen des SLR (Tabelle 5-2) in Absprache mit der BAW für deren Sensitivitätsstudien für die Nordsee folgende Anstiegsraten für den SLR bis 2100 (ausgehend vom Jahr 2000) ausgewählt:

- basierend auf dem *moderaten Szenario* 50 cm SLR
- basierend auf dem *Weiter-nie-bisher-Szenario* 80 cm SLR
- basierend auf Grinsted et al. (2015) als *high-end-Szenario* 174 cm SLR

Die Sensitivitätsstudien der BAW haben zum Ziel, den Einfluss eines veränderten Meeresspiegels auf die Topographie und Meeresströmungen im Wattenmeer genauer zu analysieren und werden im Kapitel 5.3

beschrieben. Im Rahmen der Untersuchungen des Expertennetzwerks zu den Wasserständen in der Deutschen Bucht wurden nicht nur die Änderungsraten der mittleren Wasserstände bestimmt, sondern auch die Änderungsraten der verschiedenen Perzentile bzw. der sehr hohen (mit jährlicher bis zu 100-jährlicher Wiederkehrrate). Dabei zeigte sich, dass die Änderungsraten für die verschiedenen Perzentile teilweise deutlich voneinander abweichen. Es ändert sich also die Verteilung der Wasserstände insgesamt, zusätzlich zu dem mittleren Anstieg. Beispielhaft ist dies für den Pegel Cuxhaven durch Entwicklung des Niedrigwasserscheitelstandes für verschiedene Perzentile für die jeweiligen 30-jährigen Mittel dargestellt (Abbildung 5-11). Deutlich wird, dass etwa ab Mitte des vorigen Jahrhunderts das mittlere Niedrigwasser bis 2014 stagniert, während vor allem die hohen Perzentile weiter anstiegen. Dies ist unter anderem relevant für die Entwässerung der norddeutschen Tiefebene, da bei zu hohen Wasserständen das Entwässerungsfenster beispielsweise des NOK verkürzt wird.

Diese beobachtete Änderung der mittleren Wasserstände und deren Verteilung, ist auch in Projektionen des SLR sichtbar. Analysiert wurden stündliche Wasserstände im Lauf 1 des gekoppelten globalen Klimamodells MPI-OM/REMO (Mathis et al. 2018) im *Weiter-nie-bisher-Szenario*. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst: Dargestellt sind die mittlere Änderungsraten [in mm/Jahr] für ausgewählte Perzentile der Hochwasser- und Niedrigwasserscheitel am Pegel Cuxhaven. Die Trends, die signifikant (auf dem 5 % Testniveau) von dem mittleren Anstieg (etwa 4,4 mm/Jahr für den Zeitraum 1951–2100) abweichen, sind in rot hervorgehoben. Es wird klar, dass die sehr hohen und sehr niedrigen Perzentile signifikant höhere Anstiegsraten aufweisen als die mittleren Wasserstände. Auch die extremwertstatistischen Untersuchungen zeigen einen stärkeren Anstieg hoher Werte.

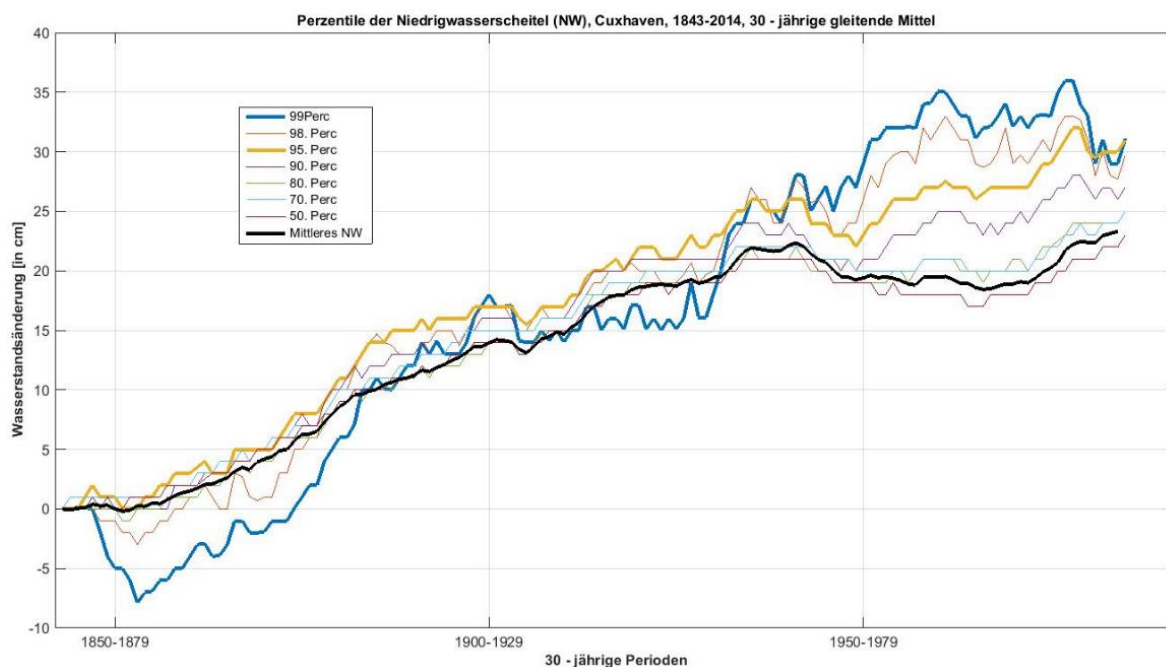


Abbildung 5-11: Entwicklung der Niedrigwasserstände am Pegel Cuxhaven für das mittlere Niedrigwasser und ausgewählte Perzentile (vom 50. bis zum 99. Perzentil) im Zeitraum von 1843–2014. Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel. Alle Werte wurden der besseren Vergleichbarkeit wegen für die erste 30-Jahreperiode (von 1843–1872) auf null gesetzt.

Wie schon erwähnt, stehen an der deutschen Nordseeküste langjährige Pegeldata der Wasserstände zur Verfügung, die teilweise bis in das Jahr 1843 zurückreichen (Pegelstandort Cuxhaven). Diese Pegeldata sind in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung vorhanden. Bis in das Jahr 1918 stehen nur Scheitelwerte der Hoch- und Niedrigwasser zur Verfügung. Danach gibt es für viele Pegel stündliche und später sogar minutliche Werte. Aufgrund der Länge von meist als 30 Jahren, können die Pegeldata für extremwertstatistische

Untersuchungen verwendet werden. So interessieren für den Küstenschutz v. a. die zu erwartenden extremsten Wasserstände. In Schleswig-Holstein wird beispielsweise der Bemessungswasserstand für die Landesschutzdeiche für das Wiederkehrintervall von $T = 200$ Jahren bestimmt, d. h. der Deich soll einem Hochwasserereignis, das durchschnittlich alle 200 Jahre eintritt, standhalten können.

Tabelle 5-4 zeigt exemplarisch für 1987–2016 die Höhe des 100-jährlichen Ereignisses über dem mittleren Hochwasser bzw. mittleren Niedrigwasser für den Nordseepegel in Cuxhaven. Als erstes lässt sich (im Mittel der verschiedenen Methoden) erkennen, dass die Änderungen des 100-jährigen Ereignisses für Niedrigwasser um knapp 50 cm höher ausfällt als diejenigen für Hochwasser. Dies lässt sich mit dem stärkeren Effekt der Bodenreibung bei niedrigeren Wasserständen erklären, der bei gleichen Windverhältnissen zu einem größeren Windstau bei Niedrigwasser im Vergleich zum Hochwasser führt.

Es fällt weiterhin auf, dass die verschiedenen Methoden teilweise stark voneinander abweichen. So liefert die POT-Methode, berechnet aus dem Dispersionsindex (Tabelle 5-4, 4. Zeile), für das 100-jährige Hochwasser einen um etwa 45 cm höheren Wert als die anderen Methoden). Die Unterschiede der verschiedenen Methoden zwischen Hochwasser und Niedrigwasser sind nicht die gleich (dies gilt auch für verschiedene Stationen, hier nicht gezeigt). So fällt die POT-Methode nicht mehr auf im Vergleich zu den anderen Methoden, während die stationäre Methode nach Gumbel (Tabelle 5-4, 1. Zeile) nur beim Niedrigwasser um etwa 30 cm niedriger liegt als andere Methoden.

Tabelle 5-3: Projizierter linearer Trend [in mm/Jahr] der verschiedenen Perzentile von Hoch- und Niedrigwasserscheiteln für den Zeitraum 1951–2100 berechnet aus den stündlichen Wasserstandsdaten des global gekoppelten Klimamodells MPI-OM im *Weiter-nie-bisher-Szenario* Lauf 1. Rot markiert sind die Trends, die signifikant (auf dem 5 %-Level) vom mittleren Anstieg des Meeresspiegels dieses Modelllaufes abweichen.

Perzentil	Linearer Trend des Hochwasserscheitels 1951–2100 [mm/Jahr]	Linearer Trend des Niedrigwasserscheitels 1951–2100 [mm/Jahr]
99.	6,0	6,1
98.	5,4	5,6
95.	4,8	4,9
90.	4,7	4,7
80.	4,5	4,5
70.	4,5	4,4
60.	4,4	4,3
50.	4,4	4,3
40.	4,4	4,3
30.	4,4	4,3
20.	4,4	4,3
10.	4,5	4,4
5.	4,7	4,5
2.	5,2	4,8
1.	5,6	4,9

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Extremwertstatistischen Untersuchungen mit exemplarischen Methoden (Kapitel 4.2) für das 100-jährige Ereignis am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1987–2016.

Methode (Station Cuxhaven, 1987–2016)	100-jährliches Hochwasser	100-jährliches Niedrigwasser
Stationär, nach Gumbel, gesamte Datenreihe	+3,36 m	+3,70 m
Stationär, nach GEV, aus jährlichen Maxima	+3,43 m	+4,06 m
Stationär, POT (GPD), Schwelle aus MRL	+3,36 m	+4,02 m
Stationär, POT (GPD), Schwelle aus DI	+3,84 m	+4,08 m
Instationär, 30-jährig-gleitendes Mittel, Gumbel	+3,34 m	+3,81 m

Abbildung 5-12 zeigt die Ergebnisse der instationären Methode für den Pegel Cuxhaven detaillierter im zeitlichen Verlauf: Man erkennt einen nahezu gleichmäßigen Anstieg des mittleren Hochwassers (blaue Linie) mit einem Trend von etwa 2,7 mm/Jahr. Der Anstieg des mittleren Niedrigwassers ist eingangs geringer, pausiert dann für etwa 25 Jahre, bevor er ab etwa 1985 erneut einsetzt. Der lineare Trend beträgt für das mittlere Niedrigwasser 1,7 mm/Jahr. Dieser unterschiedliche Trend von Hoch- und Niedrigwasser hat einen Anstieg des Tidenhubs zur Folge. Für beinahe die gesamte Deutsche Bucht ist dieser Anstieg belegt, aber auch, dass der Tidenhub seit etwa 20 Jahren kaum noch ansteigt (erkennbar an der Differenz zwischen blauer und grüner Kurve). Die Trends der 100-jährigen erwarteten Extremereignisse verlaufen hierzu gegenläufig, denn das 100-jährige Niedrigwasser steigt stärker als das 100-jährige Hochwasser an. Für das 100-jährige Ereignis fällt auf, dass ab den 1970er Jahren ein sehr starker Anstieg zu verzeichnen ist, der etwa 1985 (im Zeitraum der Jahre 1970–1999) einen Peak erreicht und danach wieder abfällt.

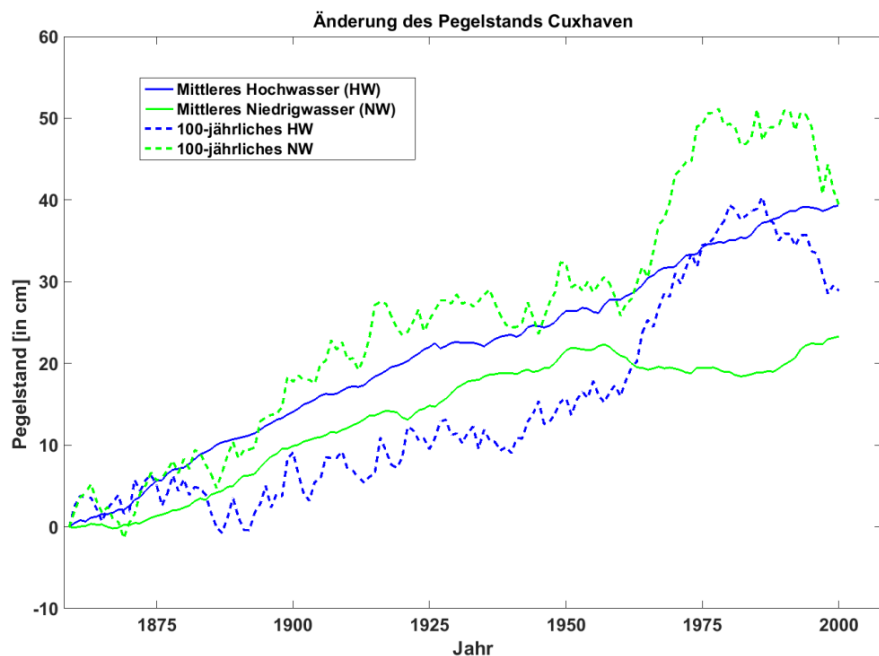


Abbildung 5-12: Änderung des Hochwassers (blau) und Niedrigwassers (grün) am Pegel Cuxhaven als gleitendes Mittel über 30 Jahre, zentriert auf das Jahr in der Mitte der Zeitscheibe. Ebenfalls dargestellt sind die Änderungen des erwarteten 100-jährigen Hochwassers (blau gestrichelt) bzw. Niedrigwassers (grün gestrichelt), berechnet mit einer Anpassung nach Gumbel aus jeweils 30 Jahren. Alle Anfangswerte des Zeitraums 1843–1872 wurden für die bessere Vergleichbarkeit auf null gesetzt.

Für den Küstenschutz ist auch die Frage, wie häufig ein heutiges bestimmtes Ereignis in der Zukunft auftreten kann interessant. Tabelle 5-5 zeigt dies für die Pegel in Cuxhaven und Husum, berechnet aus Beobachtungen für verschiedene 30-Jahrintervalle und unterschiedliche Wiederkehrzeiten. So war für Cuxhaven ein Wasserstand von 912,8 cm über dem PNP in der Zeit von 1843–1872 ein 20-jähriges Ereignis, während der gleiche Wasserstand in der Zeit von 1986–2015 schon alle 8 Jahre aufgetreten ist.

Für Cuxhaven fällt dabei auch auf, dass die Extremereignisse für die Zeit von 1986–2015 im Vergleich zu 1951–1980 kaum häufiger geworden sind. Damals trat beispielsweise ein Wasserstand von 967 cm statistisch alle 43 Jahre auf und 35 Jahre später alle 40 Jahre (Abbildung 5-12). Die Zeitreihe in Husum (ab 1951) zeigt dagegen ein anderes Verhalten, denn bereits nach 35 Jahren wird aus einem 50-jährigen schon ein 28-jähriges Ereignis. Es zeigt sich, dass sich regionale Ergebnisse nicht ohne weiteres auf benachbarte Regionen übertragen lassen.

Tabelle 5-5: Aus 30-jährigen Beobachtungen mithilfe der Gumbelverteilung bestimmte Höhen [in cm über Pegelnullpunkt] für das 10 bis 100-jährliche Hochwasserereignis in Cuxhaven (von 1843–1872) und Husum (von 1951–1980) und die Änderung der Häufigkeit für spätere Zeitintervalle.

Station	10 jährl. Ereignis	20 jährl. Ereignis	50 jährl. Ereignis	100 jährl. Ereignis
Cuxhaven	889,5	912,8	943,7	967
1843–1872	10 jährlich	20 jährlich	50 jährlich	100 jährlich
1951–1980	4,5 jährlich	9 jährlich	22 jährlich	43 jährlich
1986–2015	4 jährlich	8 jährlich	20 jährlich	40 jährlich
Husum	942,7	966,9	998,6	1023,2
1951–1980	10 jährlich	20 jährlich	50 jährlich	100 jährlich
1986–2015	6 jährlich	11 jährlich	28 jährlich	57 jährlich

Ein wichtiges Resultat der exemplarischen Untersuchung ist, dass bei der Anwendung extremwertstatistischer Untersuchungen grundsätzlich vorher genau geprüft werden sollte, welche Anpassung für die verwendeten Daten die optimale Methode ist. Wünschenswert wäre auch die Nutzung mehrerer Methoden, um die Variabilität zwischen den unterschiedlichen Methoden abschätzen zu können.

5.2.2 Seegang/Extremwellen

- Zu der Änderung der Häufigkeit von Extremwellen im Klimawandel kann noch keine Aussage getroffen werden. Extremwellen treten an verschiedenen Bojenstationen der südlichen Nordsee unterschiedlich häufig, besonders oft vor der Insel Norderney auf.
- Im untersuchten Zeitraum von 2011–2016 sind etwa 20 % aller Extremwellen im Verbund von 3 bis 4 hohen Einzelwellen (*die 3 Schwestern*) aufgetreten. Während normale Extremwellen in der südlichen Nordsee etwa so häufig wie theoretisch vorhergesagt auftreten, sind besonders hohe Extremwellen häufiger als theoretisch erwartet.
- Die Vorhersagbarkeit von Extremwellen und damit die Möglichkeit einer Echtzeitwarnung soll in einem Nachfolgeprojekt überprüft werden. Weitere Informationen sind im Abschlussbericht der HZG und in einem eigenen Meilensteinbericht (M108-c2, Teutsch 2019) des BSH zu finden.

In dieser Studie wurde das Auftreten von Extremwellen in der südlichen Nordsee mit den Daten von insgesamt 6 Messbojen näher untersucht. Zusätzlich standen auch Radarmessungen von privaten Betreibern (wie einer Shell-Station in der westlichen Nordsee) zur Verfügung, die aus rechtlichen Gründen hier aber nicht weiter erwähnt werden können. Ein Vergleich der Ergebnisse von Radarmessungen mit Bojenmessungen wird daher in einer gesonderten Veröffentlichung stattfinden.

Extremwellen sind definiert als Einzelwellen, die entweder mindestens doppelt so hoch wie die signifikante Wellenhöhe H_s im umgebenden 30-min Zeitraum sind oder deren Gipfelhöhe C (gemessen von der Nulllinie bis zur Scheitelhöhe) mindestens 125 % der H_s beträgt ($C > 1.25 H_s$), wobei H_s als das Mittel über das höchste Drittel aller Wellen angesehen werden kann.

Insgesamt werden Rohdaten von sechs Messbojen, die innerhalb eines gemeinsamen Zeitraums von sechs Jahren vorliegen, untersucht. Die Stationen sind auf der Karte in Abbildung 5-13 dargestellt. Alle Bojen sind Waverider-Bojen des Typs Mark III und messen mit einer Frequenz von 1,28 Hz. Nach der Qualitätskontrolle stehen 170 Millionen Einzelwellen zur Verfügung. Als erstes wurde die Anzahl aller Extremwellen im Vergleich zur Anzahl aller Wellen untersucht. Das Ergebnis ist ebenfalls in Abbildung 5-13 gezeigt.

Es sind Unterschiede zwischen den verschiedenen Stationen zu erkennen. So ist SEE vor Norderney die einzige Bojenstation, die mehr Extremwellen identifiziert als in der Theorie nach Forristall (1978) zu erwarten ist. Auf den ersten Blick ist hier keine Gesetzmäßigkeit zu erkennen, nach der etwa die geografische

Lage oder die Wassertiefe für die Unterschiede in der Anzahl verantwortlich sein könnte. Über alle Bojenstationen ist keine Saisonalität der relativen Häufigkeit von Extremwellen erkennbar, während die Höhe der Extremwellen in den Wintermonaten erwartungsgemäß zunimmt (siehe Teutsch 2019). Es gibt ebenfalls keinen signifikanten Trend des Auftretens von Extremwellen in den Jahren 2011–2016.

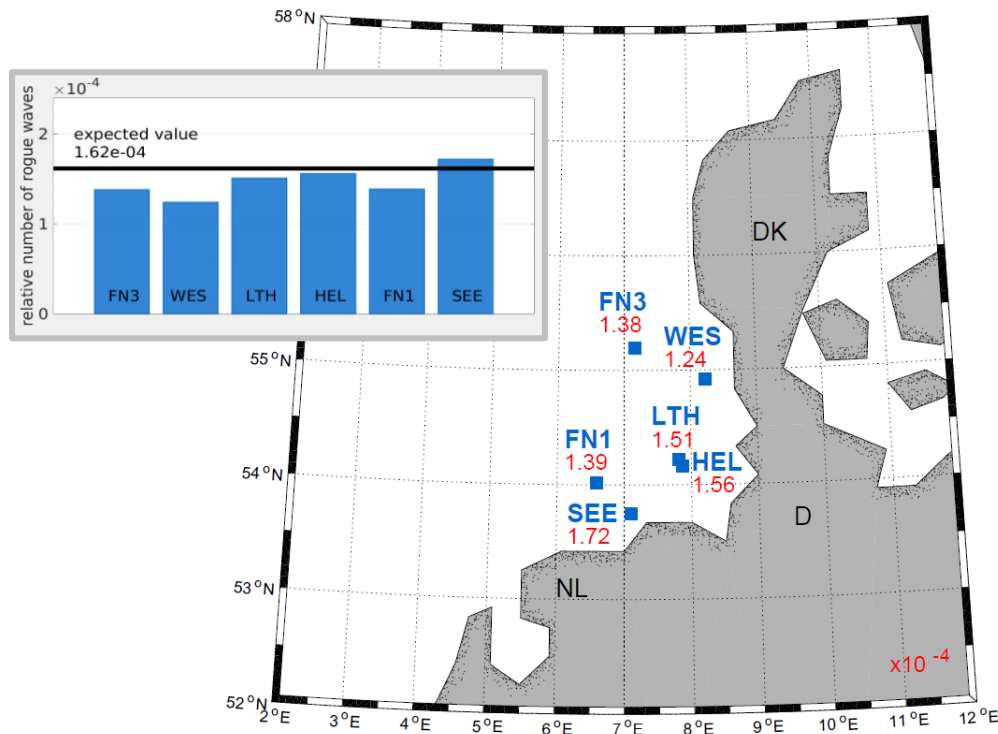


Abbildung 5-13: Lage der Messstationen in der südlichen Nordsee an denen Zeitreihen ausgewertet werden inkl. Der Anzahl gemessener Extremwellen im Verhältnis zur Gesamtzahl gemessener Wellen im untersuchten Zeitraum (Quelle: Teutsch 2019, dort Abbildung 3-1).

Abbildung 5-14 zeigt, dass die Häufigkeit von Extremwellen im Datensatz bis zu einer relativen Höhe von $H/H_s = 2,3$ m einer theoretischen Forristall-Verteilung (Forristall 1978) entspricht. Höhere Extremwellen treten häufiger auf als nach der Theorie erwartet.

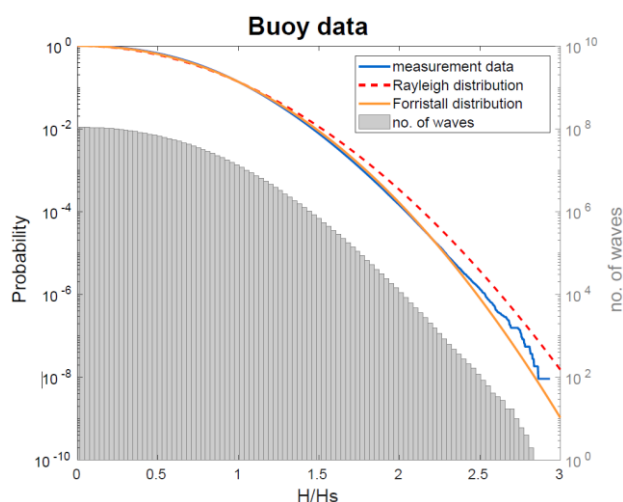


Abbildung 5-14: Kumulative Häufigkeiten aller gemessenen Wellenhöhen (blau). Individuelle Wellenhöhen wurden hierfür mit der signifikanten Wellenhöhe der entsprechenden Zeitreihe normiert. Zum Vergleich sind die Forristall-Verteilung (gelb) und die Rayleigh-Verteilung (gestrichelt) mit eingezeichnet (Quelle: Teutsch 2019, dort Abbildung 3-9).

Ebenfalls wurde der Fragestellung nachgegangen, ob das Auftreten von Extremwellen abhängig ist von der signifikanten Wellenhöhe H_s , ob beispielsweise besonders extreme Extremwellen (mit $H/H_s > 2,3$) bei einer bestimmten H_s häufiger auftreten. Das Ergebnis ist in Abbildung 5-15 dargestellt. Es wird deutlich, dass

sich Extremwellen keiner bestimmten signifikanten Wellenhöhe zuordnen lassen. Für weitere Ergebnisse der Untersuchung zu den Extremwellen wird hier auf den Abschlussbericht der HZG an das BSH verwiesen (Teutsch 2019).

