

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Hache, Ingo; Seiffert, Rita; Mahavadi, Tara; Rasquin, Caroline; Wachler, Benno; Kelln, Jessica

Regionale Wattentwicklung und ihr Einfluss auf die Tidedynamik im Wattenmeer. Aus der Berichtsreihe: „Sonderanalysen und methodische Entwicklungen“. Berichtsreihe des Schwerpunktthemas 101 (SPT-101) im Themenfeld 1 des BMDV-Expertennetzwerks.

BMDV-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110453>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hg.) (2022): Regionale Wattentwicklung und ihr Einfluss auf die Tidedynamik im Wattenmeer. Aus der Berichtsreihe: „Sonderanalysen und methodische Entwicklungen“. Berichtsreihe des Schwerpunktthemas 101 (SPT-101) im Themenfeld 1 des BMDV-Expertennetzwerks.. Berlin: Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln). https://doi.org/10.18451/expn_2022_02.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



Regionale Wattentwicklung und ihr Einfluss auf die Tidedynamik im Wattenmeer

Hache, I. | Seiffert, R. | Mahavadi, T. | Rasquin, C. | Wachler, B. | Kelln, J.

Zitiervorschlag

Hache I, Seiffert R, Mahavadi T, Rasquin C, Wachler B, Kelln J (2022) Regionale Wattentwicklung und ihr Einfluss auf die Tidedynamik im Wattenmeer. Sonderanalysen und methodische Entwicklungen des Schwerpunktthemas SPT-101.3 im Themenfeld 1 des BMDV-Expertennetzwerks. DOI: https://doi.org/10.18451/expn_2022_02

Impressum

Digitale Publikationsreihe des Themenfeldes 1 Titel des Themenfeldes im BMDV-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ zu den Forschungsergebnissen (der Schwerpunktthemen) aus der 2. Forschungsphase (2010–2025).

Die Arbeiten des BMDV-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ wurden durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert. Internet: [BMDV-Expertennetzwerk](#)

Das BMDV-Expertennetzwerk ist das verkehrsträgerübergreifende Forschungsformat in der Ressortforschung des BMDV. Unter dem Leitmotiv „Wissen – Können – Handeln“ haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) 2016 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Ziel ist es, drängende Verkehrsfragen der Zukunft unter anderem in den Bereichen Klimawandel, Umweltschutz, alternde Infrastruktur und Digitalisierung, erneuerbare Energien und verkehrswirtschaftliche Analysen zu erforschen und durch Innovationen eine resiliente und umweltgerechte Gestaltung der Verkehrsträger zu ermöglichen.

Dieses Werk ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

Herausgeber

BMDV-Expertennetzwerk

Autorinnen und Autoren:

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW):

Ingo Hache, Jessica Kelln, Tara Mahavadi, Caroline Rasquin, Rita Seiffert

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV):

Benno Wachler

Redaktionsschluss: Juni/ 2022

Titelbild:

- (1) Hallig Hooge (BAW)
- (2) Außenweser (BAW)
- (3) Sankt Peter-Ording (BAW)
- (4) Außenweser (BAW)
- (5) Hallig Hooge (BAW)

DOI: https://doi.org/10.18451/expn_2022_02

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielsetzung.....	1
2	Ausgangssituation	3
2.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	4
3	Methode.....	5
3.1	Hydrodynamisches Modell.....	5
3.2	Erstellung der Topographieszenarien.....	7
3.3	Analysemethoden	9
4	Ergebnisse.....	11
4.1	Meeresspiegelanstiegsszenario.....	11
4.2	Homogenes Topographieszenario.....	13
4.3	Regionale Topographieszenarien	15
4.3.1	Tidekennwertanalyse des Wasserstandes	15
4.3.2	Partialtidenanalyse	16
4.3.3	Tidekennwertanalyse der Strömung	17
5	Diskussion.....	19
6	Fazit	22
7	Abkürzungen.....	24
8	Literaturverzeichnis.....	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 Das Deutsche Bucht Modell (GBM) der BAW.	6
Abbildung 3-2 Kontinentalschelfmodell DCSMv6FM (BAW 2020). Der schwarze Rahmen umfasst die Deutsche Bucht. Abbildung nach Rasquin et al. (2020).	7
Abbildung 3-3 Aufteilung der Wattflächen in sieben Teilbereiche (1-7) in denen die Watten in ihrer Vertikalen verändert werden können. Die angewandten Veränderungen in den jeweiligen Szenarien finden sich in Tabelle 3-1.	9
Abbildung 4-1 Änderungen im Vergleich zum Referenzzustand als Antwort auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m im Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) (Abb. 5-48 aus Nilson et al. (2020)). Identisch im Vergleich von F80 zum Referenzlauf aus Tabelle 3-1.	11
Abbildung 4-2 Änderungen im Vergleich zum Referenzzustand als Antwort auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit (a), maximale Flutstromgeschwindigkeit (b), maximale Ebbstromgeschwindigkeit (c) und das Verhältnis aus maximaler Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (d). Abbildung 5a-d aus Wachler et al. (2020). Für die Erläuterungen der Insets in Unterabbildung c und d wird auf Wachler et al. (2020) verwiesen.	13
Abbildung 4-3 Änderungen im Vergleich zu einem reinen Meeresspiegelanstieg (0,8 m) von Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) als Antwort auf eine Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m). Abbildung 5-54 aus Nilson et al. (2020).	14
Abbildung 4-4 Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (a) und maximalen Ebbstromgeschwindigkeit (b) durch eine um 0,5 m angehobene intertidale Wattfläche und 0,2 m vertiefte Rinnen im Vergleich zu einem reinen Meeresspiegelanstieg. Abbildung 6a-b aus Wachler et al. (2020).	14
Abbildung 4-5 Änderung gegenüber einem reinen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m infolge der Topographieänderung des Szenarios TOPO_reg7 im Tidehochwasser (a), Tideniedrigwasser (b) sowie Tidehub (c).	15
Abbildung 4-6 Änderung gegenüber einem reinen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m infolge der Topographieänderung des Szenarios TOPO_reg3 von Tidehochwasser (a), Tideniedrigwasser (b) sowie Tidehub (c).	16
Abbildung 4-7 Änderung der M2-Amplitude gegenüber des Referenzzustandes aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m (a), in Verbindung mit der weniger differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg3 (b) und der stärker differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg7 (c).	17
Abbildung 4-8 Änderung der M4-Amplitude gegenüber des Referenzzustandes aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m (a) und in Kombination mit der geringer differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg3 (a) und der stärker differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg7 (b).	17

Abbildung 4-9 Änderungen im Vergleich zu einem alleinigen Meeresspiegelanstieg (0,8 m) durch das regionale Wattwachstum Szenario TOPO_reg3 auf die maximale Flutstromgeschwindigkeit (a) und maximale Ebbstromgeschwindigkeit (b). Gleiches für das regionale Wattwachstum Szenario TOPO_reg7 in Hinblick auf die maximale Flutstromgeschwindigkeit (c) und maximale Ebbstromgeschwindigkeit (d)..... 18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Alle Simulationen mit jeweils zugehörigem Meeresspiegelanstieg (SLR) und regionalen Topographieanpassungen der Watten pro Polygon (Poly.1 bis Poly.7) in Meter..... 9

Tabelle 3-2 Tidekennwerte des Wasserstandes (TDKW), der Strömung (TDKV) und der Partialtidenanalyse (FRQW), die für das jeweilige Szenario ermittelt worden sind. 10