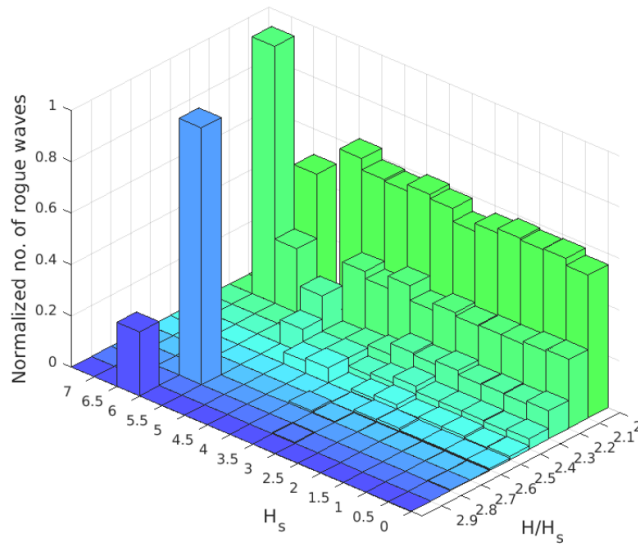


Abbildung 5-15: Häufigkeitsverteilung der relativen Wellenhöhe von Extremwellen H/H_s über der signifikanten Wellenhöhe H_s . Zur besseren Sichtbarkeit wurden die x- und z-Achsen umgekehrt (Quelle: Teutsch 2019, dort Abbildung 3.13).

5.3 Analysen zur Hydrodynamik in der Deutschen Bucht

5.3.1 Einfluss der Modellauflösung

- Hydrodynamische Modelle helfen zu verstehen, wie der Meeresspiegelanstieg die Tidedynamik verändern könnte. Ein limitierender Faktor ist die Auflösung des Modellgitters. Es zeigt sich, dass gerade in flachen Küstengebieten wie dem Wattenmeer in der Deutschen Bucht die Darstellung der Bathymetrie eine entscheidende Rolle bei der Abschätzung der Reaktion der Tidedynamik auf den Meeresspiegelanstieg spielt. Ausführlicher beschrieben sind diese Zusammenhänge in Rasquin et al. (2020).

Ein Blick in die aktuelle Literatur zeigt, dass die Reaktion eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik in der Nordsee bereits in mehreren Studien untersucht wird. Hauptsächlich wird in den Studien die Amplitude der halbtägigen Mondgezeit M2 untersucht, da diese die energiereichste Komponente ist und den größten Anteil an dem Tidesignal der Nordsee hat.

Die Studien ermitteln jedoch teils widersprüchliche Reaktionen auf den gleichen Meeresspiegelanstieg. Ward et al. (2012) verwenden zur Analyse eines Meeresspiegelanstiegs von 2 m das Schelfmodell KUTM und erhalten eine Abnahme der M2 Amplitude in der Deutschen Bucht. Pickering et al. (2012) hingegen stellen einen Anstieg der M2 Amplitude bei gleichem Meeresspiegelanstieg mit dem Schelfmodell DCSTMv5 fest. In Pelling et al. (2013) wird eine Erklärung für diese unterschiedlichen Ergebnisse gegeben. Ausschlaggebend für die gegensätzlichen Ergebnisse ist die Art wie die landseitige Begrenzung im Modell gehandhabt wird. In der Studie von Pickering et al. (2012) wird die Modellgrenze als feste vertikale Brandung vorgegeben. Bei Ward et al. (2012) können bei einem Meeresspiegelanstieg neue Elemente überflutet werden, die außerhalb der originalen Modellgrenze (ohne Meeresspiegelanstieg) liegen. Diese neu überfluteten Elemente führen zu zusätzlichen flachen Bereichen, in denen eine hohe Dissipation stattfindet. Dies führt zur Dämpfung der Tideenergie, was einem durch den Meeresspiegelanstieg abgeschwächten Dissipationsverhalten entgegenwirkt. In dem Modell von Ward et al. (2012), bei dem mit Meeresspiegelanstieg neue Bereiche

geflutet werden dürfen, wird viel Energie auf den flachen Gebieten der niederländischen Küste sowie des ostfriesischen Wattenmeers dissipiert. Daher erreicht weniger Energie die nördliche Deutsche Bucht, was sich in einer abgeschwächten M2 Amplitude ausdrückt. In dem Modell, das eine feste vertikale Begrenzung vorgibt, verbleibt aufgrund des Fehlens einer zusätzlichen dissipativen Fläche mehr Energie in der M2-Gezeit. Dies führt zu einer Erhöhung der M2-Amplitude bei mittlerem Meeresspiegelanstieg. In einer weiteren Studie von Pelling und Mattias Green (2014) wird mit ähnlichen Modellen ein kleinerer Meeresspiegelanstieg von 1 m untersucht. Das Ergebnis dieser Studie unterstützt die Theorie von Pelling et al. (2013). Die Hauptaussage dieser Studie von Pelling und Mattias Green (2014) ist, dass hochauflösende Simulationen mit aktuellen und realistischen Hochwasserschutzanlagen erforderlich sind, um eine Veränderung der Tidedynamik durch einen Meeresspiegelanstieg abschätzen zu können.

In diesem Zusammenhang stellte sich die Frage, ob die Auflösung von Schelfmodellen ausreicht, um die Reaktion der Tidendynamik in der Nordsee auf einen Meeresspiegelanstieg beurteilen zu können. Insbesondere flache Bereiche mit hoher Dissipation und die Ästuar sind in diesen Modellen häufig unzureichend dargestellt. Die betrachteten Schelfmodelle haben eine Gitternetzauflösung von ca. 2 km bis 7 km. Daher sind bestimmte topographische Strukturen in diesen Modellen auflösungsbedingt nicht enthalten. Hierzu zählen die Berücksichtigung der Ästuar sowie die detaillierte Darstellung der Watten und Rinnen im Wattenmeer. So können potenziell wichtige Faktoren wie fehlendes Schwingungsvolumen oder eine unzureichend aufgelöste Topographie die Ergebnisse beeinflussen.

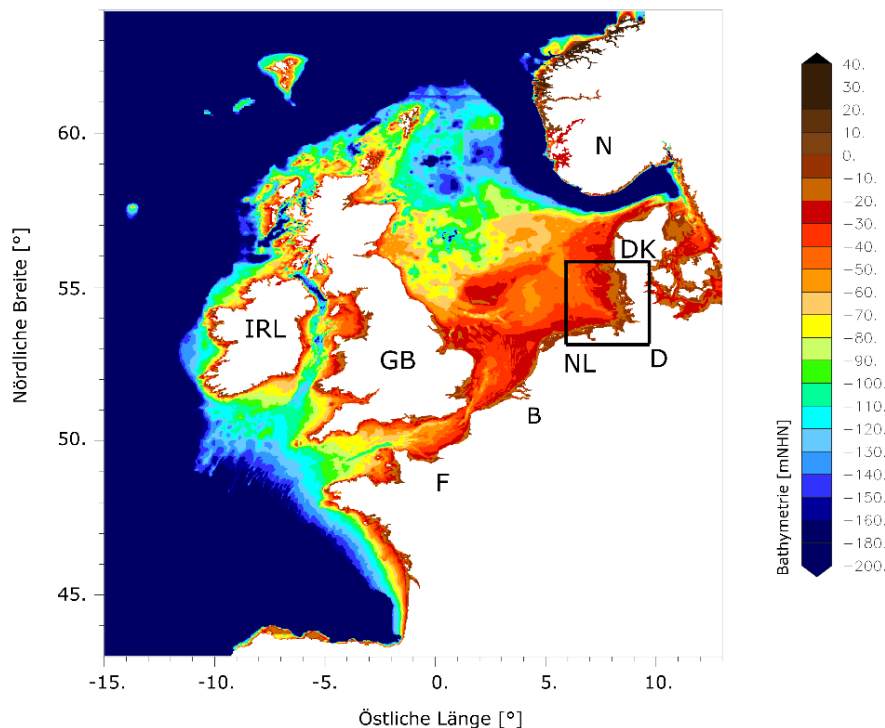


Abbildung 5-16: Modellgebiet des DCSMv6FM. Der schwarze Rahmen zeigt die Deutsche Bucht (Quelle: Rasquin et al. 2020). mNHN = Meter bezogen auf Normalhöhennull.

Im Rahmen dieses Schwerpunktes wurden zwei Modelle verwendet. Zum einen das DCSMv6FM (Zijl et al. 2013, Zijl et al. 2015, Abbildung 5-16), welches den gesamten Schelf der Nordsee abdeckt und zum anderen das regionale Deutsche Bucht Modell der BAW (Abbildung 5-17). Mit beiden Modellen wurde ein Meeresspiegelanstieg von 0,8 m simuliert. Auch diese Modelle zeigen eine unterschiedliche Reaktion der M2-Amplitude auf diesen Meeresspiegelanstieg. Das DCSMv6FM reagiert mit einem Anstieg der M2-Amplitude

auf den Meeresspiegelanstieg und das Deutsche Bucht Modell mit einem Absenken der M2-Amplitude (Abbildung 5-18).

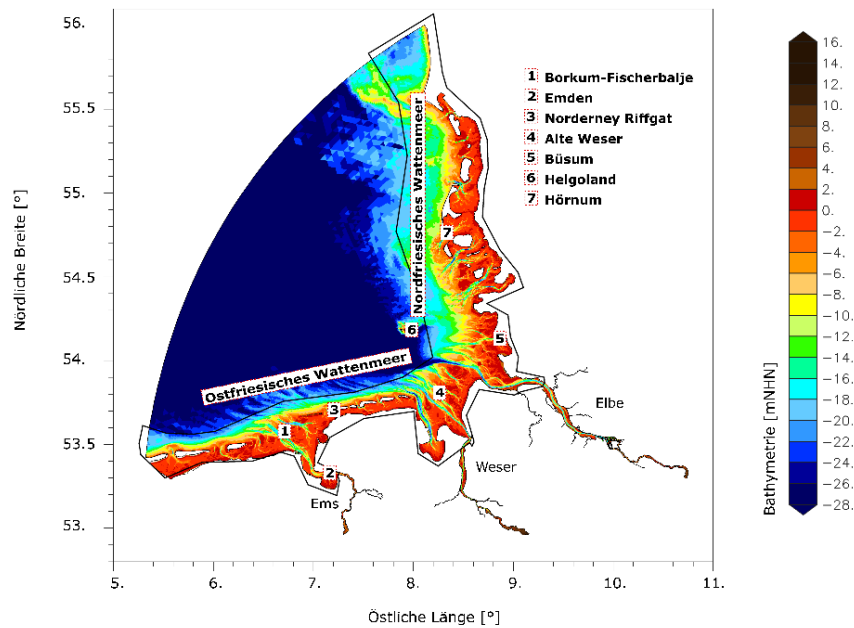


Abbildung 5-17: Modellgebiet des Deutsche Bucht Modells (BGM) der BAW. Der gekennzeichnete Bereich wird für Gebietsmittlungen verwendet (Quelle: Rasquin et al., 2020). mNHN = Meter bezogen auf Normalhöhenull.

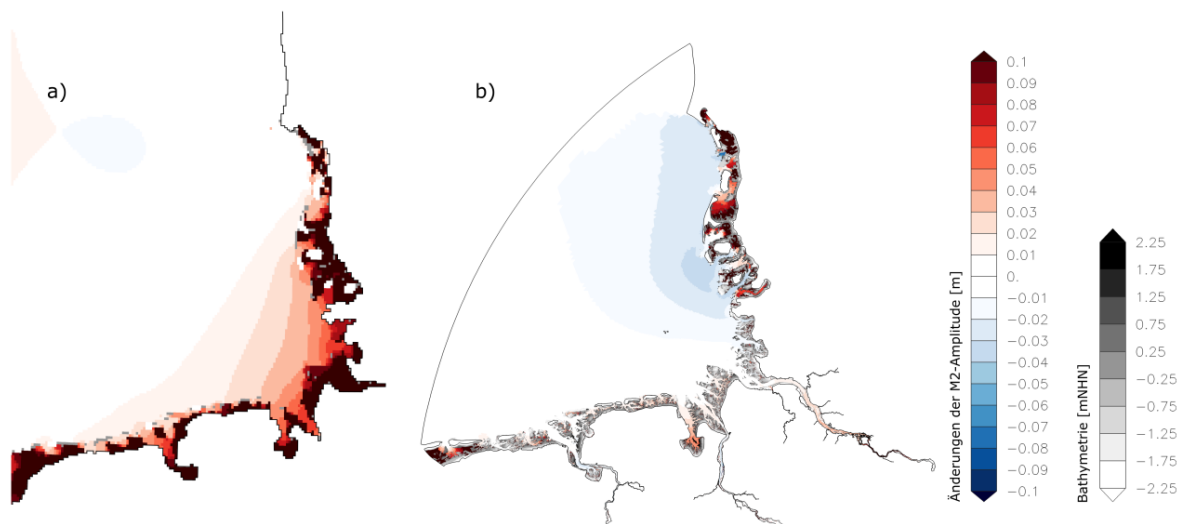


Abbildung 5-18: Reaktion der M2-Amplitude in [m] auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m im (a) DCSMv6FM und (b) im Deutsche Bucht Modell (Quelle: Rasquin et al., 2020). mNHN = Meter bezogen auf Normalhöhenull.

Um die Gründe für diese unterschiedliche Reaktion zu identifizieren, wurde das Deutsche Bucht Modell in zwei Schritten angepasst, um es dem Schelfmodell anzugleichen. Im ersten Schritt wurden die Ästuarie an den Stellen vom Deutsche Bucht Modell landseitig abgeschnitten, an denen das Schelfmodell DCSMv6FM endet. Durch den abgetrennten Schwingungsraum erhöht sich die M2-Amplitude lokal um mehrere Dezimeter (Abbildung 5-19). Das globale Muster der Reaktion der M2-Amplitude auf den Meeresspiegelanstieg verändert sich jedoch nicht. Im zweiten Schritt wurde die gröbere Bathymetrie des Schelfmodells auf das

feine Modellraaster des Deutsche Bucht Modells interpoliert (Abbildung 5-20). Dieser Schritt führte dazu, dass das Änderungssignal in beiden Modellen ähnlicher wird und ein Anstieg der M2-Amplitude zu verzeichnen ist (Abbildung 5-21).

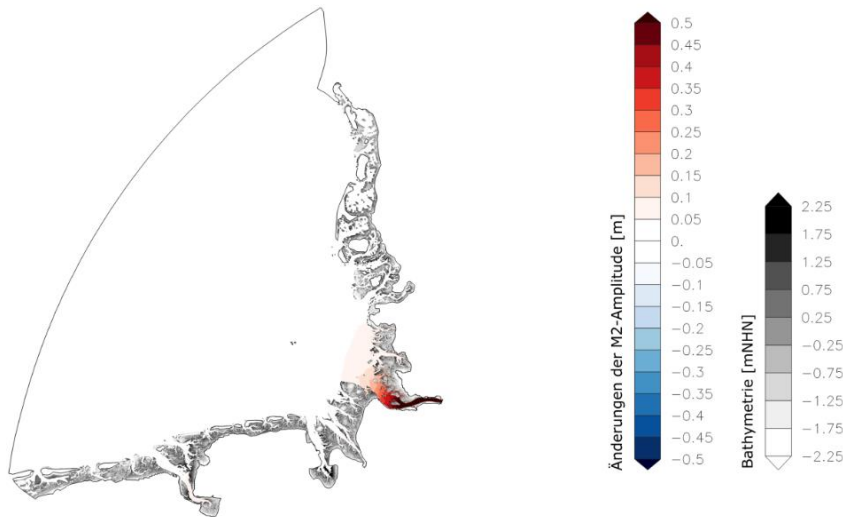


Abbildung 5-19: Reaktion der M2-Amplitude auf ein Abschneiden der Ästuare (Quelle: Rasquin et al., 2020). mNHN = Meter bezogen auf Normalhöhenull.

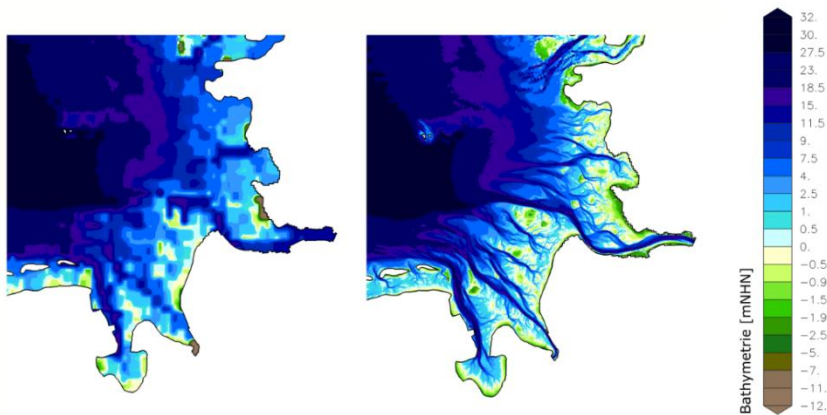


Abbildung 5-20: Bathymetrie. Links: auf das Gitter des Deutsche Bucht Modells interpolierte Bathymetrie des DCSMv6FM. Rechts: originale Bathymetrie des Deutsche Bucht Modells (Quelle: Rasquin et al., 2020). mNHN = Meter bezogen auf Normalhöhenull.

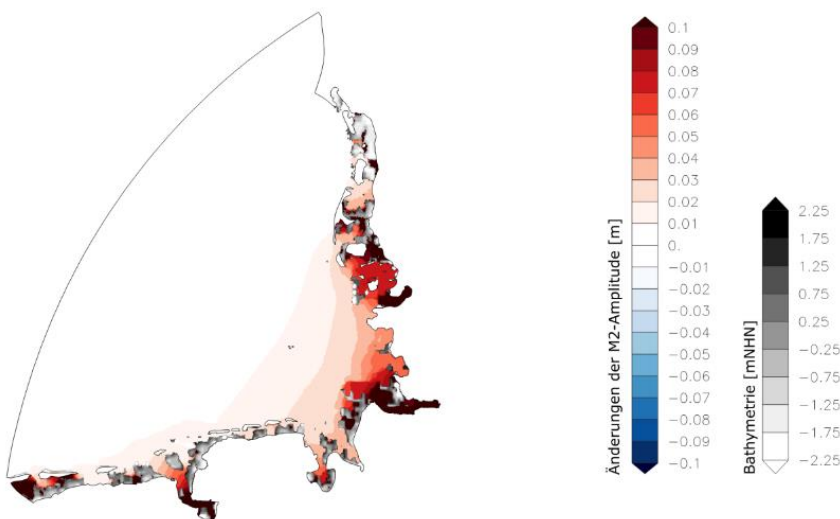


Abbildung 5-21: Reaktion der M2-Amplitude in [m] auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m bei einer größeren Topographie (Quelle: Rasquin et al., 2020), mNHN = Meter bezogen auf Normalhöhenull.

Pelling et al. (2013) erklären die unterschiedliche Reaktion auf einen Meeresspiegelanstieg von zwei Schelfmodellen durch unterschiedliches Dissipationsverhalten aufgrund der neu gefluteten Zellen außerhalb der früheren Modellgrenze in einem der beiden Modelle (s. o.). Die Modellgrenzen des hier untersuchten Schelfmodells DCSMv6FM und des Deutsche Bucht Modells sind so definiert, dass die Deiche nicht überflutet

werden können und dementsprechend auch keine neuen Zellen bei Meeresspiegelanstieg hinzukommen. Aufgrund des implementierten Überfluten- und Trockenfallalgorithmus sind die Modelle jedoch in der Lage neue Zellen im Deichvorland zu überfluten, wenn der Meeresspiegel steigt.

Nach der Argumentation von Pelling et al. (2013) könnte eine Erklärung für die unterschiedliche Reaktion auf 0,8 m Meeresspiegelanstieg im feineren Deutsche Bucht Modell und im gröberen Schelfmodell DCSTMv6FM darin bestehen, dass bei steigendem Meeresspiegel weniger neue Flächen im Schelfmodell geflutet werden und somit weniger dissipative Flächen im Schelfmodell existieren. Auf diese Weise wären die größeren dissipativen Bereiche im Feinmodell eine Erklärung für den schwächeren Anstieg und in einigen Bereichen den Rückgang der M2 Amplitude im feineren Deutsche Bucht Modell. Eine Analyse der nassen Flächen (Tabelle 5-7, vgl. Tabelle 5-6) in den Modellvarianten unterstützt diese Erklärung jedoch nicht: Die Veränderung der nassen Bereiche durch einen Anstieg des Meeresspiegels um 0,8 m im Fall der feinen Auflösung ohne Ästuare (GBM_slr80_NE - GBM_ref_NE) und im Fall der groben Auflösung ohne Ästuare (GBM_slr80_NE_CB - GBM_ref_NE_CB) unterscheidet sich nicht stark (Tabelle 5-7). Dennoch sind die Änderungen in der Dissipation in den jeweiligen Modellvarianten durch den gleichen Meeresspiegelanstieg unterschiedlich.

Tabelle 5-6: Durchgeführte Simulationen.

Feine Bathymetrie, mit Ästuaren, ohne Meeresspiegelanstieg	GBM_ref
Feine Bathymetrie, ohne Ästuare, ohne Meeresspiegelanstieg	GBM_ref_NE
Grobe Bathymetrie, ohne Ästuare, ohne Meeresspiegelanstieg	GBM_ref_NE_CB
Feine Bathymetrie, ohne Ästuare, Meeresspiegelanstieg 0,8 m	GBM_slr80_NE
Grobe Bathymetrie, ohne Ästuare, Meeresspiegelanstieg 0,8 m	GBM_slr80_NE_CB

Tabelle 5-7: Mittlere Flutungsflächen bei Tidehochwasser (nasse Bereiche) im Wattenmeer bis zur 20m-Tiefenlinie und die Dissipationsrate über diesen Bereich gemittelt.

	Nasse Bereiche [10 ⁹ m ²]	Dissipationsrate [10 ⁻³ W/m ²]
GBM_ref_NE	15,90	2,9
GBM_slr80_NE - GBM_ref_NE	0,22	0,6
GBM_ref_NE_CB	15,91	3,0
GBM_slr80_NE_CB - GBM_ref_NE_CB	0,24	0,2

In einer weiteren Analyse wurde die Dissipation über den flachen Bereichen des Wattenmeers bis zur 20 m-Tiefenlinie gemittelt (vgl. Abbildung 5-17, schwarzer Kasten). In der feinen Bathymetrie (GBM_slr80_NE - GBM_ref_NE) steigt die Dissipationsrate, während sie in der Modellvariante mit grober Bathymetrie (GBM_slr80_NE_CB - GBM_ref_NE_CB) nahezu konstant bleibt. Die größere Zunahme der Dissipationsrate in der feinen Bathymetrie ist auf die höhere Zunahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. In der groben Bathymetrie kann ein Anstieg der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten nicht in gleichem Maße verzeichnet werden. Die gröbere Bathymetrie enthält künstliche Untiefen und Barrieren, die besonders in den Rinnen des Wattenmeers keinen kontinuierlichen und ungehinderten Durchfluss erlauben. Dies führt zu den Unterschieden in der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sowie deren Reaktion auf einen Meeresspiegelanstieg.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine ausreichend feine Auflösung der flachen Regionen wie dem Wattenmeer in hydrodynamischen Modellen für eine möglichst genaue Darstellung der Tidendynamik und

ihrer Reaktion auf einen Meeresspiegelanstieg erforderlich ist. Für die vorliegende Fragestellung im Untersuchungsgebiet sind demnach die Schelfmodelle von Ward et al. (2012) und Pickering et al. (2012) nur mit Einschränkungen geeignet. Die Analysen dieser Studie beruhen auf der Annahme, dass die Deiche auch bei hohen Meeresspiegelanstiegen nicht überflutet werden können. Des Weiteren wurde in diesen Simulationen eine unveränderte Bathymetrie angenommen. Durch einen Anstieg des Meeresspiegels wird ein gewisses vertikales Mitwachsen der Watten erwartet (Hofstede 2002, van Maanen et al. 2013). Welche Auswirkungen ein alleiniger Meeresspiegelanstieg sowie in Kombination mit einer veränderten Bathymetrie im Wattenmeer hat, wird im Kapitel 5.3.2, sowie ausführlich im Schwerpunkt *Schiffbarkeit- und Wasserbeschaffenheit* und in Wachler et al. (2020) dargestellt.