1 Motivation und Zielsetzung

Vor etwa 8000 Jahren, entstand das Wattenmeer entlang der Nordseeküste und umfasst bis heute die größten zusammenhängenden Wattflächen der Welt (Reise et al. 2010). Die weltweit größten ununterbrochenen Wattflächen sind ein Hauptgrund für die UNESCO, das Wattenmeer zum Weltnaturerbe zu erklären (Hofstede und Stock 2018), was dieses Gebiet unter einen besonderen Schutzstatus zum Erhalt des hohen ökologischen Wertes stellt. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Watten ist ihre Funktion für den Küstenschutz. Die weiträumigen Wattflächen dämpfen die Tide- und Seegangsenergie bei Sturmfluten. So werden die hydrodynamischen Kräfte auf die Hochwasserschutzstrukturen des Festlandes verringert (Hofstede 2015), was die Sicherheit von mindestens 3,5 Millionen Einwohnern in direkter Nähe zur Wattenmeerregion erheblich beeinflusst (CPSL 2010). Von der dämpfenden Wirkung der Watten profitieren ebenfalls Ästuarie wie die Tideelbe, indem die Tideenergie reduziert wird und sich der Sedimenteintrag in das Ästuar (tidal pumping) verringert. Somit wirken sich Wattflächen ebenfalls unterstützend auf eine intakte Schiffbarkeit in den deutschen Seeschiffahrtsstraßen aus. Im Rahmen des BMDV-Expertenetzwerks haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Bundesoberbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) zusammengeschlossen, um gemeinsam das übergeordnete Ziel zu verfolgen, Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anzupassen. So sollen im Themenfeld 1 des BMDV-Expertenetzwerks klimatisch bedingte Betroffenheiten für Verkehr und Infrastruktur identifiziert und Anpassungsoptionen entwickelt werden. Im Schwerpunkt 101 Arbeitspaket 3 „Fallstudien und Prozessanalysen“ stehen unter anderem der Umgang mit den Unsicherheiten eines zukünftigen beschleunigten Meeresspiegelanstiegs und die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Wattenmeer, die deutschen Ästuarie und die Seeschiffahrtsstraßen im Fokus. Ziel ist es Verwundbarkeiten zu detektieren und Handlungsoptionen für Entscheidungsträger aufzuzeigen.

Das Wattenmeer und die Ästuarie sind dem halbtägigen Gezeitenzyklus unterworfen und daher hoch dynamisch in ihrer Hydrodynamik und Morphologie. Hydrodynamik und Morphologie stehen unmittelbar in Wechselwirkung miteinander und sollten somit nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Für die detaillierte Untersuchung von morphologischen Änderungen sind morphodynamische Modelle ein geeignetes Mittel (Wang et al. 2018). Für Morphodynamische Modellstudien braucht es Angaben zur Bodenzusammensetzung und Sedimenteigenschaften, die jedoch in der Regel schlecht dokumentiert sind (van der Wegen et al. 2011). Langfristige Prognosen sind u.a. aus diesem Grund mit hohen Unsicherheiten behaftet (Wang et al. 2018). Meist beschränken sich morphodynamischen Untersuchungen auf kleinere Fokusgebiete wie etwa einzelne Tidebecken (Dissanayake et al. 2012; Becherer et al. 2018), da der Rechenaufwand großräumige Untersuchungen mittels morphodynamischer Simulationen hoch ist. Somit bleiben morphostatische Modellstudien bis heute ein probates Mittel, um das Prozessverständnis großskaliger Prozesse, wie eine sich auf längeren Zeitskalen ändernde Tidedynamik im gesamten Wattenmeer, untersuchen zu können. Vorangegangene morphostatische Modellstudien (Wachler et al. 2020; Nilson et al. 2020) zeigen bereits, unter der Annahme eines steigenden Meeresspiegels, die möglichen zukünftigen Änderungen in der Tidedynamik auf. Die Auswirkungen eines erhöhten Meeresspiegels rufen unter anderem eine leichte Zunahme des Tidehubs in den Tidebecken an der Ostfriesischen Küste und der Inneren Deutschen Bucht hervor. Zudem kommt es überwiegend zu steigenden Strömungsgeschwindigkeiten mit den größten Änderungen in den Rinnensystemen des Wattenmeers. Eine zusätzliche vertikal, homogen veränderte Topographie der Watten im gesamten Wattenmeerraum (z.B. eine einheitliche gleichmäßige Anhebung um 0,5 m) hat auf diese Auswirkungen zum Teil kompensierende zum Teil aber auch eine verstärkende Wirkung. So werden

durch die Watterhöhung die Strömungsgeschwindigkeiten gedämpft, der Tidehub jedoch, vor allem im Bereich des Nordfriesischen Wattenmeeres, verstärkt. In Erweiterung zu den Untersuchungen einer homogenen Watterhöhung im gesamten Untersuchungsgebiet nach Wachler et al. (2020) wird in der vorliegenden Modellstudie der Fokus auf regionalisierte morphostatische Topographie-Szenarien mit regional unterschiedlichen Watterhöhenänderungen gelegt. Der bisherige Kenntnisstand aus den vorangegangenen Modelluntersuchungen wird somit erweitert und ist bedeutsam für eine zukünftige modellgestützte morphodynamische Untersuchung des Wattenmeeres mit seinen Ästuaren und Seeschiffahrtsstraßen.

2 Ausgangssituation

Im Rahmen der 1. Phase des BMDV-Expertennetzwerks des Themenfeldes 1, stand bereits die Frage im Vordergrund, wie sich ein Wattwachstum bei angenommenen Meeresspiegelanstiegsszenarien auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht auswirken könnte. Die Ergebnisse aus dem Schlussbericht von Schwerpunkt 106 (Nilson et al. 2020) und der Veröffentlichung von Wachler et al. (2020) zeigen, dass infolge eines Anstiegs des Meeresspiegels um 0,8 m, mit einem Anstieg der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnen des Wattenmeers sowie in Teilen der deutschen Ästuarie zu rechnen ist. Ein über das ganze Wattenmeer homogenes Mitwachsen der Watten um 0,5 m führt zu einer überwiegenden Reduzierung der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten und somit zu einer Kompensation der Effekte eines alleinigen Meeresspiegelanstiegs. Zudem werden auch verstärkende Effekte bei mitwachsenden Watten beobachtet. So zeigt sich, dass sich das Tidehochwasser erhöhen und das Tideniedrigwasser reduzieren wird, was folglich zu einer überwiegenden Zunahme des Tidehubs in der Deutschen Bucht führt.

Eine Modellstudie von Jordan et al. (2021) zeigt diesen Sachverhalt bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m und prozentualem Anwachsen der Watten in 25 %-Schrittweiten von 0 % (kein Wattwachstum) bis 100 % (0,8 m Wattwachstum) auf. Das zunehmende Wattwachstum führt zu einer stetigen Zunahme der M2 Amplitude. Zudem weisen die Autoren darauf hin, dass wie auch in der Arbeit von Wachler et al. (2020) erwähnt, ein Anstieg der Flutstromdominanz und eine Reduzierung der Ebbstromdominanz zu erwarten ist, sollte kein Anwachsen der intertidalen Gebiete des Wattenmeeres erfolgen.