5.3.2 Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs und einer möglichen topographischen Änderung auf die Tidedynamik

- Infolge eines Meeresspiegelanstiegs verstärken sich die Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten in den Rinnensystemen des Wattenmeers. Dabei wird insbesondere die Flutstromgeschwindigkeit erhöht, sodass es zu einem vergrößerten Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeiten kommt. Infolgedessen wird der residuale Schwebstofftransport in Richtung Watt verstärkt.
- In der *fernen Zukunft* des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* werden im Wattenmeer ein Aufwachsen der Watten und eine Vertiefung der Rinnen erwartet. Die Untersuchungen zeigen, dass die Auswirkungen des Meeresspiegels durch die erwartete Topographieänderung in diesem Szenario größtenteils kompensiert werden können. Im *high-end-Szenario* wird erwartet, dass das Wattwachstum nicht in vollem Maße mit dem Meeresspiegelanstieg Schritt halten kann. Dies führt zu einem Rückgang der Wattflächen, was wiederum Folgen für den Natur- aber auch für den Küstenschutz haben kann. Ergebnisse der Untersuchungen werden im neuen BAW Bildatlas zu finden sein, der Anfang 2020 veröffentlicht werden soll (BAW in Vorbereitung).

In einer Pilotstudie wird die Reaktion der Tidedynamik auf den Klimawandel in der Deutschen Bucht untersucht. Hierbei spielen der Meeresspiegelanstieg und die daraus resultierenden möglichen Änderungen der Topographie eine große Rolle. Ebenso werden klimawandelbedingte Änderungen im Wind, Abfluss und Salzgehalt berücksichtigt. Die für diese Untersuchung benötigten Randbedingungen werden im Expertenetzwerk behördenübergreifend erstellt und gemeinsam ins Deutsche Bucht Modell der BAW eingesteuert (vgl. Abbildung 4-1).

Die im Folgenden beschriebenen Erkenntnisse aus dem Expertenetzwerk bilden die Grundlage für die Szenarienburg der behördenübergreifenden Simulationen. Aus den Untersuchungen des BSH zur zukünftigen Entwicklung des Windes kann geschlossen werden, dass es in der Summe eines aktuellen Modellensembles keinen statistisch signifikanten Trend zu einer Verstärkung der Windgeschwindigkeiten gibt. Es kann jedoch ein Trend zu verstärkt auftretendem Westwind beobachtet werden (Ganske et al. 2016). Zukünftig wird außerdem mit einem beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels zu rechnen sein (Church und White 2006, Holgate 2007, IPCC 2019). In Reaktion auf diesen wird sich die Topographie des Wattenmeers verändern. Bis zu einem gewissen Grad des Meeresspiegelanstiegs können die Wattflächen mitwachsen (Wachler et al. 2020). Voraussetzung hierfür ist unter anderem eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit.

Das Sediment kann aus den Rinnen, dem Ebbdelta, dem Küstenlängstransport oder dem Oberwasser der Ästuare stammen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Zusammenhänge ist im Schlussbericht *Schiffbarkeit- und Wasserbeschaffenheit* (Nilson et al. 2020) zu finden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden Topographieszenarien entwickelt, die pro Meeresspiegelanstieg eine entsprechende Erhöhung der Watten annehmen (siehe Tabelle 5-8). Dabei fällt die Erhöhung der Watten stets kleiner als der erwartete Meeresspiegelanstieg aus. Unter der Annahme, dass etwa 30-40 % des zur Watterhöhung benötigten Materials aus den Rinnen stammt, werden die Rinnen entsprechend prozentual vertieft.

Dieses Vorgehen führt dazu, dass tiefe Bereiche der Rinnen (z. B. im Ebbdelta und zwischen den Barrier-einseln) stärker vertieft werden als flache Rinnenabschnitte im intertidalen Bereich. Die Zuordnung der Topographieszenarien zu den Meeresspiegelanstiegen ist der Tabelle 5-8 zu entnehmen. Da die kontinuierliche Simulation für lange Zeitscheiben aus Gründen der Rechenressourcen nicht möglich ist, wird für die Zeitscheiben *Bezugszeitraum*, *nabe Zukunft* und *ferne Zukunft* jeweils ein hydrologisches Jahr (November bis Oktober) der jeweiligen Zeitscheibe untersucht.

Tabelle 5-8: Zuordnung der Topographieszenarien zu den entsprechenden Meeresspiegelanstiegen.

Meeresspiegelanstieg	0,30 m	0,80 m	1,74 m
Topographieszenario	Watten um 0,2 m erhöht, Rinnen um 4 % vertieft	Watten um 0,5 m erhöht, Rinnen um 11 % vertieft	Watten um 0,65 m erhöht, Rinnen um 14 % vertieft

Für die Untersuchungen wird ein charakteristisches Jahr der jeweiligen Zeitscheibe verwendet, welches möglichst die typischen Verhältnisse der Zeitscheibe wiedergibt. Voruntersuchungen im Rahmen des KLIWAS Programms haben ergeben, dass der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs gegenüber dem Wind einen größeren Einfluss auf die Tidedynamik in der Nordsee hat (Seiffert et al. 2014). Auf mittelfristigen Zeitskalen (Jahren) weist der Meeresspiegelanstieg kaum Schwankungen auf, während im Windklima eine starke Variabilität zwischen den einzelnen Jahren auftreten kann (Ganske 2017). Die Auswahl der Jahre erfolgte demnach über den Wind, zum einen da hier die größten Schwankungen innerhalb der Zeitscheibe zu erwarten sind und zum anderen, weil im Küstenbereich neben dem Meeresspiegelanstieg der Wind der wichtigste Faktor für die Tide- und auch Sedimentdynamik ist. Hierfür wurden zunächst die mittlere Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit sowie die mittlere Windrichtung pro Zeitscheibe in allen drei Modellrealisierungen des gekoppelten MPIOM-REMO für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* ermittelt (Ganske 2017).

Als charakteristisches Jahr wurde ein Jahr bestimmt, das sowohl geringe Abweichungen der Windgeschwindigkeitsverteilung (<10 m/s) als auch der mittleren Windrichtung zum Zeitscheibenmittel hat. Dabei wurde die Windgeschwindigkeitsverteilung stärker gewichtet, da insbesondere hohe Windgeschwindigkeiten einen größeren Einfluss auf den Sedimenttransport haben. Entsprechend der Ergebnisse von Ganske et al. (2016) kann ein Trend zu verstärkt auftretendem Westwind festgestellt werden. Daher wird zusätzlich ein Jahr mit häufig auftretendem starkem Westwind untersucht. Die Auswahl dieses Jahres erfolgte anhand von Windrosen, die für alle Jahre jeder Zeitscheiben und Realisierung (insgesamt 270 Jahre) erstellt wurden. Gesucht wurde hier ein Jahr mit wenig Ostwind und häufig auftretenden hohen bzw. sehr hohen Windgeschwindigkeiten aus West und Nord-West (>12 m/s bzw. >20 m/s). In Tabelle 5-9 sind die ausgewählten charakteristischen Jahre der jeweiligen Zeitscheibe bzw. des Szenarios mit häufigem starkem Westwind mit den zugeordneten Meeresspiegelanstiegen aufgeführt.

Tabelle 5-9: Ausgewählte charakteristische Jahre mit zugehörigen Meeresspiegelanstiegen.

Zeitscheibe bzw. Szenario	Referenz	<i>nabe Zukunft</i>	<i>ferne Zukunft</i>	häufiger starker Westwind
Ausgewähltes charakteristisches Jahr (zugehöriger Realisierung aus MPIOM-REMO)	1996 (r1)	2053 (r1)	2078 (r2)	2092 (r3)
Zugehöriger Meeresspiegelanstieg	0 m	0,30 m	0,80 m 1,74 m (Extrem-szenario)	0,80 m 1,74 m (Extrem-szenario)

Das erstellte Topographieszenario Referenz bzw. die Änderungen in den Szenarien *ferne Zukunft*, Meeresspiegelanstieg 0,80 m und *ferne Zukunft*, Meeresspiegelanstieg 1,74 m, bezogen auf den Referenzzustand, sind in Abbildung 5-22 dargestellt. Rot bedeutet eine Erhöhung der Topographie und blau eine Vertiefung an. Entsprechend Tabelle 5-8 wurden die Watten beispielsweise bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m um 0,5 m angehoben und die Rinnen um 11 % vertieft. Das Volumen, das durch diese Vertiefung entsteht, entspricht 30-40 % des Volumens, das zur Anhebung der Watten in diesem Szenario benötigt wird. Abbildung 5-23 zeigt Ergebnisse für die Szenarien Referenz, *ferne Zukunft*, Meeresspiegelanstieg 0,8 m und *ferne Zukunft*, Meeresspiegelanstieg 1,74 m. Dargestellt ist die Gesamttrockenfalldauer in den jeweiligen Szenarien. Die Gesamttrockenfalldauer gibt kumulativ an, wie lange die entsprechenden Bereiche während des Analysezeitraums von einem hydrologischen Jahr trockenfallen. Blaue Bereiche sind permanent nass und rote Bereiche fallen permanent trocken, da sie höher als die Wasserwechselzone liegen. Der Vergleich des Referenzjahres mit der *fernen Zukunft* und einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m zeigt, dass die trockenfallenden Bereiche zwar etwas kleiner werden bzw. weniger lange trockenfallen, jedoch scheint das angenommene Wattwachstum die Auswirkungen des steigenden Meeresspiegels größtenteils zu kompensieren. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 1,74 m wird angenommen, dass das Wattwachstum nicht in vollem Maße Schritt halten kann. Abbildung 5-23 unten zeigt, dass die trockenfallenden Bereiche dadurch deutlich kleiner werden bzw. deutlich kürzer im Untersuchungszeitraum trockenfallen. Ein Rückgang der Wattflächen hat Folgen für den Natur- aber auch für den Küstenschutz, da in diesem Fall weniger Tideenergie im Küstenvorfeld gedämpft werden kann.

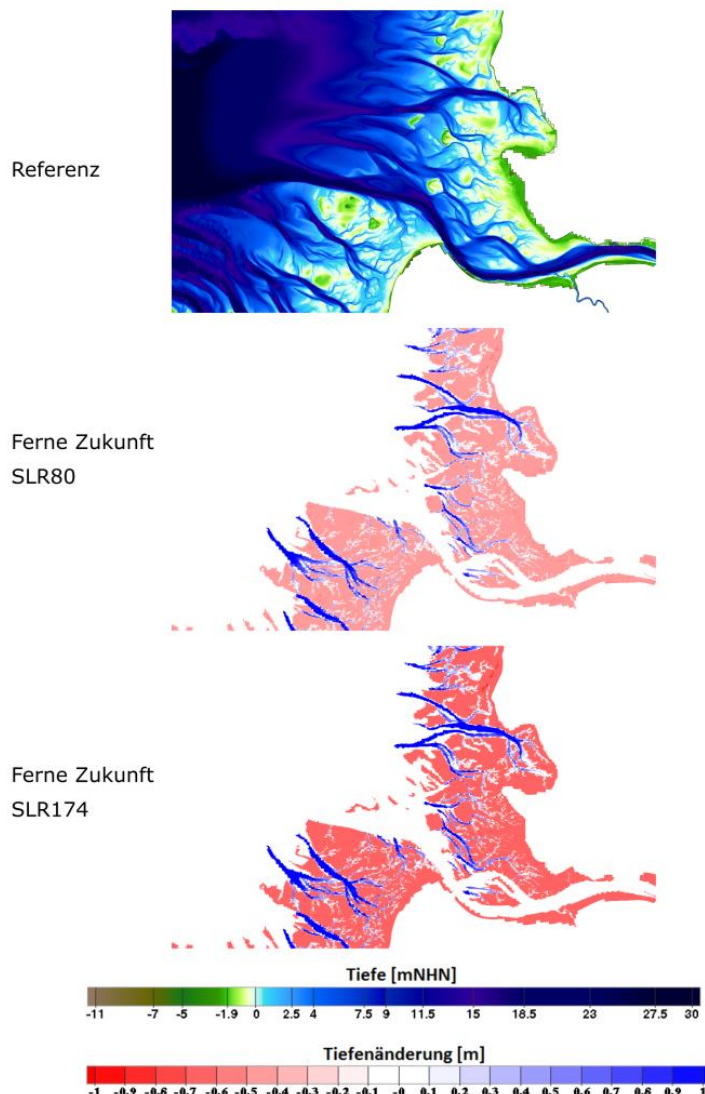


Abbildung 5-22: Referenztopographie in [mNHN] und angenommene Änderungen der Topographie durch einen Meeresspiegelanstieg in [m] in der Elbmündung.

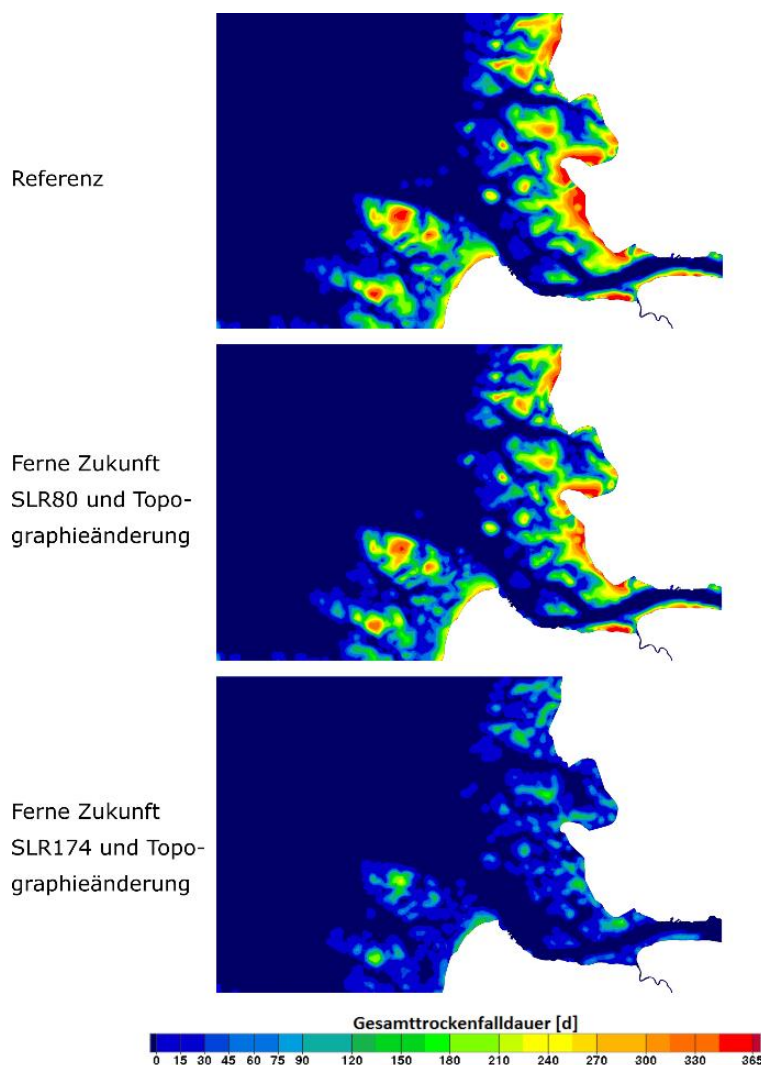


Abbildung 5-23: Gesamttrockenfalldauer in [Tagen] in der Elbmündung im Referenzzustand und bei Meeresspiegelanstieg sowie angenommener Topographieänderung.

Weitere Ergebnisse werden im neuen BAW-Bildatlas (BAW in Vorbereitung) zu finden sein.

5.4 Analysen in Fokusregionen

Eine Pilotstudie mit konkretem Anwendungsbezug im Küstenschwerpunkt bezog sich auf die Untersuchung der Entwässerungssituation des NOK (z. B. Brockmann et al. 2008) im Klimawandel. Der NOK entwässert zu etwa 90 % bei Brunsbüttel in die Elbe und zu etwa 10 % bei Kiel-Holtenau in die Ostsee, daher hängt der Abfluss aus dem NOK stark von den Außenwasserständen ab.

In der Vergangenheit kam es nach hohen Niederschlägen im Einzugsgebiet des NOK und gleichzeitig hohen Außenwasserständen vereinzelt zu stark erhöhten Wasserständen im NOK. In diesen Fällen musste der Fährverkehr über den NOK eingestellt und die Schifffahrt durch den NOK reduziert oder sogar eingestellt werden, da nicht gleichzeitig geschleust und entwässert werden kann. Da im Zuge des Klimawandels die Wasserstände in Tideelbe und Ostsee ansteigen werden (siehe z. B. Jensen et al. 2014), stellt sich die Frage, wie stark sich die Häufigkeiten von angespannten Entwässerungssituationen in der Zukunft ändern werden.

5.4.1 NOK - Modellansatz zur Wassermengenbewirtschaftung (WSV Auftrag)

- Die Entwässerungskapazitäten in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau sind ausreichend groß, um unter gegenwärtigen Bedingungen den Wasserstand des NOK weitgehend unterhalb der kritischen Marke von 5,40 m Pegelnullpunkt (Einstellung der Schifffahrt) zu halten. Die aktuellen Kapazitäten an beiden Standorten werden benötigt, um den Schiffsverkehr auch bei angespannten Hochwassersituationen zu ermöglichen.
- In der Vergangenheit traten temporär Überschreitungen der kritischen Wasserstandsmarke auf. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 170 cm würde sie im Mittel in 85 % der Tage eines Jahres überschritten (300 Tage). Mehrere Anpassungsoptionen wären denkbar, u. a. auch die Installation eines Pumpwerks. Eine Pumpenleistung von 25 m³/s würde die Häufigkeit der Überschreitung um 2/3 reduzieren (von 300 Tage auf 100 Tage). Mit einer Pumpenleistung von 100 m³/s könnten fast wieder gegenwärtige Verhältnisse erreicht werden. Mit steigender Pumpenkapazität erhöht sich jedoch auch der Energieaufwand.

1.) Identifizierung kritischer Bewirtschaftungssituationen der Vergangenheit

Im Zeitraum von November 1980 bis Oktober 2012 (größte Verfügbarkeit an Beobachtungsdaten) sind 12 Ereignisse identifiziert worden, die zu Wasserständen über 5,40 m (Pegelnulppunkt) an einem oder mehreren Betriebspegeln im Kanal führten oder einen sehr hohen Zufluss aus dem Einzugsgebiet aufwiesen. In Abbildung 5-24 ist beispielhaft das Ereignis Januar 2012 (Ereignis-Nr. 12) dargestellt. Alle anderen Ereignisse sind entsprechend in BfG (in Vorbereitung) grafisch aufbereitet.

2.) Aufbau inklusive Kalibrierung/Validierung bzw. Plausibilisierung des Modellinstrumentariums: Bilanzierungs- und Steuerungsmodell für den Kanal (BEWASYS NOK) und Wasserhaushaltsmodell (LARSIM NOK) zur Ermittlung des Gesamtzuflusses aus dessen Einzugsgebiet

Zusammenfassend kann für die Plausibilisierung des Bilanzierungs- und Steuerungsmodells für den Kanal (BEWASYS NOK) unter Berücksichtigung eines Vergleichs von beobachteten und simulierten Größen für alle identifizierten Ereignisse festgehalten werden:

- Die simulierten Kanalwasserstände auf der Grundlage der regionalisierten Zuflussreihen überschätzen tendenziell die mittleren beobachteten Kanalwasserstände.
- Die simulierten Kanalwasserstände auf der Basis der simulierten Zuflussreihe geben den unteren Rand der Spannweite der beobachteten Wasserstände gut wieder.
- Bei Ereignissen, in denen aufgrund erhöhter Außenwasserstände der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP erreicht wird oder zu überschreiten droht, wird der NOK in der Regel nicht mit 4 Schützen entwässert.
- Die Wahl der Zeitschrittweite (Stunden- oder Tageszeitschritt) hat für die Simulation der Kanalwasserstände eine geringere Relevanz als das Zuflussvolumen.
- Nachbildung von tatsächlichen Entwässerungszeiten und Entwässerungswassermengen: Die Ergebnisdiskussion beschränkt sich (im Gegensatz zu den zuvor genannten Punkten) aufgrund der Datenverfügbarkeit auf Entwässerungszeitpunkte im November 2010 und Januar 2012 und auf Entwässerungsmengen im November 2010. Hier werden beide Größen gut getroffen.

In BfG (in Vorbereitung) wird darüber hinaus die Plausibilisierung dieses Modells für die zusätzlich unter Punkt 1. genannten Ereignisse (entsprechend der Datenverfügbarkeit) gezeigt. Darüber hinaus wird in diesem Zuge eine Multimodellvergleich mit dem parallel aufgebauten hydrodynamischen Modell SOBEKNOK durchgeführt. Im Bericht wird ebenso die Kalibrierung und Validierung des Wasserhaushaltsmodells (LARSIM NOK) diskutiert.

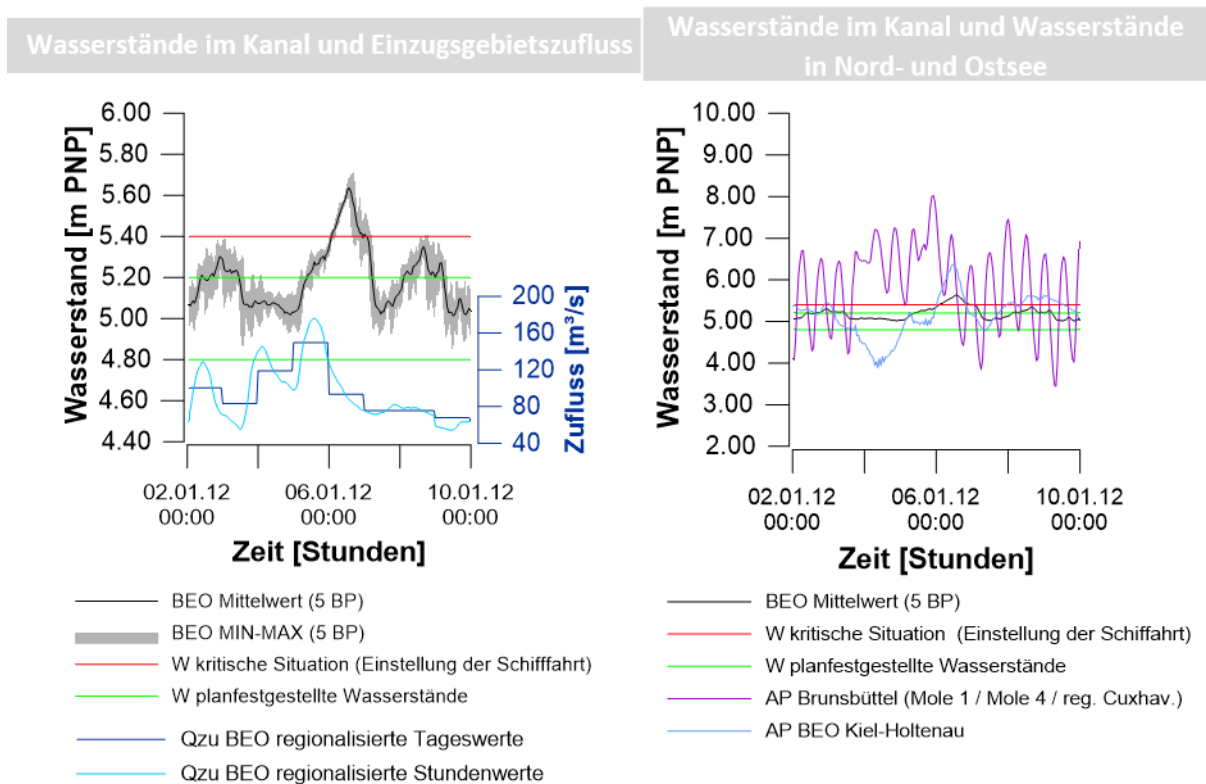


Abbildung 5-24: Januar 2012 (Ereignis Nr. 12) als Beispiel für die zwölf anhand von Beobachtungsdaten bzw. regionalisierten Daten im Zeitraum von November 1980 bis Oktober 2012 identifizierten Ereignisse mit kritischen Situationen in der Kanalbewirtschaftung (Wasserstände über dem Pegelnullpunkt 5,40 m an einem oder mehreren Betriebspegeln (siehe Abbildung 4-2) und/oder einem hohen Gebietszufluss. „BEO“ bezeichnet die Beobachtungen, „Qzu“ den Zufluss aus dem Einzugsgebiet, „W“ den Wasserstand im NOK und „AP“ die Außenpegel (somit die Wasserstände in Nord- bzw. Ostsee).

3.) Sensitivitätsuntersuchungen

- Untersuchung des Einflusses der Spannweite von drei unterschiedlich ermittelten Einzugsgebietszuflüssen zum Kanal (auf der Basis von Beobachtungsdaten regionalisierte Stundenwertreihe und Tageswertreihe sowie mit dem Wasserhaushaltsmodell simulierte Tageswertreihe) auf die Simulation der Kanalwasserstände.
- Untersuchung des Einflusses der Wahl der Entwässerungsorgane am Standort Brunsbüttel (4 Schütze, 8 Schütze und 16 Schütze) auf die Simulation der Kanalwasserstände.