Jordan et al. (2021) heben allerdings auch hervor, dass es für zahlreiche Regionen wie beispielsweise das Nordfriesische Wattenmeer ungewiss sei, ob die Gezeitenamplituden durch den Meeresspiegelanstieg verstärkt oder abgeschwächt werden. Diese Ungewissheit führen die Autoren auf die Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten der morphologischen Entwicklungen im hochdynamischen Wattenmeer zurück. Dass sich die Tidebecken im Wattenmeer bei steigendem Meeresspiegel unterschiedlich entwickeln könnten, zeigt bereits eine Studie von Benninghoff und Winter (2019). Dies lässt die These zu, dass Modellstudien mit über das gesamte Wattenmeer homogen angewandten Anwachsrate der Wattflächen (Wachler et al. 2020; Jordan et al. 2021) zwar tendenziell plausible Veränderungen in der Tidedynamik abbilden, jedoch die mögliche Bandbreite an Veränderungen der Tidedynamik durch regionale Unterschiede im Wattwachstum unberücksichtigt bleiben könnte. Die hier vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, das Prozessverständnis über den Einfluss eines regional differenzierten Wattwachstums auf die Tidedynamik zu verbessern. Diese Untersuchung soll somit Anhaltspunkte darüber liefern, ob bei regional heterogenem Wattwachstum überregionale Effekte in der Tidedynamik zu erwarten sind und welche Bedeutung diese Erkenntnis für das Sedimentmanagement im Wattenmeer-raum haben könnte.

2.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Die Ergebnisse aus dieser Modellstudie zu den regional unterschiedlichen Wattwachstumsszenarien bestätigen die Ergebnisse aus vorangegangenen Modellstudien mit homogenen Topographieszenarien. Die durch einen alleinigen Meeresspiegelanstieg bedingte Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten wird durch die erhöhten Watten wieder abgeschwächt. Des Weiteren führt eine Erhöhung der Watten zu einer überwiegenden Zunahme des Tidehubs im Vergleich zu einem alleinigen Meeresspiegelanstiegs-Szenario.
- Der alleinige Effekt des regional differenziert angenommenen Wattwachstums zeigt bei den Tidewasserständen eine deutlichere Veränderung der Tidedynamik auf Wattregionen ohne oder mit nur geringem Wachstum im Vergleich zu Wattregionen mit höherem Wachstum. Infolge des regional differenziert angenommenen Wattwachstums wird die Zunahme der mittleren maximalen Flutstromgeschwindigkeit in den Rinnensystemen durch einen alleinigen Meeresspiegelanstieg in den Wattgebieten mit vergleichsweise geringem bis keinem Wattwachstum zusätzlich verstärkt. Die Zunahme der mittleren maximalen Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnensystemen durch einen alleinigen Meeresspiegelanstieg sowie durch das regional differenziert angenommene Wattwachstum ist deutlich geringer. Infolge der regional angewachsenen Watten in der südlichen Deutschen Bucht kommt es in den Tidebecken Nordfrieslands zu einem erhöhten Verhältnis von maximaler Flutstrom- zu maximaler Ebbstromgeschwindigkeit. Ein Wattwachstum in der südlichen Deutschen Bucht könnte damit indirekt auch das Wattwachstum in Nordfriesland fördern. Zu den deutlichsten überregionalen Wirkungen des regional differenziert angenommenen Wattwachstums auf die Tidedynamik gehört zudem eine Zunahme des Tidehubs in Gebieten ohne Wattwachstum.
- Diese Änderungen zeigen, dass Tidebecken, die mit ihrem Wattwachstum deutlich zurückbleiben, verstärkte Mechanismen für das Erreichen eines morphologischen Gleichgewichtszustandes gegenüber der Tidebecken mit hohem Wattwachstum aufweisen. Diese Ergebnisse bestätigen die Theorien hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtsbeziehungen von Tidebecken („Rinne-Watt-Systemen“). Folglich ist in den Tidebecken Nordfrieslands mit einem erhöhten Sedimentimport durch die Rinnen zu rechnen, falls ausreichend hohe Sedimentmengen zur Verfügung stehen.

3 Methode

3.1 Hydrodynamisches Modell

Die hydrodynamischen Simulationen zur Untersuchung der Tidedynamik werden mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell UnTRIM von Casulli und Walters (2000) durchgeführt. Das von UnTRIM verwendete Gitternetz ist unstrukturiert und erlaubt dem Nutzer eine flexible Anpassung an die vorhandene Topographie im Flachwasserbereich mit höherer Gitterauflösung. Tiefere Bereiche können aufgrund ihrer geringen Wechselwirkung zwischen der Topographie und der Hydrodynamik mit einer gröbereren Gitterauflösung versehen werden, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Das Modellgebiet umfasst Teile des Niederländischen Wattenmeeres, beginnend mit der Insel Terschelling, die gesamte Deutsche Bucht mit seinen Ost- und Nordfriesischen Inseln und reicht bis Hvide Sande im Dänischen Wattenmeer (Abbildung 3-1). In diesem Deutsche Bucht Modell sind ebenfalls die Ästuarie von Ems, Weser und Elbe enthalten. Folglich ist die Auflösung des verwendeten Gitters variabel gestaltet und verfügt im Wattenmeer und in den Ästuaren über eine Auflösung zwischen 100 und 500 m. Die Vertikale wird bis zu einer Wassertiefe von 28 m mit einer Gitterweite von 1 m aufgelöst. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt diese Gitterweite kontinuierlich zu. Die Modelltopographie repräsentiert den topographischen Zustand im Jahr 2010 und besteht aus einer Zusammenstellung bathymetrischer Datensätze, die vom Dänischen Hydrologischen Instituts (DHI), der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowie vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung gestellt worden sind.

UnTRIM ist mit dem morphodynamischen Modell SediMorph (BAW 2005) gekoppelt, um die Massenbewegungen infolge von Geschiebe- und Schwebstofftransport der einzelnen Kornfraktionen zu bilanzieren. Hier sei erwähnt, dass die hier beschriebenen Simulationen nicht morphodynamisch sind. Das heißt, dass die von SediMorph berechneten morphologischen Veränderungen bei der hydrodynamischen Berechnung in UnTRIM unberücksichtigt bleiben. Das übergeordnete Kontinentalschelfmodell DCSMv6FM (Abbildung 3-2) basiert auf dem Vorgängermodell DCSMv6 (Zijl et al. 2013; Zijl et al. 2015) und erzeugt für das Deutsche Bucht Modell die seeseitigen Wasserstände (Nilson et al. 2020). Im Fall einer Simulation mit einem Anstieg des Meeresspiegels um 0,8 m wird der Wert am seeseitigen Modellrand des Kontinentalschelfmodell DCSMv6FM addiert. Über dem gesamten Modellgebiet wird der Wind aus den Windfeldern der Reanalysedaten COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015) vorgegeben. Die Wasserstandsrandwerte für das DCSMv6FM beinhalten die astronomischen Tidekomponenten (aus GOT00.2, FES2012). Die Abflüsse von Elbe, Weser und Ems werden aus Messdaten der WSV entnommen. Um die Vergleichbarkeit zu den vorangegangenen Arbeiten gewährleisten zu können, wird ein identischer Analysezeitraum vom 06.07.2010 bis 21.07.2010 gewählt und umfasst einen vollen Spring-Nipp-Zyklus. Für die Partialtidenanalyse wird der Zeitbereich erweitert (03.06.2010 bis 23.07.2021), um das Signal der einzelnen Partialtiden zu verbessern.