Die Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht (Ebner von Eschenbach 2017) und werden daher hier nur kurz zusammengefasst: „Die Unsicherheiten in der Simulation der Wasserstände im Kanal bedingt durch den abgeschätzten (und nicht tatsächlich messbaren) Gebietszufluss liegen in der gleichen Größenordnung (ca. 17 cm) wie die Annahmen zur Entwässerungsleistung bei Wasserstandsdifferenzen von beobachteten Außen- und Binnenpegel. Die Untersuchungen erfolgten für zwei kritische Bewirtschaftungsereignisse Januar 2007 und Januar 2012 (S.128)“ (ebd.).

4.) Ableitung von Szenarien für den Klimawandel

Veränderung der Meteorologie und somit Veränderung des Zuflusses aus dem Einzugsgebiet: Die Untersuchungen der Wasserbewirtschaftung des Kanals unter Klimawandel erfolgen unter Berücksichtigung der zwei Klimaszenarien: *Klimaschutzszenario* und *Weiter-nie-bisher-Szenario*. Die Änderungssignale für die meteorologischen Größen (Niederschlag, Lufttemperatur und Sonnenscheindauer) wurden dem Klimareport Schleswig-Holstein (DWD 2017) entnommen.

Festlegung von Annahmen zum Anstieg des Meeresspiegels in Nord- und Ostsee (im Sinne von Sensitivitätsuntersuchungen):

- Die Berücksichtigung der Veränderung des Meeresspiegels unter Klimawandel erfolgte über eine schrittweise Erhöhung der regionalisierten Wasserstände in der Nordsee und der beobachteten Wasserstände in der Ostsee in 10 cm Schritten bis 50 cm, und darüber hinaus für 80 cm, 100 cm und 170 cm. Die Wasserstände in Nordsee und Ostsee wurden simultan und konstant über den Simulationszeitraum von 1952–2006 erhöht. Die Limitierung auf 2006 als spätestes Jahr ist durch die Verwendung des HYRAS-Datensatzes als Randbedingung für das Wasserhaushaltsmodell begründet. Der methodische Ansatz der Sensitivitätsuntersuchungen ist in Abbildung 5-25 dargestellt.
- Die Erhöhung der Außenwasserstände bis zu 100 cm basiert auf den Angaben des 5. Sachstandsberichts des (IPCC 2013). „Für das *Klimaschutzszenario* ergibt sich damit ein Bereich von 26 bis 55 cm, für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* ein Bereich von 52-98 cm“ (aus DWD 2017, S. 27). In dem Klimabericht wird darauf hingewiesen, dass aktuelle Forschungen für die deutschen Küsten auf einen Meeresspiegelanstieg von deutlich über einem Meter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts hinweisen.
- Für die Kleinen Schleusen Kiel-Holtenau wurden durch den Erlass des BMVI vom 21.07.2017 Az WS 11/5221.34-0 Sensitivitätsbetrachtungen unter Annahme eines Meeresspiegelanstiegs in 2100 von +174 cm durchgeführt. Aufgrund dieses Erlasses wurde die Spannweite der untersuchten Wasserstandserhöhungen bis auf 170 cm vergrößert.
- Für die Ostsee wurden die beobachteten Wasserstände des Pegels Kiel-Holtenau verwendet, für die Nordsee diente der Pegelstandort Brunsbüttel als Referenz. Die Beobachtungsdaten für Brunsbüttel lagen jedoch rückwirkend nicht bis 1952 vor, sodass die beobachteten Wasserstände des Nordsepegels Cuxhaven über eine lineare Regression unter Berücksichtigung eines Zeitversatzes auf den Pegelstandort Brunsbüttel übertragen wurden (Details zur Übertragung finden sich in BfG in Vorbereitung).

5.) Untersuchungen zur Kanalbewirtschaftung unter dem Klimawandel mit dem Schwerpunkt auf kritische Bewirtschaftungssituationen, in denen der Wasserstand im Kanal den Grenzwasserstand von 5,40 m PNP (Einstellung der Schifffahrt) überschreitet und Vergleich mit der Referenz

Ziel des Auftrages (siehe Abschnitt 4.4.1) ist unter anderem die Beantwortung der Frage, wie häufig kritische Situationen in der Bewirtschaftung des Kanals in der Gegenwart aufgetreten sind und, wie sich deren Auftrittshäufigkeit in der Zukunft ändern wird. Auch die Modellentwicklung des NOK im Zusammenhang zur Nachbildung und Erklärung des Gesamtsystems ist als Ziel geplant. Als kritische Bewirtschaftungssituationen wurden diejenigen Ereignisse eingestuft, bei denen der Wasserstand im NOK über 5,40 m PNP (Einstellung der Schifffahrt) steigt.

Abbildung 5-26 zeigt die mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der Wasserstand im Kanal in mindestens 1 Stunde den Wert von 5,40 m PNP überschreitet. Folgende Annahmen liegen der Wasserstandssimulation im NOK zu Grunde:

- Zufluss aus dem Einzugsgebiet entsprechend der Änderungssignale der Meteorologie für die RCPs 2.6 und 8.5 für die *nabe* und *ferne Zukunft* (siehe Punkt 4: Ableitung von Szenarien).
- Entwässerung in Brunsbüttel über 16 Schütze (ohne Umläufe) und in Kiel-Holtenau über das Siel (Details siehe BfG in Vorbereitung).
- Wasserstände in der Nordsee (Brunsbüttel ermittelt aus Übertragung Cuxhaven) und Ostsee (Kiel-Holtenau, Beobachtung) schrittweise erhöht um bis zu 170 cm (siehe Punkt 4: Ableitung von Szenarien).

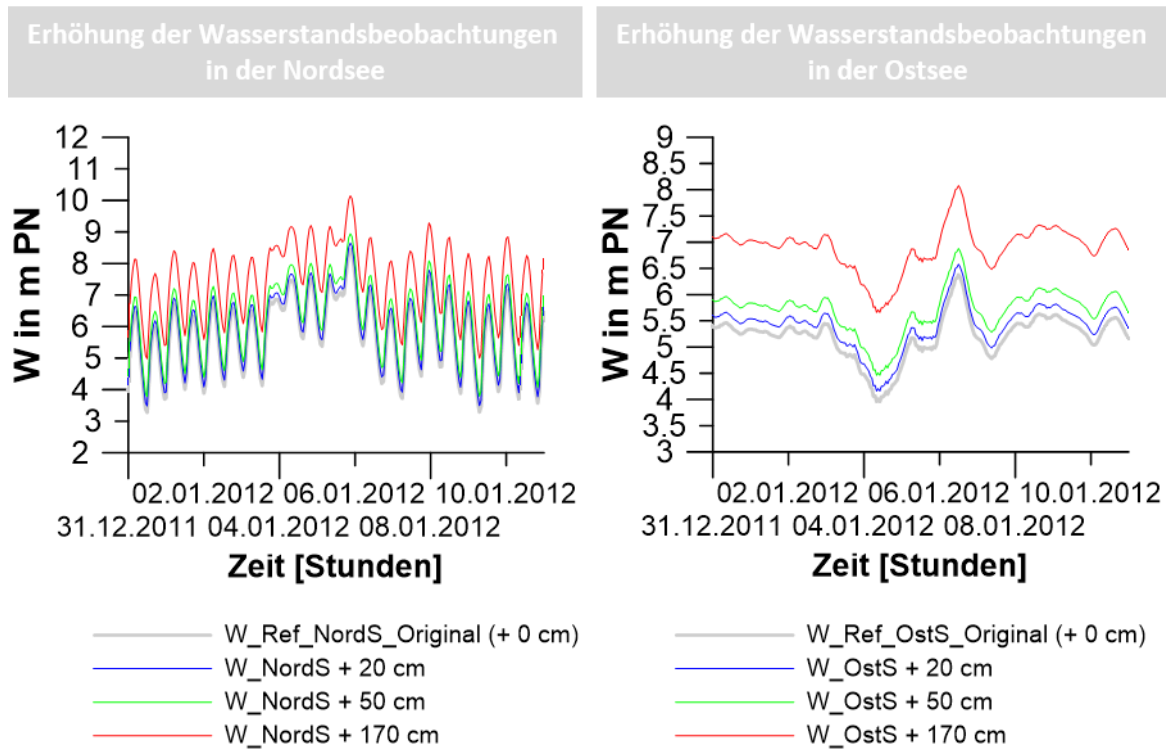


Abbildung 5-25: Erhöhung der beobachteten Wasserstände „W“ für die Nord- und Ostsee (am Beispiel des Januar-Ereignisses 2012, Ereignis Nr. 12 aus Abbildung 5-24). „W_Ref“ bezeichnet den Wasserstand im Bezugszeitraum.

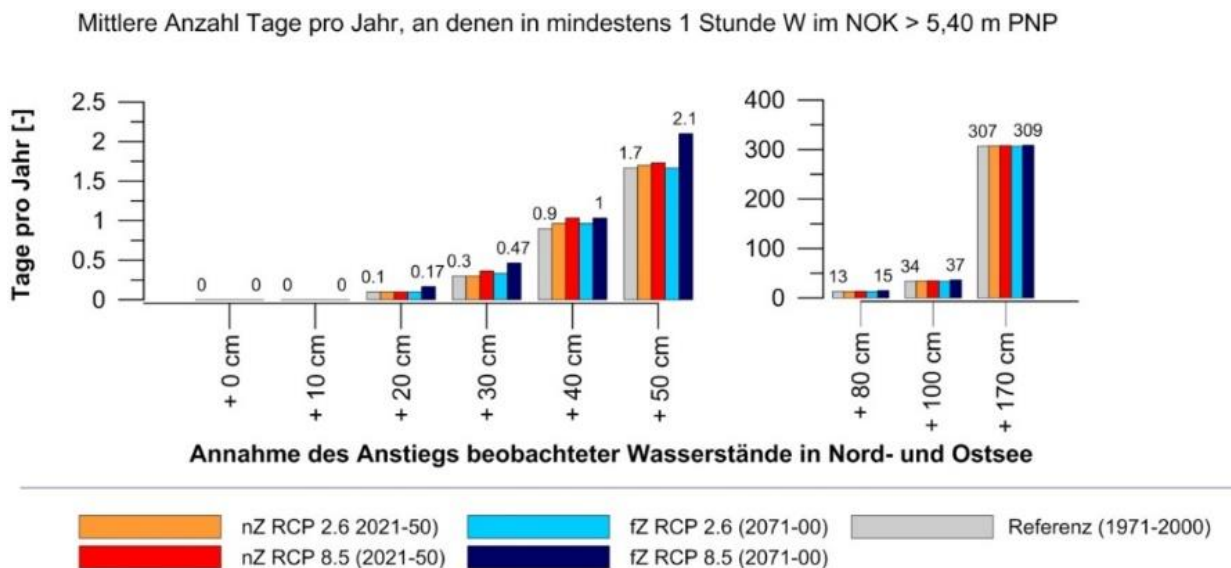


Abbildung 5-26: Ergebnisse der Szenarienrechnungen (nZ = nahe Zukunft, fZ = ferne Zukunft) mit veränderter Binnenhydrologie und steigenden Außenwasserständen: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird (Modellzustand: Status quo, keine Pumpe).

Das Schleusungswasser an den Standorten Brunsbüttel und Kiel-Holtenau wurde modellextern vorgegeben und anhand konstanter Kammerfüllungszahlen ermittelt (Details siehe BfG in Vorbereitung). Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen mit veränderter Binnenhydrologie und steigenden Außenwasserständen sind in Abbildung 5-26 zusammengefasst. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aufgeführt:

- Im *Bezugszeitraum* (1971–2000) ist die mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr, in denen der Wasserstand von 5,40 m PNP in mindestens 1 Stunde überschritten gleich Null. Dies entspricht weitgehend der

Beobachtung: In dem mit Daten verfügbaren Zeitraum von 1977–2000 (24 Jahre) wurden 5 Tage registriert, an denen der Wasserstand über 5,40 m PNP lag (Häufigkeit 0,2).

- Es zeigte sich eine Zunahme der mittleren Anzahl an Tagen mit Wasserständen über 5,40 m PNP bei steigenden Außenwasserständen. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 170 cm wird ein Kanalwasserstand von 5,40 m PNP mit Mittel in 85 % der Tage eines Jahres überschritten (300 Tage). Im Hinblick auf die Gewährleistung der Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des NOK ist rechtzeitig eine Anpassungsstrategie zu entwickeln. Neben denkbaren Anpassungsmaßnahmen wie zum Beispiel der Veränderung der Vorflutverhältnisse (Einzugsgebiet) oder die Schaffung von Retentionsräumen ist auch die Installation eines Pumpwerks (ggf. modular an die tatsächliche Entwicklung des Meeresspiegels anpassbar) eine realisierbare Option. (daher – s. nachfolgender Punkt 6).
- Die im Rahmen der Klimaszenarien berücksichtigte Änderung des Zuflusses zum NOK hat einen geringeren Einfluss auf kritische Bewirtschaftungssituationen als die in den Szenarienrechnungen untersuchte Änderung des Meeresspiegels.

6.) Untersuchung der Auswirkungen einer möglichen Anpassungsoption (Installation von Pumpen zur Entwässerung des Kanals) hinsichtlich der Möglichkeit der Reduzierung von zukünftigen kritischen Bewirtschaftungssituationen, in denen der Grenzwasserstand von 5,40 m PNP (Einstellung der Schifffahrt) überschritten wird

Basierend auf den Ergebnissen in Abbildung 5-26 stellt sich die Frage, ob und mit welchem Energieaufwand Pumpen als eine Form der Anpassungsoption geeignet sind, um die Anzahl der Tage im Jahr, in denen der Wasserstand von 5,40 m PNP überschritten wird, zu reduzieren.

In der Abbildung 5-27 ist (analog zur Abbildung 5-26) die mittlere Anzahl der Tage im Jahr dargestellt, in denen der Wasserstand von 5,40 m PNP in mindestens einer Stunde des Tages überschritten wird. Die hier getroffenen Annahmen sind identisch mit den Annahmen zu Abbildung 5-26. Ergänzend kommt jedoch hinzu, dass Pumpwerke mit drei unterschiedlichen Kapazitäten (25 m³/s – Abbildung 5-27), 50 m³/s und 100 m³/s (beide dargestellt in BfG in Vorbereitung) jeweils als Anpassungsoption untersucht wurden. Ein Vergleich der Abbildung 5-27 mit Abbildung 5-26 verdeutlicht die Wirksamkeit der Pumpen. Eine Pumpleistung von 25 m³/s würde, bei Annahme eines extremen Meeresspiegelanstiegs um 170 cm, die Häufigkeit der Überschreitung des Kanalwasserstandes von 5,40 m PNP um 2/3 reduzieren (von 300 Tage auf 100 Tage).

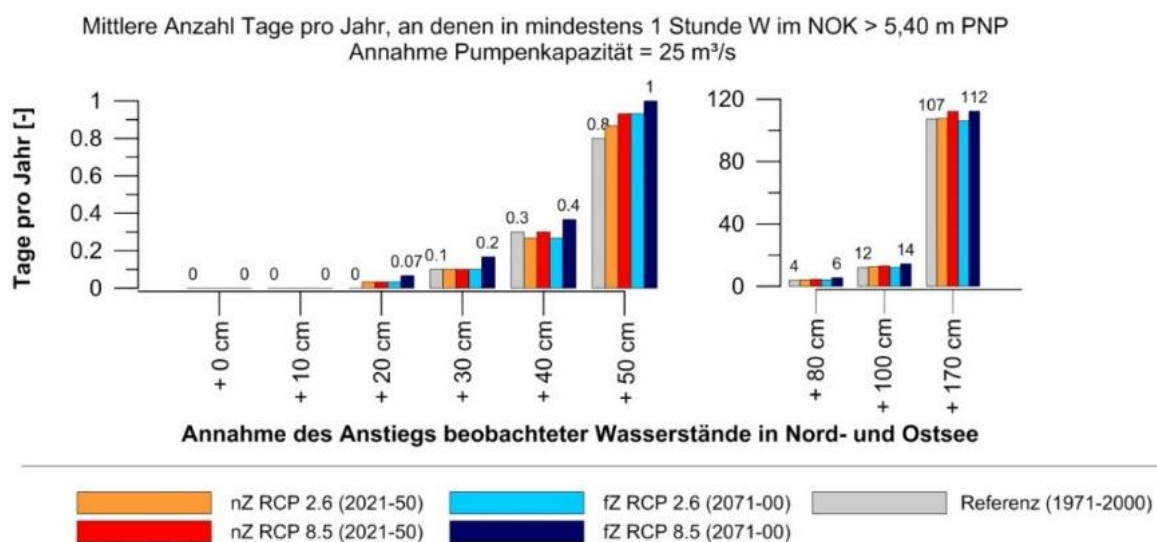


Abbildung 5-27: Siehe Abbildung 5-26, aber für die mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird (untersuchte Anpassungsoption: Pumpwerke mit einer Kapazität von 25 m³/s).

Eine Pumpenleistung von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ würde eine beinahe uneingeschränkte Begrenzung der Kanalwasserstände auf maximal $5,40 \text{ m PNP}$ erlauben. Der Einsatz von Pumpen käme in Realität jedoch nicht nur bei Wasserständen über $5,40 \text{ m PNP}$ zum Tragen, sondern auch bei niedrigeren Wasserständen, um damit Betriebssperren der Schleusen in Brunsbüttel durch Entwässerungen noch stärker zu reduzieren. Entsprechend den Berechnungsvarianten ohne Pumpeneinsatz hat auch bei Berücksichtigung verschieden dimensionierter Pumpwerke die Änderung des Zuflusses zum NOK (unter den hier angenommenen Annahmen) einen geringeren Einfluss auf kritische Bewirtschaftungssituationen als der Meeresspiegelanstieg.

Der Energieaufwand, der zum Betrieb der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Pumpwerke erforderlich ist, hängt neben der Pumpmenge maßgeblich von der zu überwindenden Hubhöhe ab. In der vorliegenden Untersuchung wurden hypothetische Pumpwerke in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau betrachtet, wobei die Hubhöhe jeweils den zeitschrittspezifischen Wasserstandsdifferenzen zwischen dem NOK und den entsprechenden Außenpegeln entspricht.

Abbildung 5-28 zeigt beispielhaft die mittlere jährlich zu leistende Hubarbeit für die (zusätzlich zur im Freigefälle stattfindenden Kanalentswässerung) eingesetzten Pumpwerke in Brunsbüttel (jeweils obere Abbildung) bzw. Kiel-Holtenau (jeweils untere Abbildung). Aufgrund der durchschnittlich kleineren Wasserstandsdifferenzen zwischen Binnen- und Außenpegel ist der mittlere jährliche Energieaufwand in Kiel-Holtenau geringer als in Brunsbüttel. Weitere Details sowie der Energieaufwand für Pumpen mit einer maximalen Kapazität von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ und $100 \text{ m}^3/\text{s}$ sind BfG (in Vorbereitung) zu entnehmen.

Zusammenfassung

Für die Vergangenheit wurde für einen Zeitraum von November 1980 bis Oktober 2012 anhand von Beobachtungsdaten bzw. auf der Grundlage von aus ihnen abgeleiteten Daten zwölf Ereignisse identifiziert, die zu Wasserständen im Kanal von $5,40 \text{ m PNP}$ ¹⁰ und darüber hinaus an einem oder mehreren Betriebspegeln im Kanal führten oder einen sehr hohen Zufluss aus dem Einzugsgebiet aufwiesen. Das entspricht einer Auftretenshäufigkeit von im Mittel alle $2,5 \text{ Jahre}$ ¹¹. Betrachtet man jedoch ausschließlich die Ereignisse, in denen der mittlere Kanalwasserstand den Grenzwasserstand von $5,40 \text{ m PNP}$ erreicht oder überschritten hat, dann reduziert sich deren Anzahl auf 5 Ereignisse. Dies entspricht einer Auftretenshäufigkeit von im Mittel alle 6 Jahre.

Bei Betrachtung des Zeitraumes verfügbarer Wasserstandsbeobachtungen im Kanal (Tagesterminwerte) von 1977–2000 (24 Jahre, entspricht in der Modellierung weitgehend dem Bezug) wurden 5 Tage registriert, an denen der Wasserstand über $5,40 \text{ m PNP}$ lag (Häufigkeit $0,2$). Die geringe Häufigkeit der Ereignisse, bei denen der Kanalwasserstand von $5,40 \text{ m PNP}$ erreicht oder überschritten wird, zeigt sich auch bei den Untersuchungen zur Auftretenshäufigkeit dieser Ereignisse unter Berücksichtigung des Klimawandels. Es wurde dafür die mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ausgewertet, in denen der Wasserstand von $5,40 \text{ m PNP}$ in mindestens 1 Stunde erreicht oder überschritten wird:

- In der Referenzsimulation (1971–2000) ist die mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr, in denen der Wasserstand von $5,40 \text{ m PNP}$ in mindestens einer Stunde überschritten wird, gleich Null. Dies entspricht weitgehend der Beobachtung¹².
- Es zeigte sich eine Zunahme der mittleren Anzahl an Tagen mit Wasserständen über $5,40 \text{ m PNP}$ bei steigenden Außenwasserständen.

¹⁰ Einstellung der Schifffahrt

¹¹ Ereignisse mit Wasserstand über $5,40 \text{ m PNP}$ und / oder hohem Zufluss aus dem Einzugsgebiet. Fehlende Wasserstandsbeobachtungen für den Kanal lassen für einige Ereignisse keine Aussage zu Überschreitung / Unterschreitung von $5,40 \text{ m PNP}$ zu.

¹² Bezogen auf die Ereignisse, in denen der mittlere Kanalwasserstand $5,40 \text{ m PNP}$ erreicht oder überschritten hat (Zeiträume 1977 bis 2000, Oktober 1998 bis November 2012)

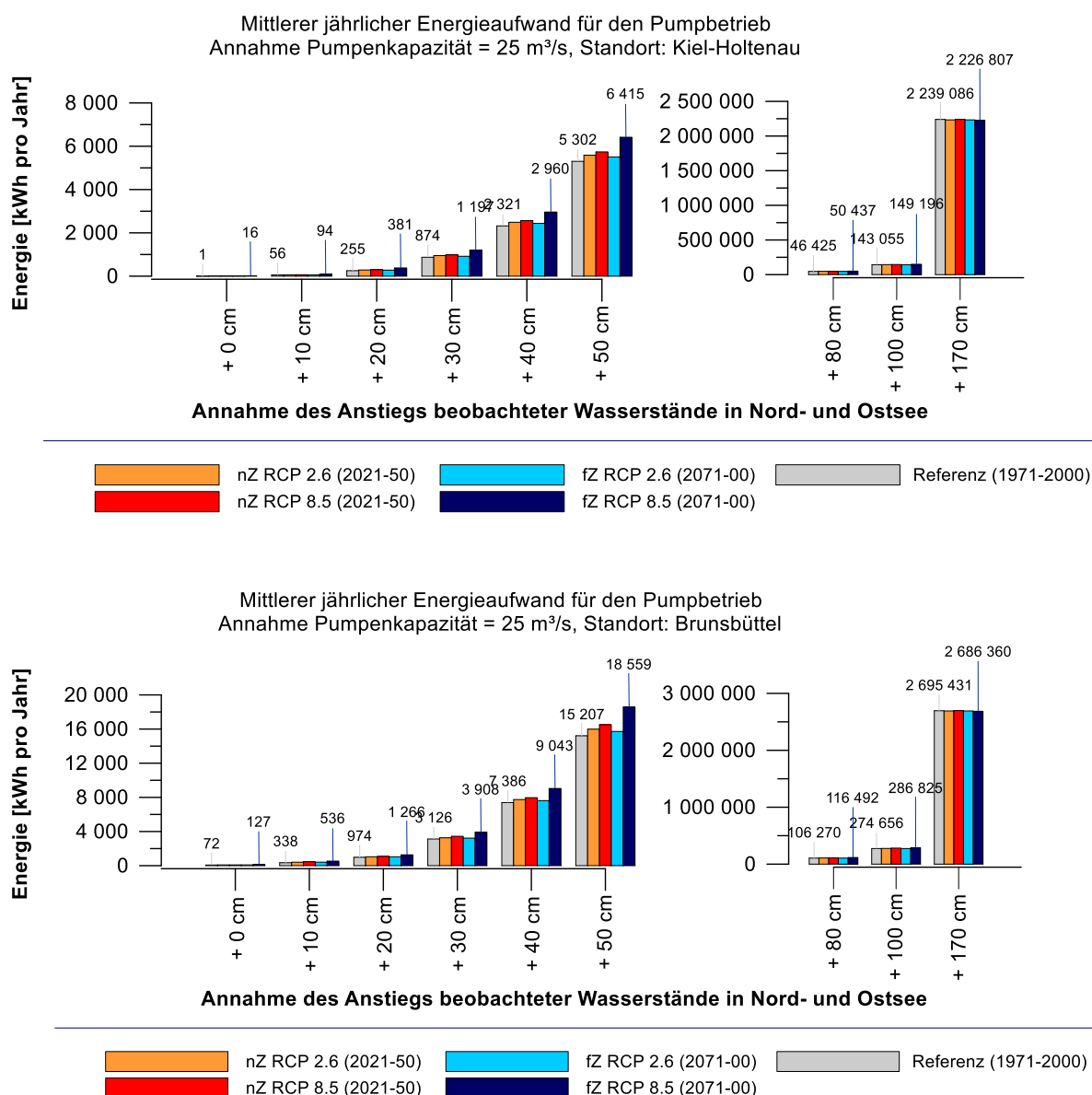


Abbildung 5-28: Siehe Abbildung 5-26, aber für den mittleren jährlichen Energieaufwand (physikalische Hubarbeit) für die alternativen Pumpenstandorte Brunsbüttel (oben) und Kiel-Holtenau (unten) bei Annahme einer Pumpenkapazität von 25 m³/s.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Entwässerungskapazitäten in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau ausreichend groß sind, um den Kanalwasserstand unter gegenwärtigen Bedingungen (bzw. in der jüngsten Vergangenheit) weitgehend unterhalb der kritischen Marke von 5,40 m PNP zu halten. Die Entwässerungskapazitäten beider Standorte werden jedoch benötigt, um den Kanal mit dem Ziel der Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt bewirtschaften zu können. Nichtsdestotrotz traten in der Vergangenheit temporär Überschreitungen der Wasserstandsmarke von 5,40 m PNP auf. Bei zunehmendem Meeresspiegelanstieg ist – ohne Anpassungsstrategie und je nach Ausmaß des Anstiegs – mit einer deutlichen Zunahme kritischer Bewirtschaftungssituationen zu rechnen. Als Anpassungsoption wurde der zusätzliche Einsatz von Pumpwerken zur Kanalentswässerung untersucht. Hier wurde gezeigt:

- Bereits bei einer Pumpkapazität von 25 m³/s würde sich die Häufigkeit kritischer Situationen um bis zu zwei Drittel reduzieren, höhere Pumpkapazitäten würden zu größeren Entlastungen führen.