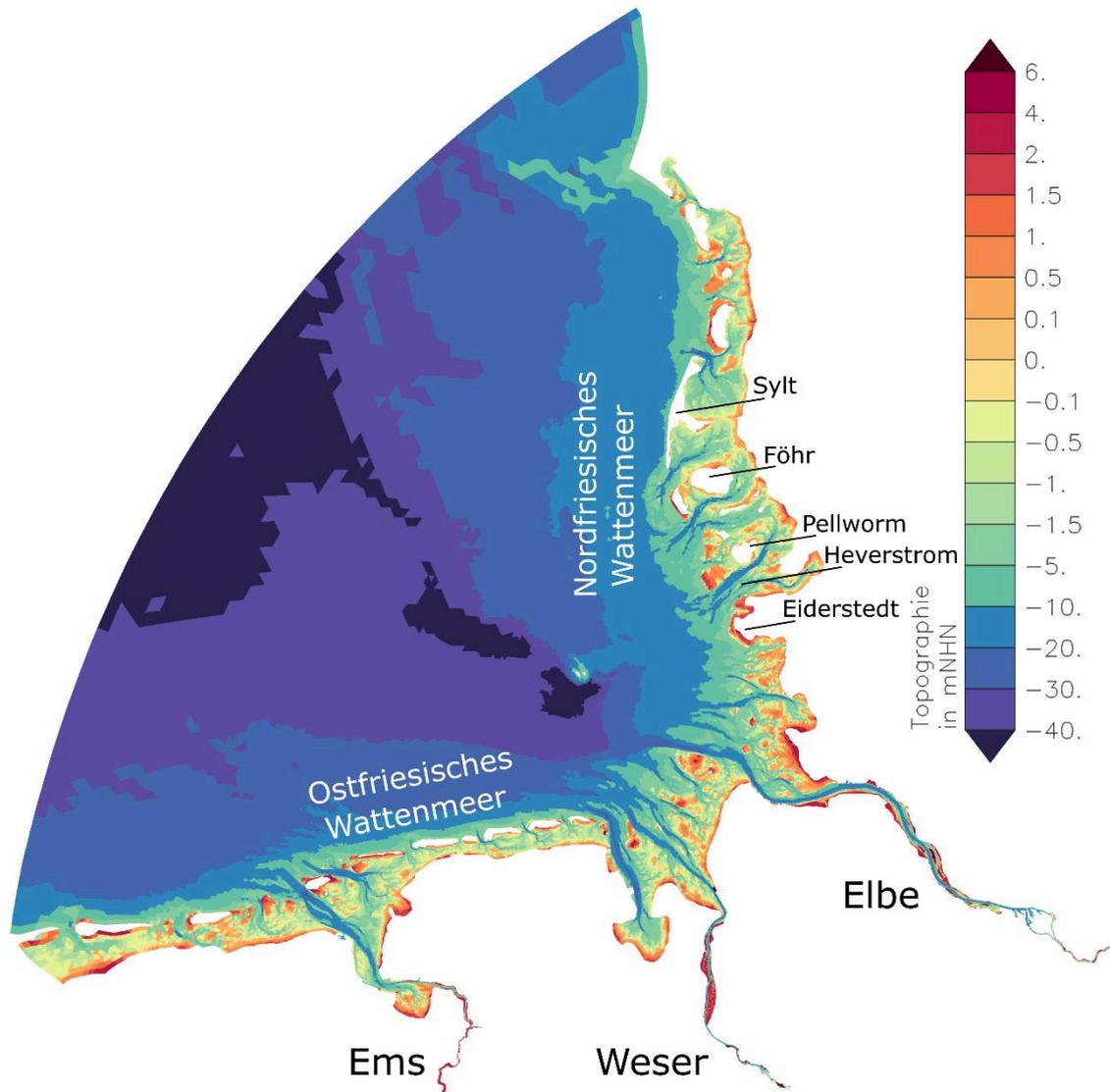


Abbildung 3-1 Das Deutsche Bucht Modell (GBM) der BAW.

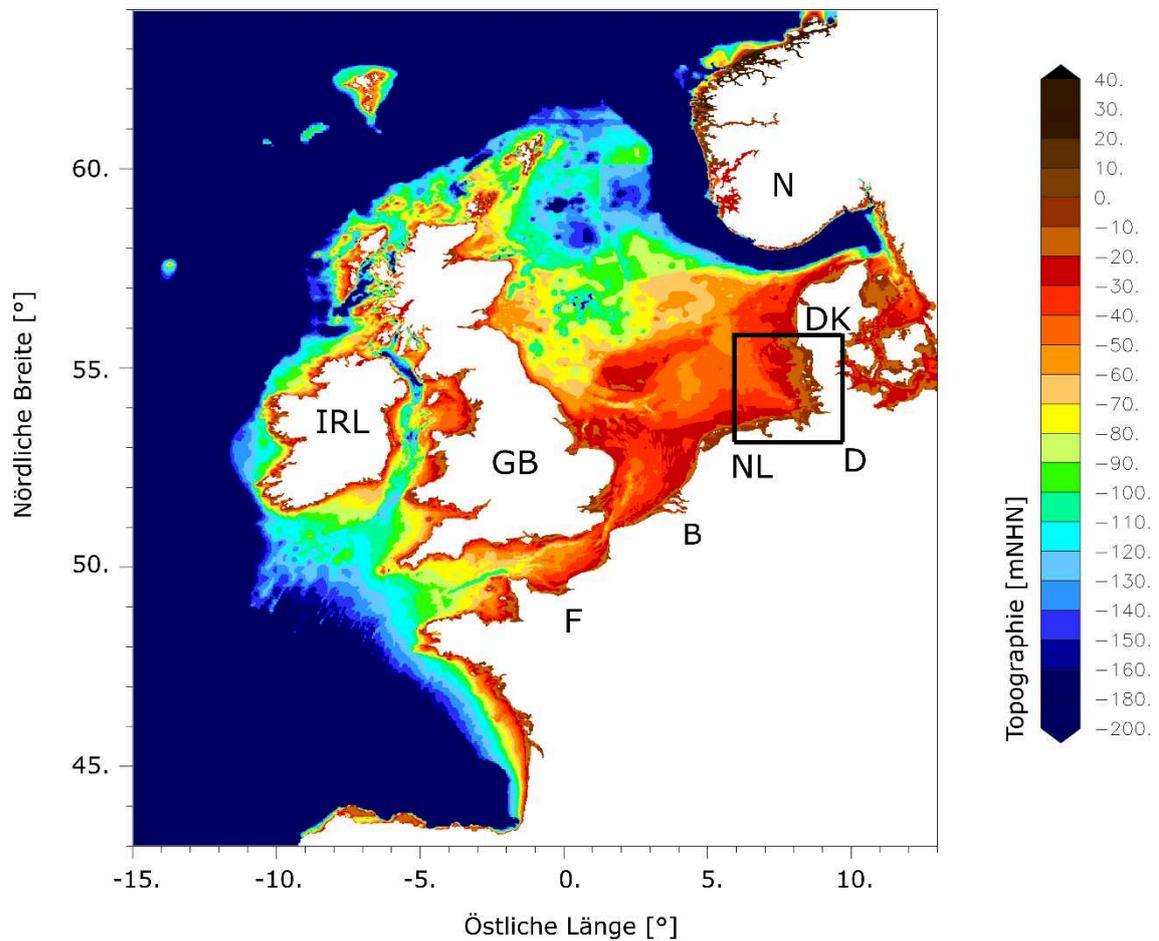


Abbildung 3-2 Kontinentalschelfmodell DCISMv6FM (BAW 2020). Der schwarze Rahmen umfasst die Deutsche Bucht. Abbildung nach Rasquin et al. (2020).

3.2 Erstellung der Topographieszenarien

Für die Modelluntersuchungen wurden mögliche Szenarien der Wattentwicklung entwickelt. Die Basis für die im Nachgang erläuterten Topographieszenarien, die eine mögliche Wattentwicklung unter Einflussnahme eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m bis zum Jahr 2100 gegenüber 2010 darstellen (circa 50. Perzentil im SSP5-8.5 (IPCC 2021)), bildet eine Literaturrecherche.