- Mit steigender Pumpkapazität erhöht sich der Energieaufwand. Dieser hängt zusätzlich auch vom Standort des Pumpwerkes (Brunsbüttel, Kiel-Holtenau) bzw. von der Anordnung der Pumprohre (Hubhöhe) ab.
- Die Entscheidung für die Installation eines Pumpwerkes und dessen Kapazität sollte im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Abwägung getroffen werden (Kosten: Installation, Instandhaltung unter Berücksichtigung von Nicht-Betriebszeiten, Nutzen: Reduktion wirtschaftlicher Einbußen durch Kanalsperrungen).

Ausblick

Zukünftige Untersuchungen sollten den Fokus auf die Minimierung der detailliert in BfG (in Vorbereitung) vorgestellten Unsicherheiten legen:

- Die Berücksichtigung physikalisch begründeter Zeitreihen des projizierten Meeresspiegelanstiegs (im Gegensatz zur pauschalen Erhöhung der beobachteten Wasserstandsreihen).
- Die Berücksichtigung physikalisch gekoppelter Projektionen der Veränderungen von Meeresspiegel und Binnenhydrologie.
- Die Verbesserung der Modellgüte bei der Zuflusssimulation zum NOK, d. h. die Verringerung bestehender Defizite bei der Abbildung von kurzzeitigen Hochwasserwellen (Scheitel und Wellenform).
- Weitere Konsolidierung simulierter Entwässerungsmengen des NOK durch Messungen.
- Hydraulische Untersuchungen zum Einfluss räumlich differenzierter Zuflussreihen zum NOK auf die Kanalwasserstände im Vergleich zu kumulativen Zuflussreihen.
- Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Zeitdiskretisierung in den Zuflussreihen zum NOK auf die Kanalwasserstände (z. B. Unterschied Tages- und Stundenzeitschritt).

Darüber hinaus werden in der zweiten Projektphase neue Fragestellungen untersucht werden:

- Interaktion des Kanalwassers mit dem Grundwasser.
- Verhalten des Salzgehaltes im Kanal bei Änderung in Nord- und Ostsee und Vertiefung des Kanalbettes.
- Ökologische Beurteilung der Auswirkungen bei geänderter Wasserbewirtschaftung und Meeresspiegelanstiegs.

5.4.2 NOK - Prädiktoransatz zur Bestimmung angespannter Entwässerungssituationen

- Unter den gewählten Szenarienannahmen (*Weiter-nie-bisher-Szenario* oder *high-end-Szenario*) ist von einer deutlichen Zunahme von bisher bereits auftretenden Grenzzuständen der Bewirtschaftung des NOK auszugehen. Schon ein Meeresspiegelanstieg von 55 cm bis 2100 führt für das *Weiter-nie-bisher-Szenario* zu einem Rückgang der potentiellen Entwässerungsleistung um über 40 %. Im Falle des *high-end-Szenarios* könnte der Kanal zum Ende des Jahrhunderts fast nicht mehr im freien Gefälle entwässert werden.
- Zudem ist mit häufigeren Wetterlagen aus Nordwest zu rechnen, die angespannte Entwässerungssituationen zur Folge haben könnten, da sie mit erhöhten Pegelständen wie auch erhöhten Niederschlägen korrelieren.

Niederschlagsindizes

Ungünstige Situationen für die Entwässerung bei langanhaltenden, aber nicht extremen Niederschlägen wurden aus atmosphärischer Sicht anhand der beiden Indizes nach Schröter et al. (2015) ausgewertet: (1) Dem dreitägigen Ereignisniederschlag und (2) dem 30-tägigen Vorfeuchteindex API.

Der „Prädiktorenansatz“ (Abbildung 4-3) wurde als Erstes in der Gegenwart getestet. Erste Ergebnisse aus Untersuchungen in Schleswig-Holstein (Schade 2017) hatten bereits gezeigt, dass die beiden Indizes, hier bestimmt aus den REGNIE Niederschlagsdaten des DWD (Rauthe et al. 2013), regionale Hochwasserereignisse beschreiben können. Da das Einzugsgebiet des NOK nur zu ca. 40 % durch Pegel überwacht ist, sind die Zuflusswerte der BfG die einzig nutzbaren Referenzdaten, um Vergleiche mit den Niederschlagsindizes anzustellen. Hier ergaben sich für die Gegenwart die besten Übereinstimmungen zwischen Zufluss in den NOK aus dem LARSIM Modell der BfG und dem Vorfeuchteindex API im hydrologischen Winter (Abbildung 5-29, links). Dabei werden einige der beobachteten angespannten Situationen durch den API nahezu perfekt abgebildet, wie z. B. ein Ereignis Anfang des Jahres 2012 (Abbildung 5-29, rechts).

Der Ereignisniederschlag spielt eine untergeordnete Rolle, nur im hydrologischen Sommer, wenn der Boden ausgetrocknet ist und das Wasser nicht versickern kann, kann es zu erhöhten Zuflüssen in den NOK kommen. Derartige Ereignisse spielen für die Entwässerung des NOK aber kaum eine Rolle, da der Außenwasserstand dann im Normalfall eine Entwässerung erlaubt (Im Zeitraum von 1979–2012 wurden nur drei derartige Ereignisse gefunden).

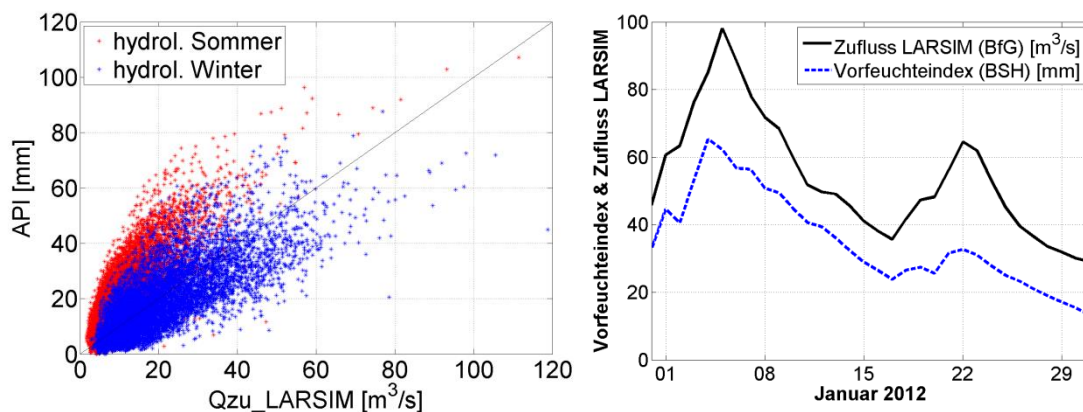


Abbildung 5-29: Vorfeuchteindex API in mm im Einzugsgebiet des NOK im Vergleich zu den Zuflussdaten aus dem LARSIM Modell der BfG in m^3/s für das hydrologische Sommer- bzw. Winterhalbjahr im Zeitraum von 1961–2014 (links), sowie beispielhaft dargestellt für den Januar 2012 (rechts).

Abbildung 5-30 zeigt nun die Ergebnisse des Vorfeuchteindex im *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die gekoppelten Läufe des MPI-OM/REMO Modells (Lauf 1-3) im Vergleich mit den gekoppelten NEMO/RCA4-Läufen mit insgesamt fünf verschiedenen Globalmodellantrieben. Deutlich zu erkennen ist, dass die am Rand durch das MPI ESM LR Modell angetriebenen Läufe einen sehr ähnlichen Verlauf haben (alle 3 MPI-OM/REMO Läufe und der RCA4/NEMO MPI ESM LR Lauf). Weiterhin fällt auf, dass 6 der 8 Modellläufe trotz unterliegender großer dekadischer Variabilität und deutlichen Unterschieden in den Startwerten einen Anstieg von 3-4 mm bis zum Ende des Jahrhunderts prognostizieren. Derzeit noch laufende Untersuchungen zum *Klimaschutzszenario* und dem *moderaten Szenario* zeigen kaum bis keine Veränderungen (nicht gezeigt).

Des Weiteren wurden im Rahmen einer Analyse im Einzugsgebiet des NOK angespannte Entwässerungssituationen untersucht, bei denen ein zusätzlich vorherrschender Windstau bzw. der Außenwasserstand in Brunsbüttel ein Entwässern des Kanals über mehrere Tidezyklen hinweg verhindert (Ganske et al. 2017). Dabei wurde deutlich, dass bei den beobachteten Situationen fast immer ein erhöhter Außenwasserstand bzw. anhaltender Windstau vorlag, der verhinderte, dass das zugeführte Wasser aus dem Kanal gebracht werden konnte. Diese Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen der BfG (Kapitel 5.4.1).

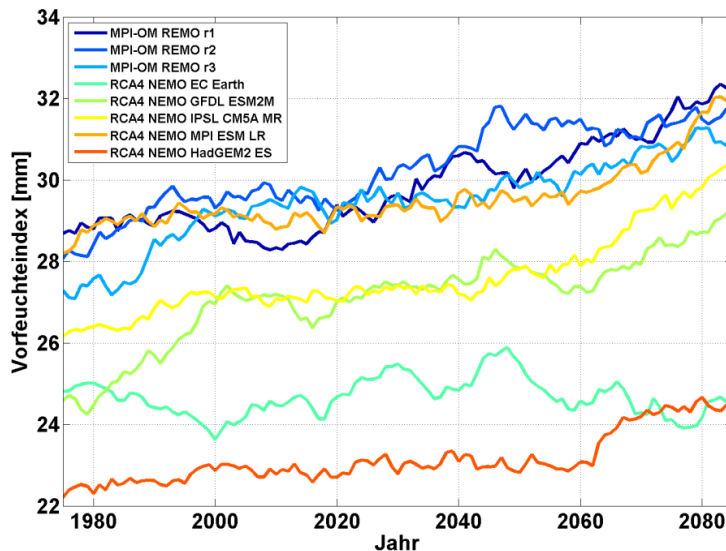


Abbildung 5-30: 30-jährige gleitende Mittelwerte des Vorfeuchteindex API im *Weiter-nie-bisher-Szenario* für die 3 gekoppelten Läufe des MPI-OM/REMO Modells (blaue Kurven) und die 5 gekoppelten Läufe des RCA4/NEMO mit unterschiedlichen Globalmodellen als Antrieb am Rand.

5.4.2.1 Wetterlagen über der Nordsee

Um besser zu verstehen, welche Wetterlagen mit einer angespannten Entwässerungssituation am NOK in Verbindung gebracht werden können, wurden ein Zusammenhang der jeweiligen Wetterlagentypen mit Pegeldaten des Außenwasserstandes in Cuxhaven für das NOK-Einzugsgebiet hergestellt. Hierfür wurde jeweils aus den beiden Modellen NEMO/RCA4 und MPI-OM/REMO verglichen, welche Wetterlagen mit hohen Werten (95. bzw. 99. Perzentil) des Pegelstandes einhergehen.

Es konnte festgestellt werden, dass besonders die Wetterlage NW an Tagen mit hohen Pegelwerten in Cuxhaven vorlag (Abbildung 5-31, links und mittig). Auch die Wetterlagen C und SW lagen mit einem Tag über hohen Pegelständen zusammen.

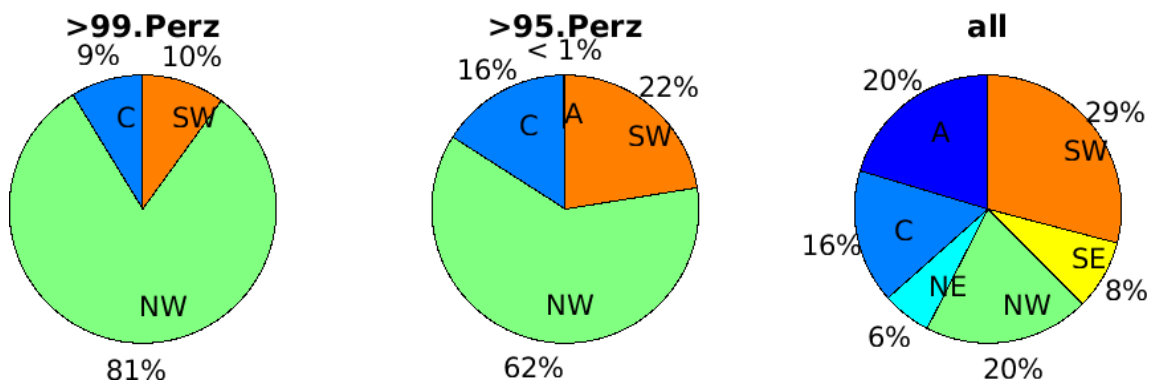


Abbildung 5-31: Relative Häufigkeitsverteilungen der Wetterlagen in % für Tage mit einem mittleren Pegelwasserstand in Cuxhaven über dem 99. Perzentil (links), über dem 95. Perzentil (mittig) und für alle Tage (rechts) für den Zeitraum 1979–2001, beispielhaft dargestellt für den Lauf NEMO/RCA4/IPSL-CM5A-MR.

Der Anteil der Wetterlage NW ist an Tagen mit Pegelstand über dem 99. Perzentil um deutlich über 200 % (teilweise sogar über 400 %) höher als ihr Anteil in der relativen Häufigkeitsverteilung für alle Tage. Das entspricht einem Anstieg von 19 % auf 85 % (für den Lauf NEMO/RCA4/IPSL-CM5A-MR, ähnliche Ergebnisse konnten für alle untersuchten Modellläufe festgestellt werden). Auch die Wetterlagen C und SW fallen mit einem hohen Pegelstand zusammen. Ihr Anteil wird jedoch geringer, als ihr Anteil in der relativen Häufigkeitsverteilung für alle Tage. In beiden Modellfamilien NEMO/RCA4 und MPI-OM/REMO wurden keine Wetterlage der Klassen A, NE oder SE bei einem Pegelstand über dem 99. Perzentil festgestellt.

In der Umkehrung wird überprüft, wie die Verteilung der Pegelstände über einem bestimmten Wasserstand für alle Wetterlagen ist. Es ist zu erkennen, dass während NW Wetterlagen häufig (16–23 % relative Häufigkeit) der Pegelstand über dem 95. Perzentil liegt. Zu kleineren Anteilen (~5 %) sind hohe Pegelstände auch bei einer C oder SW Wetterlage vertreten. Dies zeigt, dass zwar nicht direkt von der Wetterlage auf den Pegelstand geschlossen werden kann, dass es für bestimmte Wetterlagen jedoch einen deutlichen Zusammenhang gibt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass besonders die Wetterlagenklasse NW einen Einfluss auf den Pegelstand in Cuxhaven und damit auf die Entwässerung des NOK hat. Dieser Zusammenhang ist im Winter und Sommer noch stärker ausgeprägt, als im Frühjahr und Herbst (Jensen 2019). Auch die Wetterlagen C und SW können als potenziell kritische Wetterlagen für die Entwässerung des NOK eingestuft werden, da sie mit einem Teil der Tage mit hohen Pegelständen zusammenfallen. Die übrigen Wetterklassen (A, NE und SE) können als unauffällige Wetterlagen für die Entwässerung des NOK eingestuft werden. Die Trendanalyse zeigte, dass die Wetterlagenklasse NW in den betrachteten Modellläufen über den Zeitraum 1961–2100 signifikant zunimmt und die Klasse SE signifikant abnimmt. Die relativen Änderungen der relativen Häufigkeiten zwischen dem *Bezugszeitraum* (1970–2000) und dem Ende des Jahrhunderts (2070–2099) liegen für die Wetterlage NW bei +7–30 % und für die Wetterlage SE zwischen -13 % und -35 %.

5.4.2.2 Entwässerung des NOK

Die Entwässerung erfolgt in der Regel im Zeitfenster des meeresseitigen Tideniedrigwasserstands. Dies geschieht zu 90 % über die Schleuse Brunsbüttel in die tidebeeinflusste Elbe/Nordsee, da die Wasserstandsdifferenz hier meist eine deutlich effektivere Entwässerung ermöglicht als über Kiel-Holtenau in die Ostsee. Es zeigt sich jedoch, dass oft die effektivste Entwässerung im Zusammenspiel der Schleusen Brunsbüttel und Kiel-Holtenau möglich ist, da beispielsweise ein positiver Windstau in Brunsbüttel mit einem negativen Windstau in Kiel-Holtenau einhergeht. Diese Entwässerung wird auch ohne zukünftige stärkere Niederschläge alleine schon durch den Meeresspiegelanstieg und Landsenkungen schwieriger werden, da dadurch das Entwässerungszeitfenster verringert wird.

Um den Einfluss der kurzzeitigen Variabilität im Meeresspiegelanstieg etwas zu verringern, wurden gleitende Mittel über 30 Jahre bestimmt. So konnte das Entwässerungspotential der Zukunft bei steigendem Meeresspiegel mit dem der Gegenwart verglichen werden. Abbildung 5-32 zeigt ein Beispiel für Modellergebnisse aus dem global gekoppelten Klimamodell MPI-OM im *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Zusätzlich sind noch Landsenkungsaspekte und Abschätzungen für das beschleunigte Abschmelzen der Polkappen berücksichtigt.

Schon ein Meeresspiegelanstieg von 55 cm bis 2100 führt zu einem Rückgang der potentiellen Entwässerungsleistung um über 40 %. Bei der Annahme eines Meeresspiegelanstiegs von 1,74 m bis 2100 (dies entspricht dem 95. Perzentil für Hamburg aus Grinsted et al. 2015) würde schon zum Ende des 21. Jahrhunderts die potentielle jährliche Entwässerungsleistung unterhalb der heute schon nötigen jährlichen Entwässerungsleistung liegen. Der NOK könnte also spätestens dann fast nicht mehr im freien Gefälle entwässert werden.

Extrem hohe Tideniedrigwasserstände reduzieren oder verhindern sogar die Möglichkeit zur Entwässerung. Während es normalerweise nicht schwierig ist, eine Tidephase ohne Entwässerung zu überbrücken, ist es eine Herausforderung für den Fall, dass zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Tideniedrigwasser, die höher sind als der Wasserstand im NOK (mindestens 480 cm über PNP), auftreten. Tabelle 5-10 zeigt dazu Ereignisse von 1–6 aufeinanderfolgenden Niedrigwassern mit Wasserständen oberhalb des kritischen Levels für 30-Jahresperioden aus dem MPI-OM/REMO RCP8.5 Lauf 1. Es ist ein rapider Anstieg an aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern auszumachen, der zudem noch statistisch signifikant ist (auf dem 99 % Level), insbesondere für 5 und 6 aufeinanderfolgende Ereignisse. Aktuell ergeben sich aus den 516 einzelnen Niedrigwassern oberhalb des kritischen Wasserstands in der Zeitscheibe 1981–2010 im Durchschnitt etwa 17 Ereignisse pro Jahr. Diese Zahl wird sich in Zukunft durch den Meeresspiegelanstieg deutlich erhöhen.

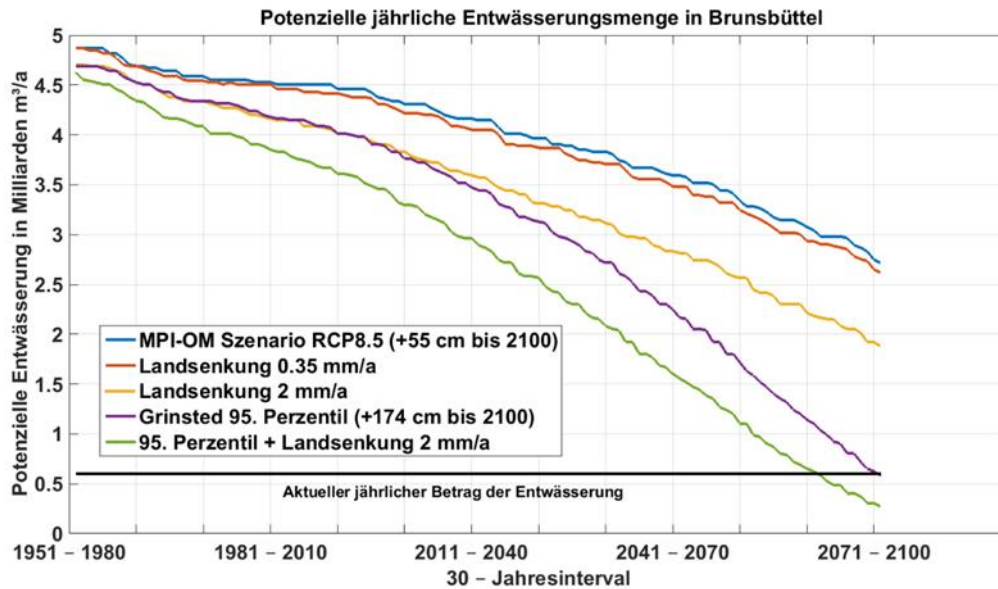


Abbildung 5-32: Potenzielle jährliche Entwässerungsmenge in m^3/Jahr in Brunsbüttel, berechnet mithilfe stündlicher Wasserstandsdaten aus dem gekoppelten Klimamodell MPI-OM im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (blau) und mit zusätzlich angenommener Landsenkung von 0,35 mm/Jahr (rot) bzw. 2 mm/Jahr (gelb). Dargestellt ist außerdem ein zusätzlich angenommener Meeresspiegelanstieg von 1,74 m bis 2100, wie in Grinsted et al. (2015) im 95. Perzentil berechnet (violett) mit zusätzlicher Landsenkung von 2 mm/Jahr (grün).

Tabelle 5-10: Anzahl von Ereignissen pro 30-Jahresperiode, bei denen das Niedrigwasser (NW) in Brunsbüttel höher als der Betriebswasserstand im NOK ist, dargestellt für N = 1 bis 6 aufeinanderfolgende Niedrigwasser.

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

5.4.2.3 Anwendungen

Mit Hilfe des oben beschriebenen Modellsystems konnten Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOKs identifiziert und mögliche zukünftige Änderungen in deren Auftreten abgeleitet werden. Diese Analysen liefern einen wichtigen Beitrag zur Anpassungsstrategie des Bundes an den Klimawandel. Diese Aufgabe ist im Fortschrittbericht Deutsche Anpassung an den Klimawandel, APA II (Bundesregierung 2015) der Bundesregierung dargestellt. Die WSV sieht die hier beschriebenen Ergebnisse als essentielle Basis zur Entscheidungsfindung an, um den Einschränkungen der Entwässerung des NOK durch den Meeresspiegelanstieg und Änderungen im Niederschlag entgegen wirken zu können. Es werden dabei zwei Optionen berücksichtigt: A – ein angepasstes Wassermanagement und B – Neubau der Schleusen.

Zu Punkt A können vorausschauende Vorgehensweisen, z. B. langzeitliche Handlungsoptionen, wie die Bereitstellung von Überflutungsgebieten oder der Neubau einer Pumpstation genannt werden. Neubau und Ersatz von Schleusen, die einen ungestörten Schiffsverkehr im NOK ermöglichen sollen, werden anhand der aktuellen Erkenntnisse zum beschleunigten Meeresspiegelanstieg geplant. Die WSV wird hier die neuen

Zahlen zum projizierten SLR von 1,74 m (Grinsted et al. 2015) anstelle der bisher im Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung (MELUR-SH 2012) berücksichtigten 0,50 m beachten. In diesem Prozess wird auch die Schleuse in Kiel-Holtenau derart geplant, dass eine nachträgliche Anpassung der Konstruktion anhand der aktuellen Werte des SLR möglich sein wird, was im Gegenzug auch eine Optimierung des Ressourcenverbrauchs anhand des tatsächlichen Bedarfs sicherstellt. Beispielsweise wurden die Konstruktionspläne zum Bau der Schleusentore anhand des Optimierungsprozesses verändert und angepasst.