Im Allgemeinen ist die wichtigste Voraussetzung für das Anwachsen von Wattflächen eine ausreichend hohe Verfügbarkeit an Sedimenten (van Goor et al. 2003; Maan et al. 2018). Die Wattwachstumsrate für das jeweilige Tidebecken hängt somit maßgeblich von der Sedimentverfügbarkeit ab. Eine der wichtigsten system-externen Sedimentquellen ist der Küstenlängstransport, der sowohl in Form von Geschiebetransport als auch von Schwebstofftransport permanent Sedimente von Westen kommend in die Deutsche Bucht transportiert (Heyer und Schrottke 2013; Milbradt et al. 2015; Valerius et al. 2015; Zeiler et al. 2000; Zeiler et al. 2018). Der Grad der Ausschöpfung dieser Sedimentverfügbarkeit (Importkapazität der einzelnen Seegatten bzw. Tidebecken) ist jedoch im Wattenmeer heterogen verteilt. Während das Ostfriesische Wattenmeer wie auch die Innere Deutsche Bucht eine stark positive Sedi-

mentbilanz aufweist, so ist die Sedimentbilanz im nördlichen Teil der Deutschen Bucht nur gering positiv und in Teilen sogar negativ. Für das Nordfriesische Wattenmeer selbst wird bereits kein nennenswerter Sedimenteintrag von See her erwartet, da dort kaum noch Sedimente zur Verfügung stehen (Ahrendt 2006). Für diese ungleiche Verteilung ist unter anderem ein Austrag von Sedimenten (v.a. Schwebstoffen) aus der Deutschen Bucht westlich von Helgoland verantwortlich, sodass nur ein geringer Teil des Küstenlängstransportes in Richtung des Nordfriesischen Wattenmeers transportiert wird. So zeigt sich im Nordfriesischen Wattenmeer eine besonders ungünstige Sedimentbilanz nahe der Insel Sylt, während die Sedimentbilanz südlich und nördlich davon etwas positiver ist (Heyer und Schrottke 2013). Diese Gegebenheiten der ungleichen Verteilung der Sedimentverfügbarkeit ist in die Erstellung des hier genutzten Topographieszenarios TOPO_reg7 miteingeflossen. Weitere externe Sedimentquellen wie etwa Sedimente durch fluvialen Sedimenteintrag von Elbe (Gayer et al. 2006; Milbradt et al. 2015), Weser und Ems (Milbradt et al. 2015) oder durch die Erodierbarkeit des Vorstrandbereiches (Ricklefs und Asp Neto 2005; Valerius et al. 2015; Zeiler et al. 2018), wurden ebenfalls bei der Erstellung des Topographieszenarios TOPO_reg7 berücksichtigt.

Zusätzlich zu den system-externen Sedimentquellen wurden auch system-interne Sedimentquellen der Tidebecken berücksichtigt, um das Topografieszenario TOPO_reg7 zu erstellen. „System-intern“ bedeutet, dass die Sedimente innerhalb eines „sediment-sharing system“ umgelagert werden. Ein „sediment-sharing system“ besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Watten, Rinnen (v.a. Seegat) und ggf. Ebbdelta. System-interne Sedimentquellen sind also Sedimente aus dem Seegat oder Ebbdelta, die für eine Akkretion auf den Watten zur Verfügung stehen (Hofstede 2002). Der Zugriff auf diese interne Sedimentquelle für das Wattwachstum steht unter anderem in Wechselwirkung mit der Anstiegsrate des Meeresspiegels. Je höher die Anstiegsrate des Meeresspiegels, desto drastischer nehmen die mittleren maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten in den Seegatten zu, was wiederum die Erosion in den Seegatten beziehungsweise in den Rinnensystemen erhöht. Für die Untersuchung des Effekts eines regionalisierten Wattwachstums auf die Tidedynamik wird allerdings in dieser Arbeit keine Rinnenvertiefung angenommen, da sich in einer bereits vorangegangenen Studie gezeigt hat, dass sich ein Anwachsen der Watten erheblich größer auf die Tidedynamik auswirkt, als eine Vertiefung der Rinnen (Mahavadi 2019). Dies liegt daran, dass sich in Tidebeckensystemen mit hohem Wattflächenanteil wie dem Wattenmeer, morphologische Änderungen im intertidalen Bereich wesentlich stärker auf das Tideprisma auswirken als morphologische Änderungen im subtidalen Bereich. Eine detaillierte Beschreibung von weiteren Einflussfaktoren auf die Sedimentbilanz findet sich in Wachler et al. (2020).

Als Basis zur Erstellung des Topographieszenarios TOPO_reg7 dienten die von Wachler et al. (2020) genutzten Polygone für die Maskierung der Wattflächen im gesamten Wattenmeerraum des Deutsche Bucht Modells. Diese Polygone wurden für die regionalen Topographieszenarien in sieben Polygone unterteilt (Abbildung 3-3), um die darin enthaltenen Wattflächen differenziert in ihrer Vertikalen verändern zu können (Tabelle 3-1). Zusätzlich zum TOPO_reg7 Szenario wird ein weiteres, weniger differenziertes, regionalisiertes Topographieszenario TOPO_reg3 erstellt, um das Systemverständnis der sich ändernden Tidedynamik zu verbessern. Zudem könnte die ausschließliche Betrachtung von stark differenzierten Anpassungen die Interpretation erschweren und aufgrund von hohen Unsicherheiten aus lokalen Faktoren zu Fehlinterpretationen führen. Für das Szenario TOPO_reg3 wurden somit lediglich die Polygone 1 bis 3 im Süden des Deutsche Bucht Modells aus dem TOPO_reg7 Szenario verwendet (Abbildung 3-3), während die restlichen Teilbereiche des Wattenmeers ihre Ausgangstopographie behalten (Tabelle 3-1).

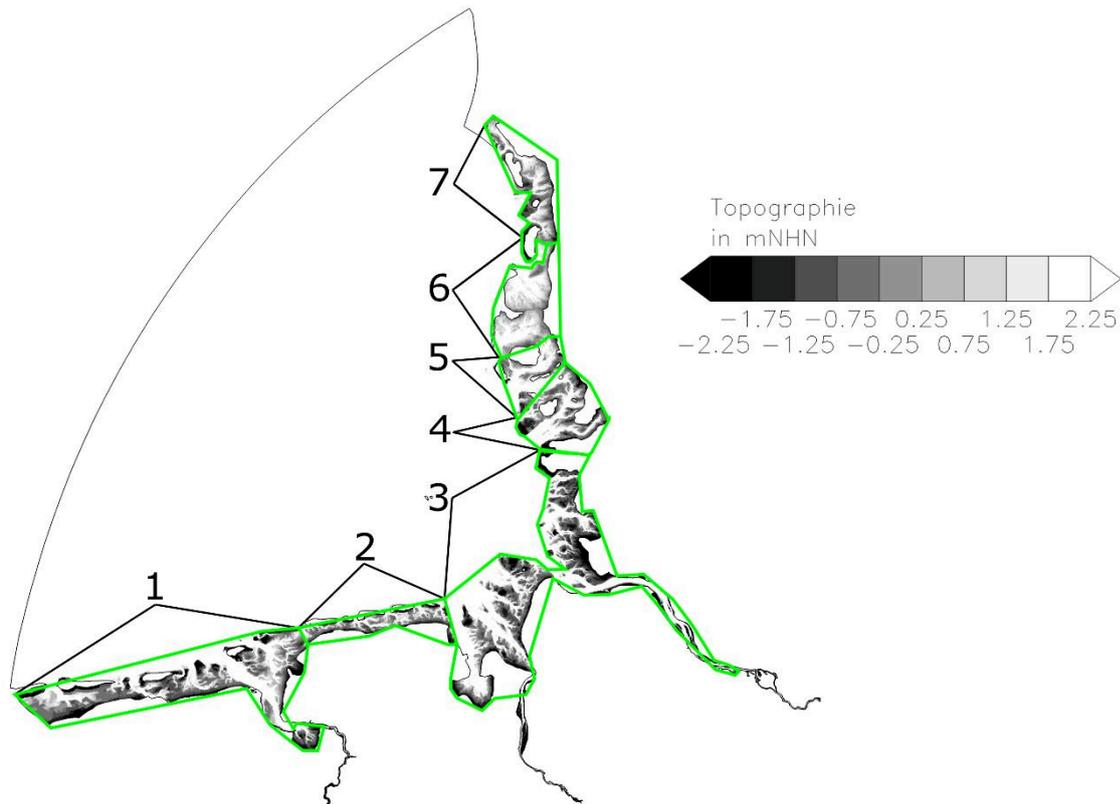


Abbildung 3-3 Aufteilung der Wattflächen in sieben Teilbereiche (1-7) in denen die Watten in ihrer Vertikalen verändert werden können. Die angewandten Veränderungen in den jeweiligen Szenarien finden sich in Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1 Alle Simulationen mit jeweils zugehörigem Meeresspiegelanstieg (SLR) und regionalen Topographieanpassungen der Watten pro Polygon (Poly.1 bis Poly.7) in Meter.

Szenarien	SLR	Poly.1	Poly.2	Poly.3	Poly.4	Poly.5	Poly.6	Poly.7
Referenz	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
F80	+0,8	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
TOPO_reg3	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
TOPO_reg7	+0,8	+0,7	+0,8	+0,7	+0,5	+0,3	+0,0	+0,3

3.3 Analysemethoden

Die Simulationsergebnisse aus dem Meeresspiegelanstiegs-Szenario werden direkt mit Ergebnissen von Simulationen aus dem Referenzlauf verglichen (F80-Referenz; Tabelle 3-1). Die Simulationsergebnisse der Topographieszenarien werden mit dem Meeresspiegelanstiegs-Szenario verglichen (TOPO_reg3-F80 bzw. TOPO_reg7-F80; Tabelle 3-1). Die hervorgerufenen Differenzen in der Tidedynamik bedingt durch einen eingesteuerten Meeresspiegelanstieg oder bedingt durch Änderungen der Topographie können dadurch differenziert betrachtet werden. Hierfür werden die Simulationsergebnisse aller Szenarien (Tabelle 3-1) einer Tidekennwertanalyse des Wasserstandes und der Strömung unterzogen. Für den Vergleich der Strömungen wird die mittlere maximale Strömungsgeschwindigkeit während der Flut und Ebbe herangezogen. Die mittlere maximale Strömungsgeschwindigkeit ist das

Mittel der maximalen Flut- bzw. Ebbstromgeschwindigkeiten pro Tide über den gesamten Analysezeitraum. Im weiteren Verlauf des Textes wird die mittlere maximale Strömungsgeschwindigkeit durch den Begriff der maximalen Flut- bzw. Ebbstromgeschwindigkeit ersetzt. Der zu analysierende Zeitraum befindet sich zwischen dem 06.07.2010 und dem 21.07.2010 und umfasst einen Spring-Nipp-Zyklus.

Zusätzlich werden Partialtidenanalysen des Wasserstandes durchgeführt, um den Gezeitenanteil (hier nur M2 und M4) aus dem Gesamtwasserstand zu extrahieren. Dies ist erforderlich, um die Ergebnisse aus den Tidekennwerten des Wasserstandes und deren Einfluss auf eine sich verändernde Tidedynamik in größerem Umfang interpretieren zu können. Für die Partialtidenanalyse wurde der Analysezeitraum erweitert (03.06.2010 - 23.07.2010), um langperiodische Partialtiden zu erfassen. Das erhöht das Spektrum und somit auch die Genauigkeit der Energieverteilung. Ausgewählte Parameter, die bei der Untersuchung zur Anwendung kamen, finden sich in Tabelle 3-2. Die Ergebnisse werden zudem mit Ergebnissen aus vorangegangenen Veröffentlichungen aus dem Abschlussbericht des Expertennetzwerkes SP-106 Nilson et al. (2020) wie auch mit der Veröffentlichung von Wachler et al. (2020) verglichen, da das benutzte Modell, die Eingangsparameter und betrachteten Zeiträume identisch sind. Eine Prüfung durch eine Differenzenanalyse von Tidekennwerten des Wasserstandes aus dem aktuellen Referenzlauf und dem Referenzlauf aus Wachler et al. (2020) bestätigt die Übereinstimmung beider Simulationen.

Tabelle 3-2 Tidekennwerte des Wasserstandes (TDKW), der Strömung (TDKV) und der Partialtidenanalyse (FRQW), die für das jeweilige Szenario ermittelt worden sind.

TDKW	TDKV	FRQW
Tideniedrigwasser (Tnw)	Max. Flutstromgeschwindigkeit	M2-Amplitude
Tidehochwasser (Thw)	Max. Ebbstromgeschwindigkeit	M4-Amplitude
Tidehub (Thb)		

4 Ergebnisse

4.1 Meeresspiegelanstiegsszenario

Um ein besseres Verständnis der resultierenden Tidedynamiken bei regionalisierten Topographieszennarien zu erhalten, wird zunächst eine kompakte Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse aus vorangegangenen Veröffentlichungen (Nilson et al. 2020; Wachler et al. 2020) mit homogener Topographieanpassung gegeben. Zudem decken sich die Vergleiche von Referenzlauf zur Simulation mit alleinigem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m, da beide Simulationen mit dem Referenzlauf und F80 aus Tabelle 3-1 identisch sind. Aus den Ergebnissen des Abschlussberichtes von Nilson et al. (2020) ist zu entnehmen, dass für den Bereich der Deutschen Bucht keine allgemeingültigen Aussagen zur Änderung von Tidekennwerten des Wasserstands getroffen werden können. Es wird vermerkt, dass mit Ausnahme des Gebiets seawärts des Nordfriesischen Wattenmeers, das mittlere Tidehochwasser relativ zum Meeresspiegelanstieg von 0,8 m in der Deutschen Bucht überwiegend zunimmt, insbesondere im Wattenmeer und in den Ästuaren (Abbildung 4-1a). Das mittlere Tideniedrigwasser nimmt ebenfalls relativ zum Meeresspiegelanstieg von 0,8 m überwiegend zu (Abbildung 4-1b). Der Tidehub zeigt in der Mehrheit der Tidebecken eine Zunahme oder nur geringfügige Änderungen (Abbildung 4-1c). Nur in Teilen des Nordfriesischen Wattenmeers (zwischen Eiderstedt und Amrum) nimmt der Tidehub deutlich ab.

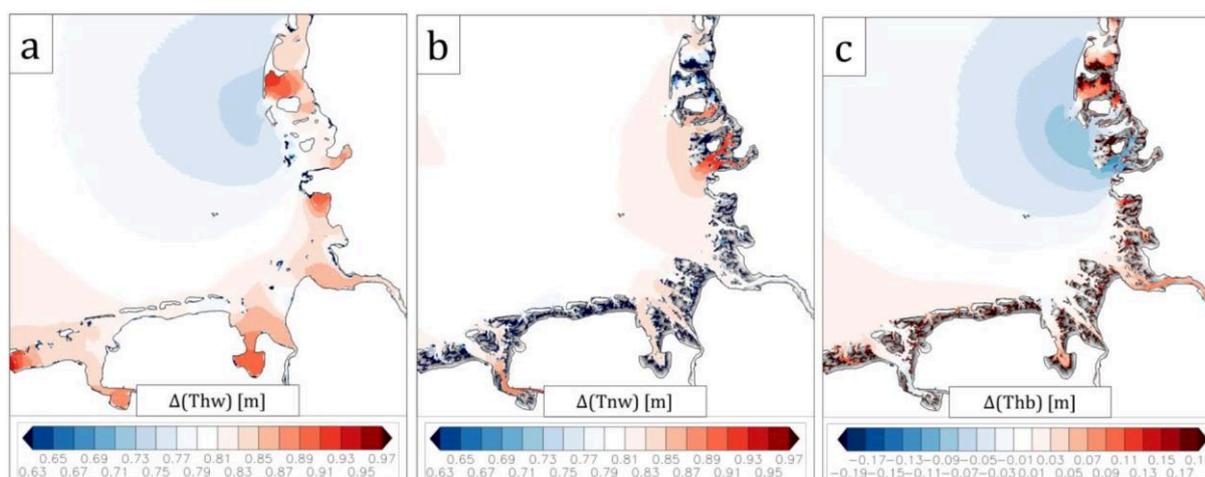


Abbildung 4-1 Änderungen im Vergleich zum Referenzzustand als Antwort auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m im Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) (Abb. 5-48 aus Nilson et al. (2020)). Identisch im Vergleich von F80 zum Referenzlauf aus Tabelle 3-1.