5.4.2.4 Ausblick

Als langfristiges Ziel sollen kombinierte Auftretenswahrscheinlichkeiten von starken bzw. langanhaltenden Niederschlägen und hohen Außenwasserständen anhand eines Ensembles von Klimamodellen untersucht werden. Ferner soll die beschriebene Methodik in Zusammenarbeit mit der BfG und WSV auf andere Einzugsgebiete an der Küste (z. B. die Eider) angewendet werden.

Die Ergebnisse der „Pilotstudie NOK“ wurden als Fallstudie in den demnächst erscheinenden Endbericht der UNECE Group of Experts on the Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes aufgenommen¹³.

Für die Gegenwart hat sich bereits gezeigt, dass in den letzten Jahrzehnten im Nordosten Deutschlands signifikante positive Trends für Vorfeuchte und Ereignisniederschlag zu erkennen sind (Schade 2017). Dabei ist zu beachten, dass je nach Auswahl des untersuchten Zeitraums und des Untersuchungsgebiets unterschiedliche Trends erkennbar sind (Abbildung 5-33): So sind die signifikanten Trends über 30-jährige gleitende Zeitscheiben des 3-tägigen Ereignisniederschlags im Norden Deutschlands, wie im Einzugsgebiet des NOK und Schleswig-Holstein gesamt (blaue und lila Kurve), durchweg positiv und über den gesamten Zeitraum deutlich größer als für Gesamtdeutschland (rote Kurve). D. h., im Norden wird es nasser. Etwas weniger deutlich ist dies auch für die Vorfeuchte zu beobachten (nicht gezeigt). Die Muster passen dabei gut zu beobachteten Verlagerung der Zyklonzugbahnen nach Nordosten (Nordsee, z. B. Stendel et al. 2016) bzw. Norden (Ostsee, z. B. Rutgersson et al. 2014) und der damit verbundenen Niederschlagsereignisse.

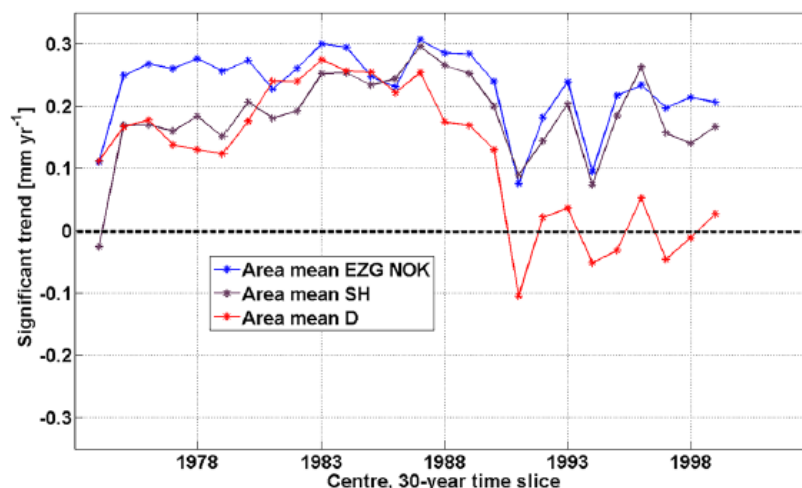


Abbildung 5-33: Mittlere signifikante Trends (oberhalb 95 % Signifikanzlevel) über 30-jährige gleitende Zeitscheiben von 1960–89 bis 1985–2014 in Millimetern pro Jahr für die fünf höchsten 3-Tages Ereignisniederschläge pro Jahr für das Einzugsgebiet des NOK (blau), Schleswig-Holstein (lila) und Deutschland (rot), bestimmt aus dem REGNIE Datensatz des DWD (Quelle: Schade 2017, Abbildung 12).

¹³ Für Informationen zur UNECE Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes siehe <https://www.unece.org/trans/areas-of-work/trends-and-economics/activities/group-of-experts-on-climate-change-impacts-and-adaptation-for-transport-networks-and-nodes-wp5ge3.html>

Was beide Indizes gleichermaßen aufzeigen ist die starke dekadische Variabilität: Verschiebt man den Betrachtungszeitraum nur um ein Jahr können sprunghafte Unterschiede in den Trends auftreten. Dies ist auch ein Zeichen dafür, dass einzelne Jahre für einen ausgewählten Untersuchungszeitraum bestimmend sein können. Nimmt man diese aus der Analyse, so erhält man teils vollkommen unterschiedliche Werte in den Trends, u. U. sogar einen Vorzeichenwechsel. Es wird zudem noch einmal deutlich, dass auch für zukünftige Untersuchungen ein Zeitraum von idealerweise mehr als 30 Jahren betrachtet werden muss, und die einfache Aufteilung in Zeitscheiben für *nabe* und *ferne Zukunft* anfällig für Aliasing ist, was ggf. zu falschen Rückschlüssen in der Interpretation führen kann.

Es besteht somit weiterer Forschungsbedarf, um belastbare Aussagen über zeitgleiches Auftreten von erhöhten Außenwasserständen und Binnenniederschlägen (und damit möglicher Gefahr der Überflutung von Verkehrsinfrastruktur in betreffenden Gebieten) treffen zu können. Weiterführende Untersuchungen zum NOK und eine Ausweitung auf das Einzugsgebiet der Eider sind für die Phase II des Expertennetzwerks angedacht. Weitere Küstengebiete, die bisher noch nicht betrachtet werden konnten, sollen ebenfalls mit einbezogen werden. Anhand eigener Untersuchungen sowie bereits vorliegender Ergebnisse aus anderen Projekten soll eine möglichst ganzheitliche Betrachtung angestrebt werden. Im Folgenden werden dazu drei bereits abgeschlossene Projekte kurz vorgestellt, deren Ergebnisse für die Untersuchungen des Expertennetzwerks in Küstengebieten von Bedeutung sind.

5.4.3 Untersuchungen verwandter externer Projekte in Küstengebieten

- Im Verbandsgebiets Emden werden sich die potentielle Sielzeiten bei einem Meeresspiegelanstieg von 50 bis 110 cm zum Ende des Jahrhunderts bis 2040/2060 halbieren und bis 2060/2080 kaum noch Kapazitäten bestehen. Maximal möglicher Schutz lässt sich nur durch Kombination von Anpassungsmaßnahmen und -typen erreichen (Spiekermann et al. 2018).
- In den Niederungsgebieten (von Schleswig-Holstein) wird die Möglichkeiten zur Entwässerung über Siel gegenüber Schöpfwerken bis 2070 deutlich abnehmen. Handlungsoptionen bestehen in der Optimierung des Siel- und Schöpfwerksbetriebs, dem Aus- und Neubau von Schöpfwerken, aber auch der Einrichtung von Retentionsraum im betreffenden Einzugsgebiet, um u. a. auch die Verkehrsinfrastruktur zu erhalten (AG Niederungen 2050 2014).
- Die Simulation möglicher Auswirkungen von extremen Sturmfluten und die Diskussion von Handlungsoptionen im Projekt EXTREMENESS zeigten, dass der Küstenschutz in Ostfriesland gegenwärtig gut aufgestellt ist, aber Bedarf an weiteren Untersuchungen zum Auftreten und möglichen Auswirkungen kaskadierender Effekte besteht. EXTREMENESS hat damit wesentliche Beiträge zur Diskussion über Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes geliefert, die unter anderem auch Eingang in die aktuelle Katastrophenschutzübung der Stadt Emden fanden (Schaper et al. submitted).

5.4.3.1 Klimaoptimiertes Entwässerungsmanagement im Verbandsgebiet Emden (KLEVER)

Ziel des Projekts bestand darin, die zu erwartenden Auswirkungen der sich im Klimawandel ändernden Einflussfaktoren auf die Binnenentwässerung des Verbandsgebiets Emden zu untersuchen, denkbare Maßnahmenoptionen zur Anpassung zu identifizieren und zu bewerten, sowie ausgewählte Maßnahmenoptionen hinsichtlich ihrer potenziellen Wirksamkeit zu quantifizieren (Spiekermann et al. 2018).

Die Ergebnisse basieren hier auf Analysen eines Modellensembles aus drei regionalen Klimamodellen (REMO, WETTREG und XDS) und insgesamt fünf Szenarien (RCP4.5, RCP8.5, A2, A1B, B2) und zeigen, dass die Entwässerung unter dem *Weiter-wie-bisher-Szenario* sogar noch problematischer werden wird, als im Einzugsgebiet des NOK. Dies liegt unter anderem daran, dass das Verbandsgebiet Emden bereits heute zu 40 % über Pumpen entwässert werden muss. Zusätzlich ist bis Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme

des jährlichen Abflusses von bis zu 13 % zu rechnen, wobei die Werte im Sommer sogar eher abnehmen, die Änderungen im Winter aber bis zu +26 % betragen könnten. Diese Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen zum Niederschlag des BMVI-Expertenetzwerks (BMVI-Expertenetzwerk 2020, Brien et al. 2020). Ferner ist eine deutliche Verstärkung extremer Abflussereignisse (bezogen auf Wochen- und Tageswerte) zu erwarten (Spiekermann et al. 2018, Abbildung S.25).

Szenarien der Flächenversiegelung liefern eine weitere 5-12 % Zunahme im Abfluss. Schließlich wurde auch der Meeresspiegelanstieg berücksichtigt: Wird von einem Anstieg von 50 bis 110 cm bis 2100 ausgegangen, so werden sich die potentielle Sielzeiten bis 2040 (95. Perzentil des RCP8.5) bzw. 2060 (50. Perzentil des RCP4.5) halbieren und bis 2060 bzw. 2080 kaum noch Kapazitäten bestehen. Beispielhaft ist dies für das Siel- und Schöpfwerk Knock in Abbildung 5-34 dargestellt.

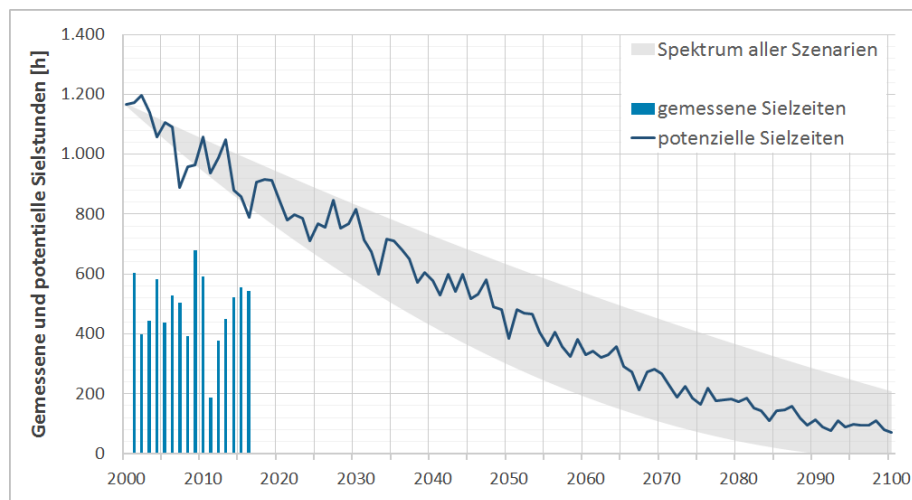


Abbildung 5-34: Berechnung potenzieller Sielzeiten bis 2100 für das Siel- und Schöpfwerk Knock anhand der Auswertung des IPCC-Szenarienspektrums des Meeresspiegelanstiegs für die Deutsche Bucht und der Binnenzielwasserstände im Verbandsgebiet. Der grau hinterlegte Bereich zeigt das Spektrum aller Szenarien (jeweils Mittelwert und 95. Perzentil des *moderaten* bzw. *Weiter-nie-bisher-Szenarios*) der potenziellen Sielzeiten. In dunkelblau ist der Mittelwert der vier Szenarien dargestellt. Die blauen Balken veranschaulichen die genutzten Sielzeiträume an der Knock von 2001–2016 (Spiekermann et al. 2018, Abbildung 18, S.26).

Neben dem Binnenhochwasserschutz sind weitere Anforderungen an das Entwässerungsmanagement im Bereich der Landwirtschaft, des Tourismus/Freizeit und des Ökosystemschutzes gegeben. Diese wurden im Rahmen eines Beteiligungsprozesses mit betreffenden Akteuren diskutiert und bewertet. Es entstand ein konkreter Maßnahmenkatalog, der im Anhang des Ergebnisberichts zu finden ist. Höchste Zustimmung erhielten demnach Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung, Retention Boden, Regenrückhaltung, Speicherpolder und Siedlungsentwässerung. Als Ergebnis kann hier festgehalten werden, dass die maximale mögliche Wirkung durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen und Maßnahmentypen erreicht wird. Bisher nicht berücksichtigt wurden dabei verkehrsträgerspezifische Untersuchungen. Die zusammengetragenen Ideen und Vorschläge könnten aber als Ansatzpunkte für weitere Überlegungen und konkrete Planungen im Verbandsgebiet Emden sowie in vergleichbaren Küstenräumen dienen, ebenso die Methoden zur Beteiligung von Akteuren.

5.4.3.2 AG Niederungen 2050

Zu ähnlichen Ergebnissen kam die AG Niederungen 2050 in ihrem Abschlussbericht (AG Niederungen 2050 2014) zur Entwässerung der Niederungsgebiete Schleswig-Holsteins: Abbildung 5-35 zeigt die aktuelle (links) und die für das Jahr 2070 projizierte (rechts) Entwässerungssituation. Deutlich zu erkennen ist, dass die Möglichkeiten zur Entwässerung über Siel (rot) gegenüber Schöpfwerken (grün) abgenommen haben.

Als Datengrundlage für die Untersuchungen wurde der Norddeutsche Klimaatlas¹⁴ herangezogen und für die Region Schleswig-Holstein und Hamburg hinsichtlich der Veränderung der Niederschlagsmengen ausgewertet. Es zeigt sich eine Tendenz zunehmender Jahresniederschläge um ~5 % bis zum Jahr 2030 und bis ~10 % im Jahr 2070. Im Jahresverlauf stellt sich diese Zunahme als starker Anstieg der Niederschlagsmengen in den Wintermonaten (35 % bis 2070) und in geringerem Maße im Herbst und Frühling dar. Demgegenüber wird langfristig für die Sommermonate mit einer Abnahme der Niederschlagsmengen gerechnet. Als Grundlage für den Meeresspiegelanstieg wurde der Maximalwert des (IPCC 2007) mit 80 cm für den Zeitraum 1990–2100 als Szenario vorgeschlagen.

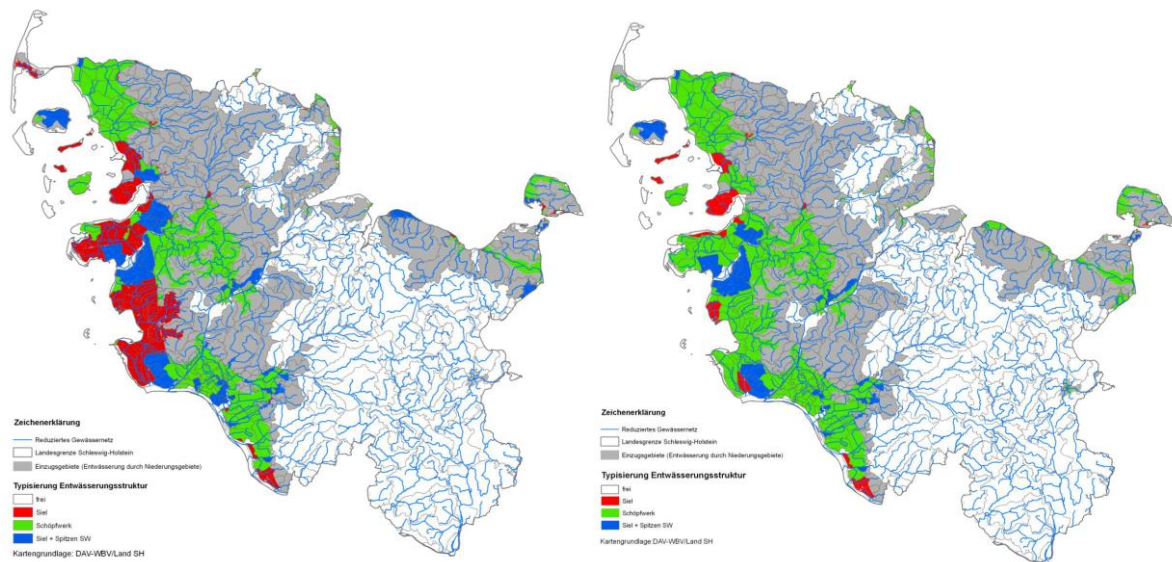


Abbildung 5-35: Aktuelle Entwässerungsstruktur der Teilgebiete in den Niederungsgebieten von Schleswig-Holstein (links, AG Niederungen 2050 2014, Abbildung 4) und Projektion der Entwässerungsstrukturen in Niederungsgebieten für das Jahr 2070 (rechts, AG Niederungen 2050 2014, Abbildung 28).

Handlungsoptionen ergaben sich demzufolge in der Optimierung des Siel- und Schöpfwerksbetriebs und dem Aus- und Neubau von Schöpfwerken, aber auch der Einrichtung von Retentionsraum im betreffenden Einzugsgebiet oder dem Einsatz erneuerbarer Energien. Forderungen zum Erhalt und der Weiterentwicklung von Entwässerungsstrukturen ergeben sich auch durch überregionale Infrastrukturen wie Straßen und Schienenwege, die durch die Niederungsgebiete hindurchführen, da alternativ sehr große Aufwendungen entstehen würden (Neubau von Straßen und damit verbundene viel weitere Fahrstrecken z. B. für Rettungsdienste und Nahverkehr). Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch eine Analyse des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, die unter Mitwirkung des BSH entstanden ist (siehe Buthe et al. 2015). Hier wurden verkehrsbedingte Auswirkungen eines extremen Sturmflutszenarios mit dem Transportstromvisualisierungsmodell und dem Erreichbarkeitsmodell des Bundesinstituts bestimmt.

Ferner bleiben Anforderungen an die Forschung weiterhin bestehen, wie die grundlegenden Untersuchungen zu lokalen Auswirkungen des Klimawandels, die Erklärung von Wirkungszusammenhängen (z. B. Auswirkung einer Veränderung des Niederschlagsregimes auf das Binnenabflussregime) sowie die Bereitstellung von aktuellen Klimaszenarien für die Planungspraxis auf lokaler Ebene (Niederschlag, Abfluss, Tidewasserstände, Sturmfluten, etc.). Dies bleibt auch eine Aufgabe des Expertennetzwerks in Phase II.

¹⁴ <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/> [Zugegriffen Januar 10, 2011].

5.4.3.3 EXTREMENESS

Das Projekt EXTREMENESS (z. B. Weisse et al. in Vorbereitung) befasste sich mit der Identifikation und der Analyse extremer Sturmflutereignisse, die zum einen sehr unwahrscheinlich aber trotzdem noch physikalisch plausibel und möglich sind. Ein wesentlicher Schwerpunkt dabei war die transdisziplinäre Herangehensweise, bei der herausgearbeitet wurde, was aus Sicht der regionalen Akteure ein Extremereignis ausmacht. Darüber hinaus wurden potentielle Auswirkungen und Möglichkeiten im Umgang mit solchen Extremereignissen untersucht.

Abbildung 5-36 zeigt für jedes der vier Arbeitspaket die wesentlichen durchzuführenden Aufgaben, sowie deren Hauptergebnisse. Zusätzlich sind die Rollen der einzelnen Projektpartner und des Kooperationsforums verdeutlicht:

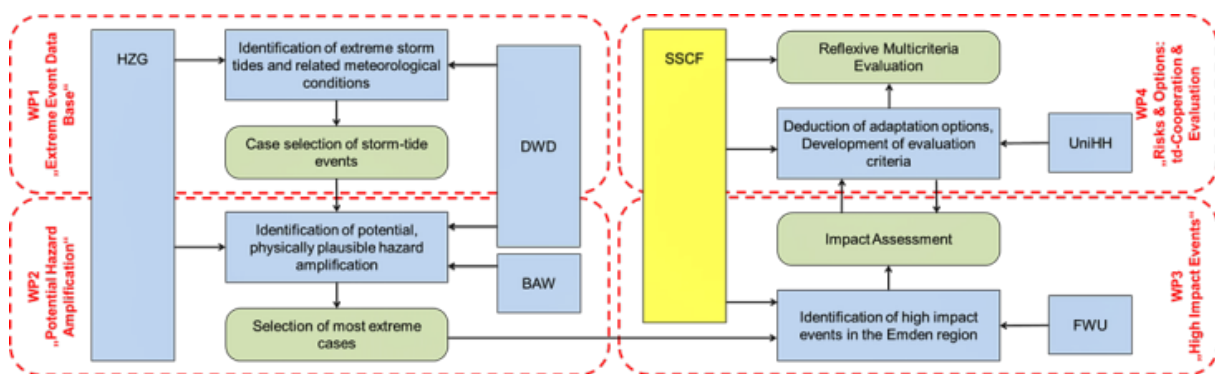


Abbildung 5-36: Darstellung der vier Arbeitspakete (WP, rot umrandet) des EXTREMENESS Projekts mit wesentlichen Aufgaben (mittige blaue und grüne Boxen) und den jeweiligen durchführenden Projektpartnern (Quelle: <https://www.hzg.de/ms/extremeness/063864/index.php.de>).

Die vom DWD analysierten meteorologischen Datensätze umfassen zusammen mehr als 12.000 Jahre. Untersucht wurden Reanalysen wie COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015), NOAA-20CR (Compo et al. 2011), ERA-40 (Uppala et al. 2005), ERA-Interim (Dee et al. 2011), ERA5¹⁵, COSMO_CLM/NCEP (Hollweg et al. 2008, Rockel et al. 2008) und NCEP/SN_REMO (Feser et al. 2001, Kalnay et al. 1996) sowie Daten aus dem Projekt OptempS-MohoWif (Brecht und Frank 2014). Des Weiteren wurde ein Ensemble von 24 Klimamodellläufen ausgewertet. Dazu gehören die globalen Klimamodelle ECHAM5 (Röckner et al. 2003), ECHAM6 (Stevens et al. 2013), HadGEM2 (Collins et al. 2011), GFDL (Anderson et al. 2004) und EC-Earth (Hazeleger et al. 2010) unter der Annahme des *Klimaschutz*, *moderaten* und *Weiter-wie-bisheer-Szenarios* bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Weitere Informationen zu den Datensätzen befinden sich in der Tabelle 9-3.

Aus den aus den Hindcasts und Klimaprojektionen extrahierten Sturmfluten für Borkum wurden die folgenden drei extremsten Fälle für die weiteren Analysen in Absprache mit den Projektpartnern und basierend auf den Ergebnissen des 1. Workshops mit dem Kooperationsforum (Schaper et al. submitted) ausgewählt. Dabei handelt es sich laut (Rudolph et al. submitted) um:

- die Sturmflut mit dem absolut höchsten Wasserstand (Hohe Flut, HF)
- die Sturmflutserie (SFS) mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche
- die Sturmflut mit der längsten Dauer von Wasserständen über dem mittleren Tidehochwasser MThw (Lange Flut, LF). Dieses Ereignis stellt gleichzeitig das erste Ereignis der Sturmflutserie (SFS) dar und wird als Teil dieser Serie behandelt.

Die Hohe Flut (Abbildung 5-37) mit einem maximalen Wasserstand von Normalhöhennull (NHN) +4,73 m wurde in einer der Klimaprojektionen basierend auf dem Emissionsszenario B1 (Februar 2030) gefunden.

¹⁵ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#/home>

Die Sturmflutserie, die gleichzeitig als *Lange Flut* auch das zweithöchste Ereignis mit einem maximalen Wasserstand von NHN +4,66 m enthält, wurde aus einer der Klimaprojektionen basierend auf dem Szenario A1B (November 2030) herausgefiltert. Die Wasserstände beider Projektionen wurden mit dem hydrodynamischen Modell TRIM-NP simuliert (vgl. Gaslikova et al. 2015).

Der höchste beobachtete Wasserstand bei Borkum von NHN +4,06 m (LLUR–SH 2013) trat während einer Sturmflut im März 1906 auf. Die zweit- und dritthöchsten Wasserstände von NHN +3,83 m und NHN +3,80 m wurden während der Sturmfluten 2006 (Tief *Britta*) und 2013 (Tief *Xaver*) gemessen (LLUR–SH 2013). Die *Hobe Flut* mit einem maximalen Wasserstand von NHN +4,73 m und die *Lange Flut* mit NHN +4,66 m übertreffen das beobachtete Hochwasser von 1906 um ca. 60–65 cm. Somit sind die beiden ausgewählten simulierten Ereignisse auch ohne weitere Verstärkung deutlich extremer als bisher beobachtete Ereignisse.

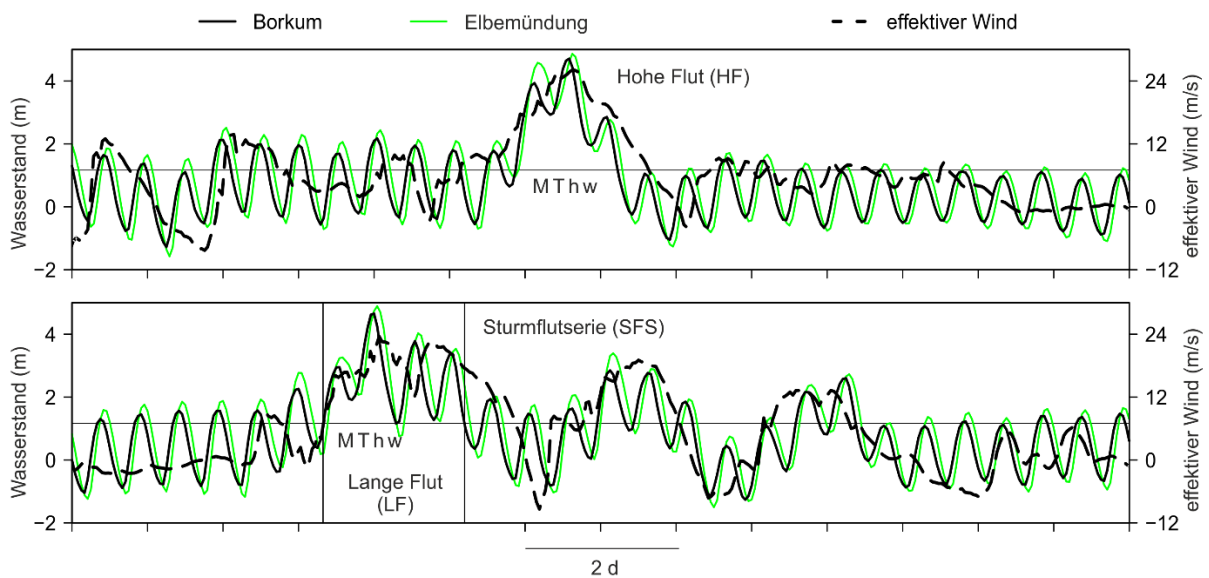


Abbildung 5-37: Zeitreihen des Wasserstands für die ausgewählten Ereignisse Hohe Flut (oben) und Lange Flut/Sturmflutserie (unten) aus den Originalmodell Datensätzen für Borkum (schwarz) und Elbemündung (grün) zusammen mit einer Zeitreihe des effektiven Winds für Borkum (schwarz gestrichelt), aus Rudolph et al. (submitted).

Die Simulation möglicher Auswirkungen dieser Ereignisse und die Diskussion von möglichen Handlungsoptionen zeigten, dass der Küstenschutz in Ostfriesland gegenwärtig gut aufgestellt ist, aber Bedarf an weiteren Untersuchungen zum Auftreten und möglichen Auswirkungen kaskadierender Effekte besteht (Rudolph et al. submitted). EXTREMENESS hat damit wesentliche Beiträge zur Diskussion über Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes geliefert, die unter anderem auch Eingang in die aktuelle Katastrophenschutzübung der Stadt Emden fanden (Schaper et al. submitted). Weitere Ergebnisse und Analysen finden sich im Schlussbericht des Schwerpunkts *Hochwassergefahren* (Rauthe et al. 2020).

6 Fazit und Ausblick

Die im Rahmen der Phase I des Expertennetzwerks erarbeiteten Ergebnisse haben nicht nur Fragen beantwortet, sondern auch neue Fragen aufgeworfen. Es ist darum wichtig und notwendig, bestehende Untersuchungen fortzuführen bzw. aufbauende Untersuchungen anzuregen. Unter anderem müssen weitere Daten und Methoden in die Untersuchungen einfließen. Dies betrifft nicht nur neue und aktualisierte Modellketten (z. B. CMIP6), sondern auch Verfahren zur Extremwertbestimmung oder die Einbindung von verkehrswirtschaftlichen Fragen. Ebenso wichtig ist eine Rückmeldung seitens der Nutzenden, in wieweit die bereits vorhandenen Ergebnisse genutzt werden können und wo weiterer Forschungsbedarf besteht. Auf diese Weise könnten die Forschungsarbeiten zielgerichtet angepasst werden.

6.1 Wesentlicher Erkenntnisgewinn

Im Wesentlichen lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus den bisherigen Untersuchungen ziehen:

- Die Modellauflösung (räumlich wie zeitlich) ist bisher oft unzureichend für lokale bis regionale Untersuchungen, insbesondere in Bezug auf Extreme der Windgeschwindigkeit und des Niederschlags. Derzeit existieren beispielsweise kaum konvektionserlaubende Modelle, die zeitlich und räumlich begrenzte extreme Ereignisse wiedergeben können. Somit müssen weitere methodische Schritte unternommen werden. Die Nutzung von Wetterklassen, die ihrerseits Informationen z. B. über Sturmlagen (Lamb-Wetterlagen) beinhalten, könnte sich hier als zielführend erweisen (siehe auch Kapitel 6.2). Basierend auf der bisherigen Erkenntnis, dass keine bzw. nur geringe Änderungen in der Sturmhäufigkeit zu erwarten sind, ist die Sicherheit der Seeschifffahrt nicht als gefährdet anzusehen.
- Der globale Meeresspiegelanstieg wird sich nach aktuellen Erkenntnissen (z. B. IPCC 2019) weiter beschleunigen. Aufgrund der verschiedenen beteiligten Prozesse, die teilweise noch nicht vollständig erforscht werden konnten, werden auch in Zukunft regionale Untersuchungen (z. B. im Programm SPP 1889 - Regional Sea Level Change and Society, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG) große Bedeutung haben, da viele Prozesse an der Küste sensitiv auf den regionalen/lokalen Meeresspiegel reagieren. So wird die Entwässerung küstennaher Gebiete zum Großteil durch den Außenwasserstand beeinflusst. Einige tiefliegende Gebiete, wie z. B. das Verbandsgebiet Emden (siehe Projekt KLEVER), werden sich in der *fernen Zukunft* nur noch durch Pumpen entwässern lassen. Am NOK wird man zum Ende des Jahrhunderts ebenfalls mit einem angepassten Management die Entwässerung des Einzugsgebiets und den Kanalverkehr steuern müssen. Daraus ergeben sich vermehrt Ansprüche an die Verkehrsinfrastruktur, z. B. durch Sicherstellung von Ausweichrouten, oder Umlagerung auf andere Verkehrsträger.
- Die Tidedynamik in der Deutschen Bucht reagiert auf den lokalen Meeresspiegelanstieg. Bei den zur Abschätzung dieser Reaktion verwendeten hydronumerischen Modellen spielt die Darstellung der Bathymetrie in den flachen Küstenregionen eine große Rolle.
- Durch den Meeresspiegelanstieg wird sich die Topographie in den flachen Küstengebieten der Deutschen Bucht, insbesondere im Wattenmeer, ändern.
- Der Meeresspiegelanstieg führt zu einem erhöhten Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit und dadurch zu einem erhöhten Import von marinen Feinsedimenten. Falls sich die Wassertiefe aufgrund des erhöhten Sedimentimports stärker verringert, als sie sich durch den Meeresspiegelanstieg vergrößert, muss mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden.
- Eine einfache Übertragung der Ergebnisse für den NOK auf andere Küstengebiete erscheint aufgrund der bisherigen Ergebnisse und nach Rücksprache mit den Ländervertretern nicht sinnvoll, da regionale Besonderheiten einen großen Einfluss auf die einzelnen Faktoren (Außenwasserstand,

Entwässerung des Hinterlands, etc.) haben, und bereits bestehende wie im Entstehungsprozess befindliche Schutzmaßnahmen mit in Betracht gezogen werden müssen. Ebenso müssen Effekte lokaler Landhebungs- und Landsenkungsprozesse, Bodenart oder Versiegelung berücksichtigt werden.

- Vielfach lassen sich aus bereits abgeschlossenen oder laufenden Projekten (z. B. KLEVER, AG Niederungen 2050, EXTREMENESS) hilfreiche Informationen ziehen. Demzufolge sind eine weitere Vernetzung bzw. der Ausbau bestehender Vernetzungen unabdinglich. Auch bietet sich die Möglichkeit, eigene Ergebnisse nutzbar zu machen (siehe auch die folgenden Kapitel).

6.2 Offene Forschungsfragen

Einige Themen konnten im Rahmen der Phase I des Expertennetzwerks nicht in vollem Umfang untersucht und beantwortet werden. Dazu gehören:

Naturwissenschaftliche Themen

- Der Meeresspiegelanstieg wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle für Planungsprozesse spielen, dementsprechend müssen Untersuchungen zur Anpassung an einen erhöhten Außenwasserstand weiterentwickelt werden.
- Das Zusammenspiel von Außenwasserstand und Binnenentwässerung ist für die Deutschen Küstengebiete bedeutend, sowie der Einfluss des Niederschlags auf den binnenseitigen Zufluss. Dies sollte möglichst flächendeckend betrachtet werden.
- Die Forschung zum Einfluss der vorherrschenden Großwetterlage auf Extremereignisse sollte fortgesetzt werden.
- Für Extreme in Wind und Niederschlag liefern die Modelle bisher unzureichende Ergebnisse. Neue Modellgenerationen liegen ab 2020 vor und werden auf ihre Qualität überprüft.

Verkehrswirtschaftliche Themen

- Die Hinterlandanbindung konnte bisher nicht in ausführlicher Weise eingebracht werden. Ergebnisse aus anderen Projekten (z. B. KLEVER, EXTREMENESS) und Untersuchungen (z. B. Buthe et al. 2015, Hänsel et al. 2020b, Rauthe et al. 2020) sowie ersten Analysen am NOK mit Hilfe von AIS-Daten (siehe Kapitel 3.2, Cox et al. 2019) zeigen aber Ansatzpunkte auf, die in Phase II weiterverfolgt werden sollen. Dies soll im Rahmen einer Stresstestfallstudie in Zusammenarbeit mit Themenfeld 6, der WSV und einer Fremdvergabe geschehen (siehe auch Kapitel 6.3).

6.3 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase

Die Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase liegen zum einen in der Beantwortung bzw. tiefgreifenderen Untersuchung der offenen Forschungsfragen aus Phase I. Ferner sollen zusätzlich Schwerpunkte in die Untersuchungen aufgenommen werden, die nicht nur technische und methodische Fragen zum Umgang mit Klimaprojektionen beinhalten, sondern auch verstärkt den Fokus auf Anpassungsmaßnahmen legen. Die dabei erzielten Ergebnisse sollen dann wieder in die Forschungsschwerpunkte zurückgespiegelt werden, um den Bedürfnissen der Anwender gerecht zu werden.

Vergabe eines Projekts zur Hinterlandanbindung

Im Rahmen einer Vergabe soll ein stärkerer Fokus auf die wirtschaftlichen Konsequenzen von Verkehrsunterbrechungen gelegt werden. Geplant ist eine Stresstestfallstudie zu Auswirkungen von Extremwetterereignissen und Meeresspiegelanstieg auf den Seeverkehr und die Hinterlandanbindung von Seehäfen. Der Beginn des Projekts ist für das 2. Halbjahr 2020 vorgesehen. Als einer der wichtigen Bausteine im neuen Scherpunktthema 103 „Beeinflussung von Verkehrsströmen“ (Abbildung 6-1) wird dieses Projekt von WS24 unterstützt.

Erweiterung des Klimaprojektionsensembles

Regionalisierte Simulationen aus CMIP6 werden vermutlich nicht vor 2021/2022 zur Verfügung stehen, sollen dann aber verstärkt ausgewertet werden. Insbesondere soll der Einfluss der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Modelle (hochaufgelöste Regionalmodelle vs. grob aufgelöste Globalmodelle) auf die Ergebnisse (Luftdruck, Niederschlag, Wind, Wasserstand, Wellen) vertieft untersucht werden. Daraus soll jeweils abgeleitet werden, welche Mindestanforderungen für räumliche Analysen (offene See, Küste, Ästuar) und Risikoabschätzungen notwendig sind. Frühestmöglich sollen auch Ergebnisse des gekoppelten Ozean-Atmosphäremodells ROAM (ProWaS, Kooperation DWD/BSH) einbezogen werden, sobald diese vorliegen.

Vertiefung und Ausweitung der Methoden und Verfahren zur Extremwertanalyse

Bisher konnten gleichzeitiges Auftreten von hohem seeseitigen Wasserstand und landseitigen Abflüssen nicht bearbeitet werden, da die statistische Grundlage noch nicht gesichert erscheint. Um die Untersuchungen im Rahmen von Phase II durchführen zu können, soll u. a. ein Workshop zum Thema Extremwertanalyse durchgeführt werden. Dieser ist für Anfang 2020 geplant.

Vertiefung und Ausweitung der Methoden und Verfahren zur Wetterlagenanalyse

Wetterlagenanalysen sollen in Phase II ein wichtiger Bestandteil der gemeinsamen Untersuchungen sowohl im Binnenland als auch an der Küste werden. Hier soll ein behördenübergreifender Workshop zum Thema durchgeführt werden, da die Fülle der unterschiedlichen Klassifikationsmethoden eine gute Planung der gemeinsamen Vorgehensweise erfordert. Der Workshop ist ebenfalls für Anfang 2020 geplant.

Mittelfristige/Dekadische Vorhersage

Derzeit wird die Erstellung von mittelfristigen Klimavorhersagen als Bindeglied zwischen Wettervorhersagen und Klimaprojektionen vorangetrieben. Hier gilt es zu untersuchen, ob, und wenn ja welcher, Zusatzgewinn zu erhalten ist. Entgegen der in bekannten Kinoblockbustern postulierten Verfahren ist es nicht möglich, ein Wettervorhersagemodell sozusagen auf Knopfdruck in den „Klimamodus“ um zu schalten. Zum einen arbeiten die Modelle auf unterschiedlichen raumzeitlichen Skalen, was jeweils angepasste Routinen und Parametrisierungen bedingt. Zum anderen müssen unterschiedliche Randbedingungen erfüllt sein. Somit erfordert die dekadische Vorhersage ein eigenes, speziell zugeschnittenes Setup.

Sturmebben

Bei Sturmebben führen starke ablandige Winde zu einer erheblichen Reduktion des Wasserstands in den Ästuaren und der Deutschen Bucht. Diese Ereignisse können über mehrere Tage andauern, sodass Schiffs-ladungen reduziert werden müssen, um den Tiefgang der Schiffe an den geringen Wasserstand anzupassen. Somit ergeben sich folgende Fragestellungen, die in Phase II untersucht werden sollen:

- Nehmen Häufigkeit und Intensität von Sturmebben künftig zu?
- Wie wirkt sich der Meeresspiegelanstieg in diesem Kontext aus?
- Nimmt die Beeinträchtigung der Schifffahrt künftig zu?

Vertiefung und Ausweitung der Zusammenarbeit mit den Küstenländern (LKN-/LLUR-SH, NLWKN, STALU MM) und laufenden Küstenprojekten

Der bereits etablierte Dialog mit den Küstenländern und Projektgruppen zum Thema Küstenforschung soll fortgesetzt und weiter ausgebaut werden. Als Beispiel kann der jährlich stattfindende Küstenworkshop am BSH genannt werden. Hier werden aktuelle Forschungsthemen, z. B. zum Meeresspiegelanstieg und den sich daraus ergebenden Problemen für die Hinterlandentwässerung, vorgestellt und mit den Ländervertretern diskutiert.

Die Forschungsarbeiten für die Phase II des Expertennetzwerks werden in vier Schwerpunktthemen durchgeführt (Abbildung 6-1). Diese orientieren sich nicht mehr an den einzelnen Naturgefahren (Sturm, Hochwasser, Hangrutschungen), sondern an den Komponenten der Klimawirkungsanalyse. Damit soll ein noch einheitlicheres Bild für verkehrsträger- und gefahrenübergreifende Forschungsarbeit gegeben werden.

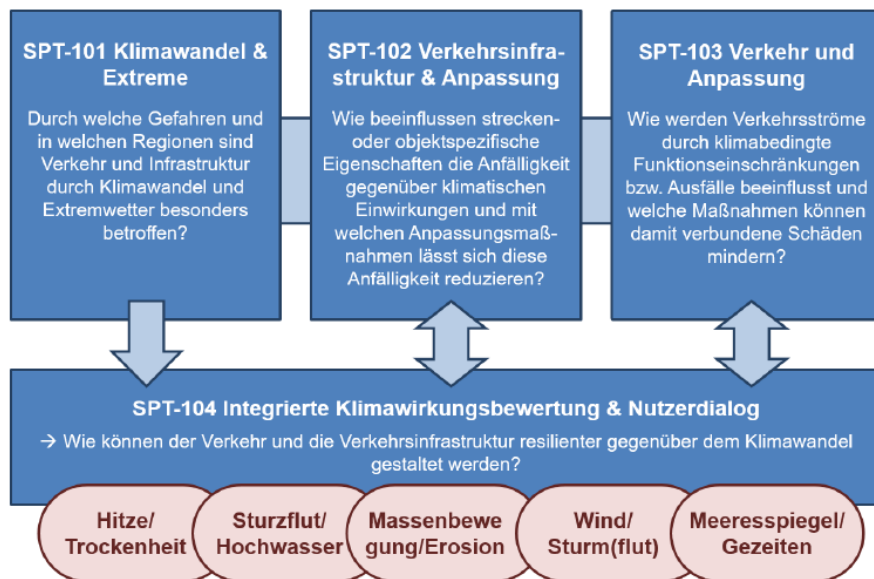


Abbildung 6-1: Organisationsstruktur, Schwerpunktthemen und adressierte klimatische Einflüsse des Themenfeldes 1 in der nächsten Bearbeitungsphase 2020–2025.

7 Literaturverzeichnis

- AG Niederungen 2050 (2014) Abschlussbericht: Grundlagen für die Ableitung von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel, Marschenverband Schleswig-Holstein, Hamburg. <https://schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/naturschutz/Downloads/abschlussberichtAG2050.html>
- Anderson JL, Balaji V, Broccoli AJ, Cooke WF, Delworth TL, Dixon KW, Donner J, Dunne KA, Freidenreich SM, Garner ST, Gudgel RG, Gordon CT, Held IM, Hemler RS, Horowitz LW, Klein SA, Knutson TR, Kushner PJ, Langenhost AR, Lau N-C, Liang Z, Malyshev SL, Milly PCD, Nath MJ, Ploshay JJ, Ramaswamy V, Schwarzkopf MD, Shevliakova E, Sirutis JJ, Soden BJ, Stern WF, Thompson LA, Wilson RJ, A.T. W und Wymann BL (2004) The New GFDL Global Atmosphere and Land Model AM2–LM2: Evaluation with Prescribed SST Simulations. *Journal of Climate* 17(24), 4641–4673. DOI:10.1175/jcli-3223.1
- BAW (2015) BAW-Bildatlas: Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD Band 1: Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg in den Ästuaren Elbe, Jade-Weser und Ems. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 202 pp., <https://izw.baw.de/e-medien/bawbildatlas-band1-2015/index.html>
- BAW (2018) BAW-Bildatlas: Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels - Untersuchung kombinierter Szenarien aus Meeresspiegelanstieg und Abfluss in der Tideelbe. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg.
- BAW (in Vorbereitung) BAW-Bildatlas: Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg.
- Berrisford P, Dee D, Poli P, Brugge R, Fielding K, Fuentes M, Kallberg P, Kobayashi S, Uppala S und Simmons A (2009) The ERA-Interim Archive, Version 1.0. <https://www.ecmwf.int/node/8174>
- BfG (in Vorbereitung) Wassermengenbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen.: Phase 1 von 2014 bis 2019, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BMVI-Expertenetzwerk (2020) Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSP1Berichte/TF1_2Auflage.pdf;jsessionid=5D56BB9ECDBDD8678AB6094618596470.live21301?__blob=publicationFile&v=4
- BMVI (2015) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kniefel 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
- Borsche M, Kaiser-Weiss AK und Kaspar F (2016) Wind speed variability between 10 and 116 m height from the regional reanalysis COSMO-REA6 compared to wind mast measurements over Northern Germany and the Netherlands. *Advances in Science and Research* 13, 151–161. DOI:10.5194/asr-13-151-2016
- Bott F, Lohregel A-F, Forbriger M, Ganske A, Haller M und Herrmann C (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- Brecht B und Frank H (2014) High resolution modelling of wind fields for optimization of empirical storm flood predictions. *Advances in Science and Research* 11(1), 1–6. DOI:10.5194/asr-11-1-2014
- Bremicker M (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. In: Leibundgut C, Demuth S und Vondersträß I (Eds.), *Freiburger Schriften zur Hydrologie*. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg im Breisgau. <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/FSH-Bd11-Bremicker.pdf>
- 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, Rauhe 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
- Brockmann J, Heeling A, Pohl M und Uliczka K (2008) The Kiel Canal. *Die Küste* 74, 317–332. <http://vzb.baw.de/die-kueste/0/k074125.pdf>

- Brodtkorb P, Johannesson P, Lindgren G, Rychlik I, Ryden J und Sjo E (2000) WAFO - A Matlab toolbox for analysis of random waves and loads, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Bülow K, Dietrich C, Elizalde A, Gröger M, Heinrich H, Hüttl-Kabos 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 (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas_27/2014
- Bundesregierung (2015) Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf
- Buthe B, Jakubowski P und Pütz T (2015) Verkehrliche Auswirkungen einer Sturmflut - Transportströme und Erreichbarkeiten, BBSR-Analysen KOMPAKT, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn.
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2015/DL_06_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Carson M, Köhl A, Stammer D, A. Slangen AB, Katsman CA, W. van de Wal RS, Church J und White N (2016) Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change* 134(1), 269-281. DOI:10.1007/s10584-015-1520-1
- Church JA und White NJ (2006) A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 33(1), L01602. DOI:10.1029/2005gl024826
- Collins WJ, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, Gedney N, Halloran P, Hinton T, Hughes J, Jones CD, Joshi M, Liddcoat S, Martin G, O'Connor F, Rae J, Senior C, Sitch S, Totterdell I, Wiltshire A und Woodward S (2011) Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development Discussions* 4(2), 997-1062. DOI:10.5194/gmdd-4-997-2011
- Compo GP, Whitaker JS, Sardeshmukh PD, Matsui N, Allan RJ, Yin X, Gleason BE, Vose RS, Rutledge G, Bessemoulin P, Brönnimann S, Brunet M, Crouthamel RI, Grant AN, Groisman PY, Jones PD, Kruk MC, Kruger AC, Marshall GJ, Maugeri M, Mok HY, Nordli Ø, Ross TF, Trigo RM, Wang XL, Woodruff SD und Worley SJ (2011) The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(654), 1-28. DOI:10.1002/qj.776
- Cox M, Heibek F, Hindersmann I, Klose M, Nilson E, Stachel H, Streek P, Voss N und Zabrocki M (2019) Pilotprojekt: Einflüsse von Einschränkungen der Verkehrswege auf den Güterverkehr - Schlussbericht im Themenfeld 6 des BMVI Expertennetzwerks, BMVI-Expertennetzwerk
- Dangendorf S, Marcos M, Wöppelmann G, Conrad CP, Frederikse T und Riva R (2017) Reassessment of 20th century global mean sea level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 5946-5951. DOI:10.1073/pnas.1616007114
- 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, Tavalato 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
- Dieterich C, Schimanke S, Wang S, Väli G, Liu Y, Hordoir R, Höglund A und Meier M (2013) Evaluation of the SMHI coupled atmosphere-ice-ocean model RCA4-NEMO. SMHI.
https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.28917!/RO_47.pdf
- DWD (2017) Klimareport Schleswig-Holstein, Deutscher Wetterdienst (DWD), Hamburg.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_sh/download_report_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Ebner von Eschenbach A-D (2017) Wassermengenbewirtschaftung von Bundeswasserstraßen - Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung. Tagungsbeitrag auf dem Kolloquium "Wassermengenbewirtschaftung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen" 13./14. September 2016 in Koblenz, S. 93-105
- Fery N, Tinz B, Leiding T, Kaspar F, Ganske A und Gates L (in Vorbereitung) Offshore wind conditions during extratropical cyclones in global and regional reanalysis in the German North and Baltic Seas.