Aus den Ergebnissen des Abschlussberichtes (Nilson et al. 2020) wie auch aus Wachler et al. (2020) geht weiter hervor, dass aus der Tidekennwertanalyse der Strömungsgeschwindigkeit systematischere Änderungen beobachtet werden können (Abbildung 4-2). So zeigt sich in den Rinnen eine deutliche Zunahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten als Antwort auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m, wobei die Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit stets größer ausfällt. Die Zunahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in den Seegatten wird von den Autoren durch eine höhere relative Zunahme des Tideprismas im Vergleich zur relativen Zunahme des Strömungsquerschnitts von Gezeiteinlässen in die jeweiligen Tidebecken (Seegatten) begründet. In anderen Worten bedeutet dies, dass sich der Austausch der Wassermenge in einem Tidebecken zwischen der Flut- und Ebb-Phase

überproportional zur Querschnittsfläche des Tidebeckeneinlasses vergrößert und daher die Strömungsgeschwindigkeiten zunehmen müssen. Bestehende Flutstromdominanzen im Referenzlauf nehmen aufgrund eines Meeresspiegelanstieg von 0,8 m zu und bestehende Ebbstromdominanzen werden abgeschwächt, teilweise sogar in eine Flutstromdominanz umgewandelt. In allen Fällen zeigt sich jedoch, dass das Verhältnis von Flutstromgeschwindigkeit zu Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnen größer wird. Daraus kann abgeleitet werden, dass im Allgemeinen mit einem erhöhten Sedimentimport von den Rinnen zu den Wattflächen der jeweiligen Tidebecken zu rechnen ist. Im Gegensatz zu den Rinnen werden auf den Wattflächen deutlich heterogene Veränderungen in den Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt, die für eine Zu- bzw. eine Abnahme der Flutstromgeschwindigkeiten sorgen. Auf dem Großteil der höher gelegenen Wattflächen zeigt sich jedoch eine Tendenz zu einer abnehmenden maximalen Flutstromgeschwindigkeit, einer zunehmenden maximalen Ebbstromgeschwindigkeit und einem kleineren Verhältnis von Flutstrom- zu Ebbstromgeschwindigkeit.

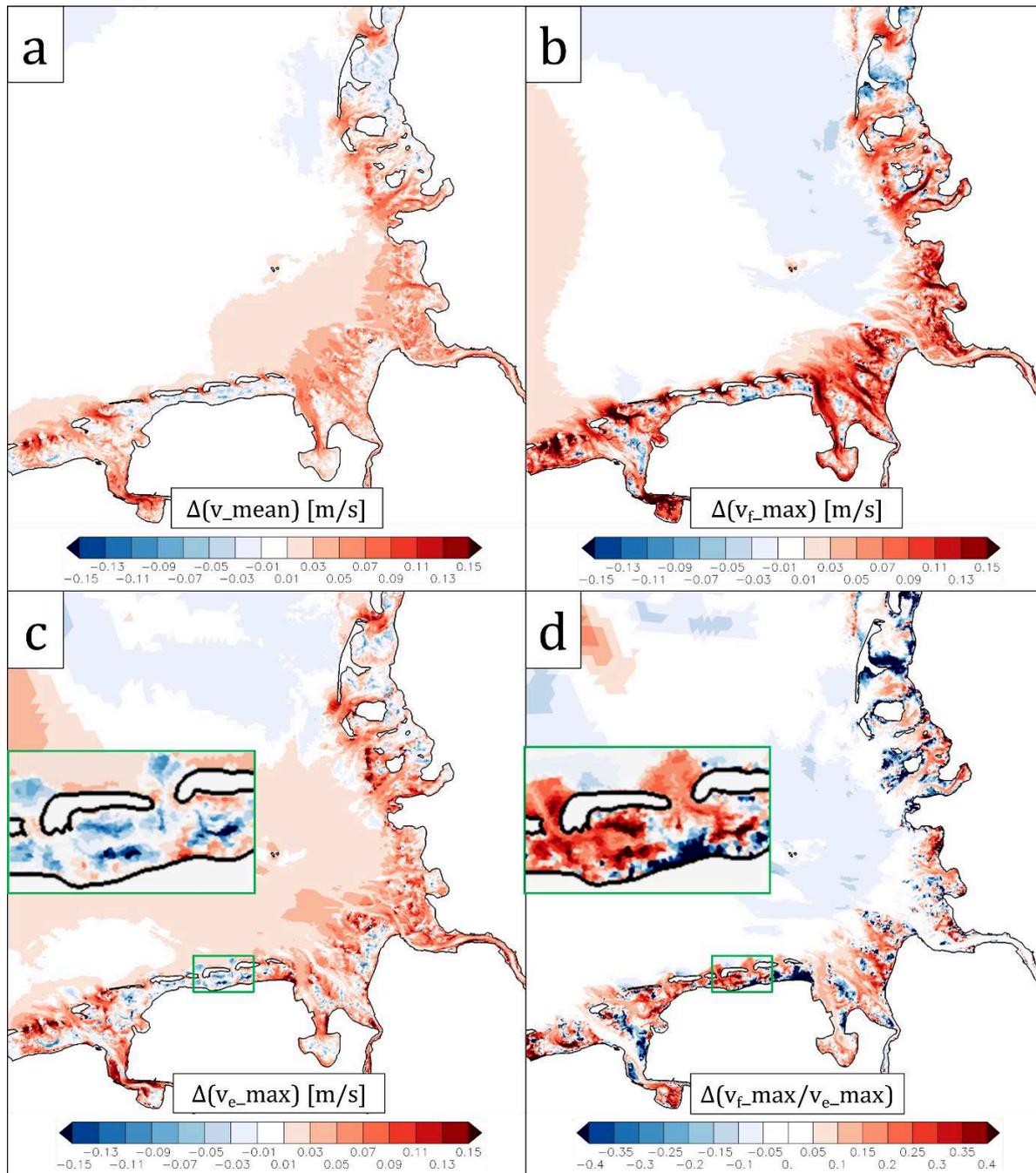


Abbildung 4-2 Änderungen im Vergleich zum Referenzzustand als Antwort auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit (a), maximale Flutstromgeschwindigkeit (b), maximale Ebbstromgeschwindigkeit (c) und das Verhältnis aus maximaler Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (d). Abbildung 5a-d aus Wachler et al. (2020). Für die Erläuterungen der Insets in Unterabbildung c und d wird auf Wachler et al. (2020) verwiesen.