- Feser F, Weisse R und von Storch H (2001) Multi-decadal atmospheric modeling for Europe yields multi-purpose data. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 82(28), 305-305. DOI:10.1029/01eo00176
- Forristall GZ (1978) On the statistical distribution of wave heights in a storm. *Journal of Geophysical Research* 83(C5), 2353-2358. DOI:10.1029/JC083iC05p02353
- Ganske A, Tinz B, Rosenhagen G und Heinrich H (2016) Interannual and Multidecadal Changes of Wind Speed and Directions over the North Sea from Climate Model Results. *Meteorologische Zeitschrift* 25(4), 463-478. DOI:10.1127/metz/2016/0673
- Ganske A (2017) Winddaten als Antrieb der BAW-Modelle im SP108 - Bereitstellung, Analyse und statistische Einordnung, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Ganske A, Schade NH, Hüttl-Kabus S, Möller J, Heinrich H, Tinz B und Gates L (2017) Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979–2015, Bericht zum Meilenstein M108b-1 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Ganske A, Fery N, Gaslikova L, Grabemann I, Weisse R und Tinz B (2018) Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. *Ocean Dynamics* 68(10), 1371-1382. DOI:10.1007/s10236-018-1190-4
- Ganske A (2019a) Analyse von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen, Bericht zum Meilenstein M104a-4 des SP-104 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Ganske A (2019b) Validation von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean-Atmosphären-Klimamodellen, Bericht zum Meilenstein M104a-2 des SP-104 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Ganske A, Jensen C und Schade NH (2019) Validation von atmosphärischen Klimamodellaten über der Nord- und Ostsee, Bericht zum Meilenstein M108a-2 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Gaslikova L, Grabemann I, Weisse R und Groll N (2015) Storm surge climatology for the NE Atlantic and the North Sea – where the new RCP 8.5 scenario lead us to?, Proceedings of the 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 5th Coastal Hazard Symposium, Key West, Florida. http://www.waveworkshop.org/14thWaves/Presentations/E3_Gaslikova_SSS_press.pdf
- Gennis S (2016) Anwendung und Evaluierung eines Vorfeuchteindex zur Ermittlung des Abflussverhaltens am Beispiel der Bille, Universität Hamburg, Hamburg.
- Gerber M, Ganske A, Müller-Navarra S und Rosenhagen G (2016) Categorisation of meteorological conditions for storm tide episodes in the German Bight. *Meteorologische Zeitschrift* 25(4), 447-462. DOI:10.1127/metz/2016/0660
- Giorgetta MA, Jungdaus J, Reick CH, Legutke S, Bader J, Böttinger M, Brovkin V, Crueger T, Esch M, Fieg K, Glushak K, Gayler V, Haak H, Hollweg H-D, Ilyina T, Kinne S, Kornbluh L, Matei D, Mauritsen T, Mikolajewicz U, Mueller W, Notz D, Pithan F, Raddatz T, Rast S, Redler R, Roedner E, Schmidt H, Schnur R, Segschneider J, Six KD, Stokhause M, Timmreck C, Wegner J, Widmann H, Wieners K-H, Claussen M, Marotzke J und Stevens B (2013) Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5(3), 572-597. DOI:10.1002/jame.20038
- Gregory JM, White NJ, Church JA, Bierkens MFP, Box JE, Broeke MRvd, Cogley JG, Fettweis X, Hanna E, Huybrechts P, Konikow LF, Lederer PW, Marzeion B, Oerlemans J, Tamisiea ME, Wada Y, Wake LM und Wal RSWvd (2013) Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts? *Journal of Climate* 26(13), 4476-4499. DOI:10.1175/jcli-d-12-00319.1
- 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
- Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jodumsen 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-Expertenetzwerks. 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-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.10
- Hazeleger W, Severijns C, Semmler T, Ștefănescu S, Yang S, Wang X, Wyser K, Dutra E, Baldasano JM, Bintanja R, Bougeault P, Caballero R, Ekman AML, Christensen JH, van den Hurk B, Jimenez P, Jones C, Källberg P, Koenigk T, McGrath R, Miranda P, van Noije T, Palmer T, Parodi JA, Schmith T, Selten F, Storelvmo T, Sterl A, Tapamo H, Vancoppenolle M, Viterbo P und Willén U (2010) EC-Earth. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(10), 1357-1364. DOI:10.1175/2010bams2877.1
- Hinrichs I und Jahnke-Bornemann A (2017) Erweiterung der KLIWAS Nordsee-Klimatologie auf die Ostsee (BNSC) im Rahmen einer Kooperation des ICDC mit dem BMVI-Expertenetzwerk, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- 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.
- Holgate SJ (2007) On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters* 34(1). DOI:10.1029/2006gl028492
- Hollweg H-D, Böhm U, Fast I, Hennemuth B, Keuler K, Keup-Thiel E, Lautenschlager M, Legutke S, Radke K, Rockel B, Schubert M, Will A, Woldt M und Wundram C (2008) Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. 1619-2257, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI). DOI:10.13140/RG.2.1.2884.0726
- Horton BP, Rahmstorf S, Engelhart SE und Kemp AC (2014) Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews* 84, 1-6. DOI:10.1016/j.quasirev.2013.11.002
- Hourdin F, Foujols M-A, Codron F, Guemas V, Dufresne J-L, Bony S, Denvil S, Guez L, Lott F, Ghattas J, Braconnot P, Marti O, Meurdesoif Y und Bopp L (2012) Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model. *Climate Dynamics* 40(9-10), 2167-2192. DOI:10.1007/s00382-012-1411-3
- IPCC (2007) Summary for Policymakers. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. <https://www.ipcc.ch/srocc/download-report>
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.,
- IPCC (2019) Summary for Policymakers. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/download-report>
- Jenkinson AF und Collison FP (1977) An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic climatology branch memorandum* 62, 18.
- Jensen C (2019) Charakteristische Wetterlagen über der Nordsee, Bericht zum Meilenstein M108b-2 des SP-108 im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Jensen J, Dangendorf S, Wahl T und Steffen H (2014) Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung* 58(6), 304-323. DOI:10.5675/HyWa_2014_6_1
- Johansson MM, Pellikka H, Kahma KK und Ruosteenoja K (2014) Global sea level rise scenarios adapted to the Finnish coast. *Journal of Marine Systems* 129, 35-46. DOI:10.1016/j.jmarsys.2012.08.007
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R und Joseph D (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3), 437-471. DOI:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:Tnyrp>2.0.Co;2
- Kopp RE, Horton RM, Little CM, Mitrovica JX, Oppenheimer M, Rasmussen DJ, Strauss BH und Tebaldi C (2014) Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future* 2(8), 383-406. DOI:10.1002/2014ef000239

- Lamb HH (1950) Types and spells of weather around the year in the British Isles: annual trends, seasonal structure of the year, singularities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 76(330), 393–429. DOI:<https://doi.org/10.1002/qj.49707633005>
- Le Bars D, Drijfhout S und de Vries H (2017) A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environmental Research Letters* 12(4), 044013. DOI:10.1088/1748-9326/aa6512
- LKN–SH und LLUR–SH (2016) Bericht zum Weihnachtshochwasser 2014, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) und Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR-SH). https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/H/hydrologie_niederschlag/Downloads/hochwasserbericht2014.html
- LLUR–SH (2013) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Küstengebiet der Nordsee 2013, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR-SH).
- Loewe P, Klein H, Schmolke S, Müller-Navarra S, Becker G, Nies H, Brockmann U, Schmelzer N, Dick S, Schrader D, Engelke C, Schulz A, Frohse A, Theobald N, Horn W und Weigelt S (2005) Nordseezustand 2003, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrogeographie (BSH), Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-38.pdf>
- Loewe P (2009) System Nordsee - Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrogeographie (BSH), Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-44.pdf>
- Loewe P, Klein H und Weigelt-Krenz S (2013) System Nordsee - 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrogeographie (BSH), Hamburg und Rostock. <https://www.bsh.de/download/Berichte-des-BSH-49.pdf>
- Lohrengel A-F, Brendel C, Herrmann C, Kirsten J, Forbriger M, Klose M und Stube K (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNLAf2020.2020.06
- LSBG (2017) Sicherstellung der Entwässerung küstennaher, urbaner Räume unter Berücksichtigung des Klimawandels – das BMBF-Forschungsprojekt Stuck, Zweiter Zwischenbericht 2016–2017, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG). https://www.stuck-hh.de/fileadmin/user_upload/Stuck_2ter_Zwischenbericht_2015-2016_final.pdf
- Makkonen L und Tikanmäki M (2019) An improved method of extreme value analysis. *Journal of Hydrology X* 2, 100012. DOI:10.1016/j.hydroa.2018.100012
- Mathis M, Elizalde A und Mikolajewicz U (2018) Which complexity of regional climate system models is essential for downscaling anthropogenic climate change in the Northwest European Shelf? *Climate Dynamics* 50(7), 2637–2659. DOI:10.1007/s00382-017-3761-3
- Maurer T und Ebner von Eschenbach A-D (2011) Interaktion des Kanalsystems mit der Umwelt – Modellierung des Wasserhaushalts als Randbedingung für ein Bewirtschaftungsmodell, Überregionale Wasserbewirtschaftung – Entwicklung und Einsatz eines Informationssystems und verschiedener Modelle, Hannover.
- MELUR-SH (2012) Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein - Fortschreibung 2012, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH), Kiel. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf
- Möller J (2019) Rezent und zukünftiges Entwässerungspotential des NOK, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Müller-Navarra SH und Giese H (1999) Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. *Ocean Dynamics* 51, 385–405.
- Nikulin G, Kjellström E, Hansson U, Strandberg G und Ullerstig A (2011) Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography* 63(1), 41–55. DOI:10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x
- 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 Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07

- Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschitz 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
- Pelling HE, Mattias Green JA und Ward SL (2013) Modelling tides and sea-level rise: To flood or not to flood. *Ocean Modelling* 63, 21-29. DOI:10.1016/j.oceomod.2012.12.004
- Pelling HE und Mattias Green JA (2014) Impact of flood defences and sea-level rise on the European Shelf tidal regime. *Continental Shelf Research* 85, 96-105. DOI:10.1016/j.csr.2014.04.011
- Pickering MD, Wells NC, Horsburgh KJ und Green JAM (2012) The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides. *Continental Shelf Research* 35, 1-15. DOI:10.1016/j.csr.2011.11.011
- Preuß P (2010) Programm zur Bewirtschaftung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme Version 1.1, Systemeditor WASED 2.0.
- Rasquin C, Seiffert R, Wachler B und Winkel N (2020) The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. *Ocean Sci.* 16(1), 3144. DOI:10.5194/os-16-31-2020
- 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
- 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-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- Rockel B, Will A und Hense A (2008) The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17(4), 347-348. DOI:10.1127/0941-2948/2008/0309
- Röckner E, Bäuml G, Bonaventura L, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kirchner I, Kombluth L, Manzini E, Rhodin A, Schlese U, Schutzweida U und Tompkins A (2003) The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: model description, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI), Hamburg. DOI:https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_screp_349.pdf
- Rudolph E, Brodhagen T, Fery N, Gaslikova L, Grabemann I, Meyer E, Möller T, Lucio Eceiza EE, Tinz B und Weisse R (submitted) Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung. *Die Küste*.
- Rutgersson A, Jaagus J, Schenk F und Stendel M (2014) Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. *Climate Research* 61(2), 177-190. DOI:10.3354/cr01244
- Schade NH (2017) Evaluating the atmospheric drivers leading to the December 2014 flood in Schleswig-Holstein, Germany. *Earth System Dynamics* 8(2), 405-418. DOI:10.5194/esd-8-405-2017
- Schaper J, Ulm M, Arms A, Jensen J, Ratter B und Weisse R (submitted) Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten: Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation. *Die Küste*.
- Schröter K, Kunz M, Elmer F, Mühr B und Merz B (2015) What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(1), 309-327. DOI:10.5194/hess-19-309-2015
- 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 Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der See-schiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02.
- Slangen ABA, Meyssignac B, Agosta C, Champollion N, Church JA, Fettweis X, Ligtenberg SRM, Marzeion B, Melet A, Palmer MD, Richter K, Roberts CD und Spada G (2017) Evaluating Model Simulations of Twentieth-Century Sea Level Rise. Part I: Global Mean Sea Level Change. *Journal of Climate* 30(21), 8539-8563. DOI:10.1175/JCLI-D-17-0110.1
- Spiekermann J, Ahlhorn F, Bormann H und Keschull J (2018) Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Klimawandels - Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden, Universität Oldenburg, Jade Hochschule, Firma Küste und Raum. https://uol.de/fileadmin/user_upload/proj/klever/KLEVER/KLEVER-Ergebnisbroschuere.pdf

- Stendel M, van den Besselaar E, Hannachi A, Jaagus J, Kent E, Lefebvre C, Rosenhagen G, Rutgersson A, Schenk F, van der Schrier G und Woollings T (2016) Two centuries of extreme events over the Baltic Sea and North Sea regions, 1st Baltic Earth Conference "Multiple drivers for Earth system changes in the Baltic Sea region". International Baltic Earth Secretariat Nida, Lithuania, pp. 222.
- Stevens B, Giorgetta M, Esch M, Mauritsen T, Crueger T, Rast S, Salzmann M, Schmidt H, Bader J, Block K, Brokopf R, Fast I, Kinne S, Kornbluh L, Lohmann U, Pincus R, Reichler T und Roeckner E (2013) Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5(2), 146-172. DOI:10.1002/jame.20015
- Tamisiea ME, Hill EM, Ponte RM, Davis JL, Velicogna I und Vinogradova NT (2010) Impact of self-attraction and loading on the annual cycle in sea level. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115(C7), C07004. DOI:10.1029/2009JC005687
- Teutsch I (2019) Abschlussbericht Freak Wave - Studie zum Auftreten von Extremwellen in der Nordsee im Klimawandel, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg.
- Uppala SM, Källberg PW, Simmons AJ, Andrae U, Bechtold VDC, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, Berg LVD, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen I, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf JF, Morcrette JJ, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P und Woollen J (2005) The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131(612), 2961-3012. DOI:10.1256/qj.04.176
- 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 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), 5-31. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z
- Wahler 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
- Ward SL, Green JAM und Pelling HE (2012) Tides, sea-level rise and tidal power extraction on the European shelf. *Ocean Dynamics* 62(8), 1153-1167. DOI:10.1007/s10236-012-0552-6
- Weisse R, Grabemann I, Gaslikova L, Meyer E, Tinz B, Fery N, Möller M, Rudolph E, Brodhagen T, Arns A, Jensen J, Ulm M, Ratter B und Schaper J (in Vorbereitung) Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. Die Küste.
- Zadeh N, Wittenberg AT, Winton M, Spelman MJ, Samuels BL, Sentman LT, Phillipps PJ, Milly PCD, Malyshev SL, Krasting JP, Harrison MJ, Dunne KA, Cooke W, Stouffer RJ, Shevliakova E, Hallberg RW, Griffies SM, Adcroft AJ, John JG und Dunne JP (2012) GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate* 25(19), 6646-6665. DOI:10.1175/jcli-d-11-00560.1
- 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, Sumihar 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(12), 1699-1716. DOI:10.1007/s10236-015-0898-7

8 Abkürzungsverzeichnis

ALADYN	A nalysing l ong-term changes of tidal d ynamics in the German Bight (Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee)
AIS	A utomatic I dentification S ystem – Identifikations-, Positions- und Lagedaten für ein einzelnes Schiff
APA	A ktions p lan A npassung der DAS
BAW	B undesanstalt für W asserbau
BEWASYS	B ewirtschaftung W asserwirtschaftlicher S ysteme (Bilanzmodell für die Wassermengenbewirtschaftung)
BfG	B undesanstalt für G ewässerkunde
BMBF	B undesministerium für B ildung und F orschung
BMU	B undesministerium für U mwelt, N aturschutz und nukleare S icherheit
BMVI	B undesministerium für V erkehr und digitale I nfrastruktur
BSH	B undesamt für S eeschifffahrt und H ydrographie
CORDEX	C oordinated D ownscaling E xperiment (Regionale Initiativen für das Downskaling der globalen Klimamodelle)
CLM	C limate L imited-area M odel (von der CLM-Community betriebenes regionales Klimamodell, das aus dem Wettervorhersagemodell COSMO hervorgegangen ist)
CCLM	COSMO-CLM
COMTESS	Sustainable C oastal L and M anagement: T rade-offs in E co- S ystem S ervices (Verbundforschungsvorhaben des BMBF)
COSMO	C onsortium for S mall-scale M odelling
DFG	D eutsche F orschungsgemeinschaft
DWD	D eutscher W etterdienst
EBA	E isenbahn b undesamt
ESM	E arth S ystem M odel – Erdsystemmodell (integriert die Wechselwirkungen von Atmosphäre, Ozean, Land, Kryosphäre, und Biosphäre)
EXTREMENESS	Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen (Forschungsprojekt im Förderschwerpunkt KüNO)
FONA	F orschung für n achhaltige E ntwicklungen
FWU	F orschungsinstitut für W asser und U mwelt der U niversität S iegen
GCM	G eneral C irculation M odel / G lobal C irculation M odel – Globales Klimamodell
GDWS	G eneraldirektion W asserstraßen und S chifffahrt
GEV	G eneralized E xtrême V alue D istribution – Allgemeine Extremwertverteilung
GPD	G eneralized P areto D istribution – Generalisierte Pareto-Verteilung
HYRAS	H ydrologische R asterdatensätze verschiedener hydrometeorologischer Größen für Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete
HZG	H elmholtz-Zentrum G eesthacht
ICDC	I ntegrated C limate D ata C entre (Universität Hamburg)
IMA-A	I nterministerielle A rbeitsgruppe – A npassung an den K limawandel

IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange – Zwischenstaatliches Expertengremium für Klimawandel, auch Weltklimarat
KLEVER	K limaoptimiertes E ntwässerungsmanagement der V erbandsregion Emden (Forschungsprojekt des BMU)
KLIWAS	Auswirkungen des K limawandels auf W asserstraßen und S chifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (Forschungsprojekt des BMVI)
KüNO	K üstenmeerforschung in N ord- und O stsee (gefördert durch das BMBF)
LARSIM	L arge A rea R unoff S imulation M ode (Wasserhaushaltsmodell)
LKN-SH	Landesbetrieb für K üstenschutz, N ationalpark und Meeresschutz S chleswig- H olstein
LLUR-SH	Landesamt für L andwirtschaft, U mwelt und ländliche R äume S chleswig- H olstein
MB	M eerbusen
mNHN	M eter bezogen auf das N ormalhöhen n ull
MPI	M ax- P lanck- I nstitut
MPI-ESM	ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg
MPI-OM	O zeanmodell des M ax- P lanck- I nstitutes für Meteorologie in Hamburg
NEMO	N ucleus for E uropean M odelling of the O cean (Regionales Ozeanmodell)
netCDF	Network Common Data Format (binäres Dateiformat für den Austausch wissenschaftlicher Daten)
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NO	N ordost
NOK	N ord- O stsee- K anal
NOSCCA	N orth S ea region C limate C hange A ssessment
NW	N ordwest
OARCM	O cean- A tmosphere R egional C oupled M odel – Regionales gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Modell
ProWaS	Klimawandel- P rojektionsdienst für W asserstraßen und S chifffahrt (Projektionsdienst des BMVI)
PNP	P egeln u ll p unkt
POT	P ea k o ve r t h r esh o l d
Pr	Pressure - Luftdruck
Q	Ab-/Zufluss
RCM	R egional C limate M odel – regionales Klimamodell
RCP	R epresentative C oncentration P athway (Emissionsszenarien des 5. IPCC Sachstandsberichts)
REGNIE	R egionalisierte N iederschlagshöhen des DWD
REMO	R egional M odell (in Deutschland entwickeltes numerisches regionales Klimamodell)
ReKlies	R egionale K limaprojektionen E nsemble für D eutschland (Erweiterung des regionalen Klimaprojektionsensembles aus EURO-CORDEX)
Rhum	Relative humidity - Relative Luftfeuchte
Rlds	Surface downward solar radiation - Globalstrahlung
SALTSA	Groundwater S A L inisation following sea level rise as a societal challenge of climate adaptation - T he ca S e of North-Western Germ A ny (Forschungsprojekt der DFG)
SLP	S ea L evel P ressure – Luftdruck auf Meeresniveau

SLR	S ea L evel R ise – Meeresspiegelanstieg
SMHI	S wedish M eteorological and H ydrological I nstitute (Wetterdienst Schweden)
SP	Schwerpunktthema im Expertennetzwerk
SRES	S pecial R eport on E mission S cenarios (Emissionsszenarien des 4. IPCC Sachstandsberichts)
SSH	S ea S urface H eight – Meeresoberflächenauslenkung
SST	S ea S urface T emperature – Meeresoberflächentemperatur
STALU MM	Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg
StucK	S icherstellung der Entwässerung küstennaher, u rbaner Räume unter Berücksichtigung des K limawandels (Forschungsprojekt des BMBF)
TF	Themenfeld im BMVI-Expertennetzwerk
ÜG	Ü bergangsgebiet
UNECE	U nited N ations E conomic C ommission for E urope
UNTRIM	Hydronumerisches Modell für Küstengebiete und Ästuar
WETTREG	W etterlagen-basierte statistische R egionalisierungsmethode
WSV	W asser- und S chiffahrtsverwaltung des Bundes
XDS	E xpanded D ownscaling
ZO	Z entrale O stsee

9 Anhang

Tabelle 9-1: Liste der Meilensteine im Schwerpunkt *Fokusgebiete* Küsten mit den jeweiligen dazugehörigen Literaturhinweisen.

Nr.	Inhalt
M108a-1	Ost- und Nordseeklimatologie (BNSC) → Hinrichs und Jahnke-Bornemann (2017)
M108a-2	Validierung von Klimamodelldaten → Ganske et al. (2019)
M108b-1	Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des NOK → Ganske et al. (2017)
M108b-2	Wetterlagen über der Nordsee → Jensen (2019)
M108b-3	Rezentes Entwässerungspotential des NOK → Möller (2019)
M108c-1	Veränderungen in extremen Niederschlägen und Windereignissen → Kapitel 5.1.3 und Ganske (2019a)
M108c-2	Veränderungen extremer Wellenhöhen in der Nordsee → Teutsch (2019)
M108c-3	Veränderungen der extremen Pegelstände (Sturmfluten, Sturmebben) an den deutschen Küsten → Kapitel 5.2.1
M108c-4	Veränderungen des Entwässerungspotentials des NOK → Möller (2019)
M108d-1	Winddaten als Antrieb der BAW Modelle im SP-108 – Bereitstellung, Analyse und statistische Einordnung → Ganske (2017)
M108d-2	Sensitivitätsstudien zur morphologischen Entwicklung in der Deutschen Bucht → BAW (in Vorbereitung)
M108d-3	Sensitivitätsstudien zu möglichen zukünftigen Änderungen in der Hydrodynamik und im Sedimenthaushalt der Deutschen Bucht → Rasquin et al. (2020)

Tabelle 9-2: Übersicht über die verfügbaren gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphären-Klimamodelle (OARCM) und die atmosphärischen RCMs sowie ihren Globalmodellantrieb pro RCP-Szenario und ihre Herkunft (C: EURO-CORDEX, K: KLIWAS, R!: RACE!, S: SMHI).

RCM oder OARCM GCM	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	MPI-OM/REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO	MPI-OM/REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO	MPI-OM/REMO gekoppelt	NEMO/RCA4 gekoppelt	REMO
MPI-ESM_LR		S	C	R!	S	C	R!	K	C
EC-EARTH		S			S			S	
GFDL-ESM2M		S			S			S	
HadGEM2-ES		S			S			S	
IPSL-CM5A					S			S	

Tabelle 9-3: Übersicht der verwendeten Daten für die Berechnung des effektiven Windes und des Windstaus im EXTREMENESS Projekt.

Datenart	Name des Datensatzes	Zeitraum	Umfang in Jahren
Messdaten	FINO123	2004–2015	25
	Küstenstationen	1959–2017	180
	Signalstationen	1877–1999	350
			(Summe: 555)
Reanalysen/ Hindcasts	COSMO-REA6	1995–2018	23
	NOAA 20CR	1851–2014	56 x 164
	ERA40	1957–2010	54
	ERA-Interim	1979–2017	39
	ERA5	2000–2018	10 x 19
	COSMO_CLM/NCEP	1948–2014	66
	NCEP/SN_REMO	1958–2007	60
	OptempS	1960–2011	52
			(Summe: 9.668)
Klimamodelle	MPIOM-REMO (ERA40)	1990–2001	2 x 20
	MPIOM-REMO –	1920–2005	86
	ECHAM6r1(c20, RCP 8.5)	2006–2100	95
	MPIOM-REMO – ECHAM6r2,r3	1950–2005	2 x 56
	(c20, RCP 8.5)	2006–2100	2 x 95
	ECHAM5/MPIOM-CCLM	1960–2100	2 x 141
	RCA4-NEMO:		
	MPI-ESM-LR (RCP 2.6,4.5, 8.5)	2006–2098	3 x 93
	IPSL-CM5A-MR (RCP 4.5, 8.5)	2006–2098	2 x 93
	HadGEM2-ES (RCP 2.6,4.5, 8.5)	2006–2098	3 x 93
	GFDL-ESM2M (RCP 2.6,4.5, 8.5)	2006–2098	3 x 93
	EC-EARTH (RCP 2.6,4.5, 8.5)	2006–2098	3 x 93
		(Summe: 2.107)	
Insgesamt			12.330

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

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