4.2 Homogenes Topographieszzenario

Eine über das gesamte Wattenmeer homogene Topographieerhöhung der Wattflächen um 0,5 m und eine Rinnenvertiefung um 0,2 m zeigen sowohl eine kompensierende als auch verstärkende Wirkung der Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf die Tidewasserstände. Großräumige Änderungen sind vor allem im Bereich des Nordfriesischen Wattenmeeres zu sehen (Abbildung 4-3). So zeigen sich dort ausgeprägte Änderungen in Form eines erhöhten Tidehochwassers und eines reduzierten Tideniedrigwassers relativ zum Meeresspiegelanstieg von 0,8 m, was wiederum zu einer deutlichen Erhöhung des

Tidehubs zwischen Eiderstedt und Sylt mit Maximalwerten von 0,13 bis 0,26 m führt (Werte aus Nilson et al. (2020)).

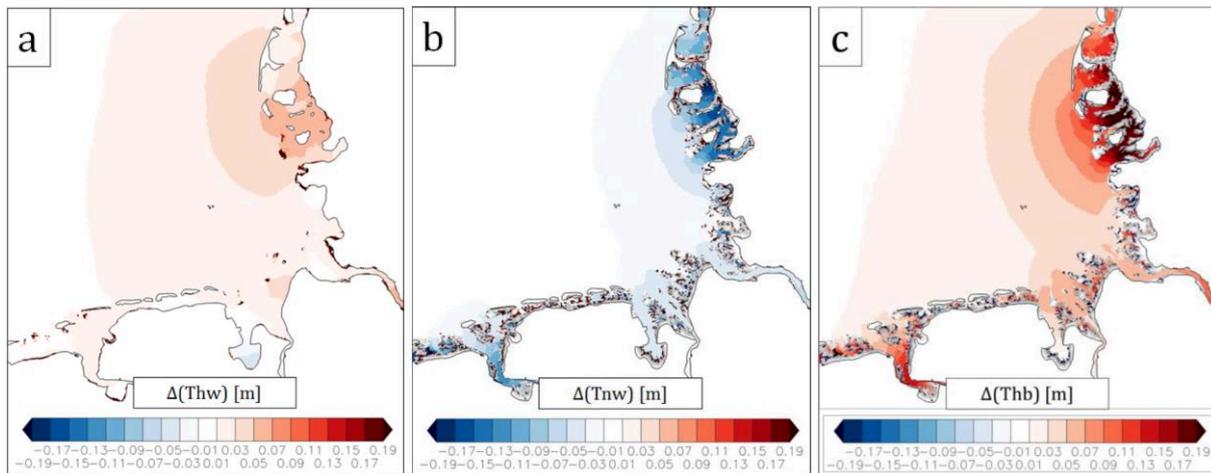


Abbildung 4-3 Änderungen im Vergleich zu einem reinen Meeresspiegelanstieg (0,8 m) von Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) als Antwort auf eine Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m). Abbildung 5-54 aus Nilson et al. (2020).

Ein kompensierender Effekt der erhöhten Watten zeigt sich vor allem in der Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in den Rinnen (Abbildung 4-4a), die zuvor bei einem alleinigen Meeresspiegelanstieg eine deutliche Zunahme erfahren hatten (Abbildung 4-2b). Der kompensierende Effekt der erhöhten Watten zeigt sich, wenn auch nicht so eindeutig wie in den Rinnensystemen, auch auf den Watten. Abschließend geht aus dem Bericht von Nilson et al. (2020) wie auch aus Wachler et al. (2020) hervor, dass die durch einen Anstieg des Meeresspiegel verstärkte Flutstromdominanz durch die Erhöhung der Watten abgeschwächt, jedoch nicht vollständig kompensiert wird.

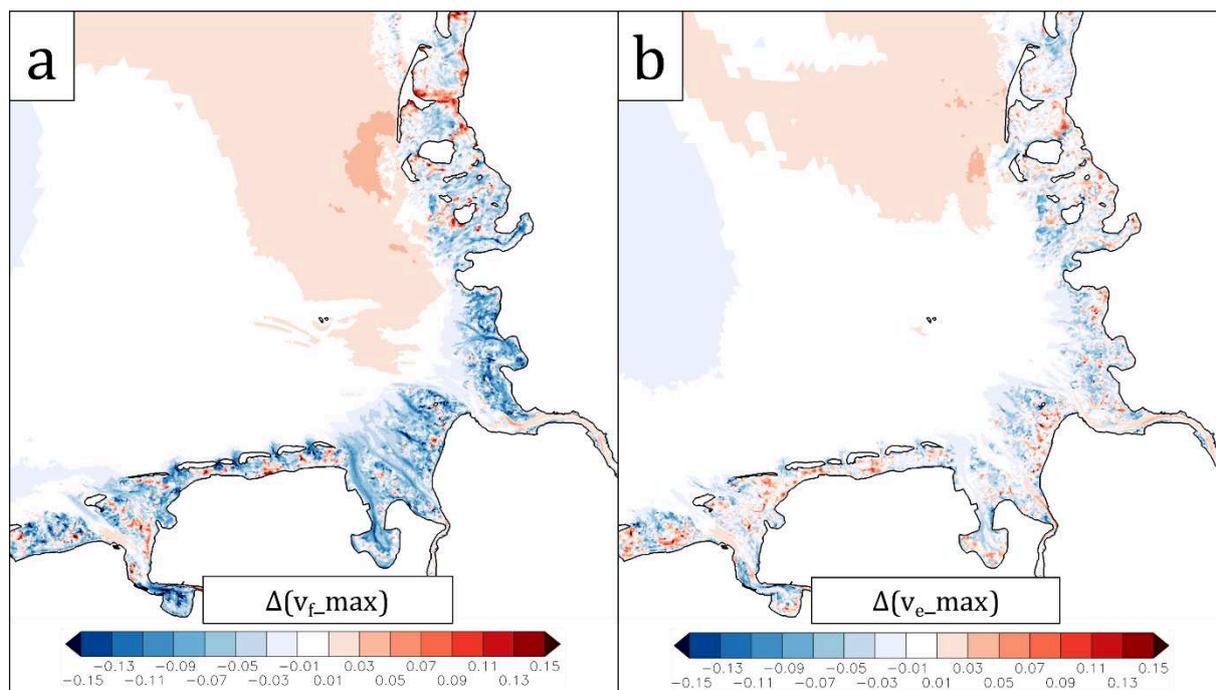


Abbildung 4-4 Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (a) und maximalen Ebbstromgeschwindigkeit (b) durch eine um 0,5 m angehobene intertidale Wattfläche und 0,2 m vertiefte Rinnen im Vergleich zu einem reinen Meeresspiegelanstieg. Abbildung 6a-b aus Wachler et al. (2020).

4.3 Regionale Topographieszzenarien

4.3.1 Tidekennwertanalyse des Wasserstandes

Wie bei den Ergebnissen der homogenen Topographieanpassung (Abbildung 4-3), führt auch die regionale Topographieanpassung (TOPO_reg7) zu ähnlichen Änderungen des Tidehochwassers, Tideniedrigwassers und des Tidehubs im Vergleich zu einem reinen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m (Abbildung 4-5). Eine Erhöhung des Tidehochwassers, eine Reduzierung des Tideniedrigwassers und eine Zunahme des Tidehubs ist erneut im Bereich des Nordfriesischen Wattenmeeres zu erkennen. Anders als im homogenen Topographieszzenario sind die Wattflächen bei Sylt nicht mit angewachsen. Folglich kommt es dort nicht zu einer vergleichbaren Reduzierung des Tideniedrigwassers (relativ zum Meeresspiegelanstieg) wie im Szenario mit homogenem Topographieszzenario (Vergleich Abbildung 4-3b mit Abbildung 4-5b) und somit auch nicht zu einem vergleichbaren Anstieg des Tidehubs, wie dies etwa im benachbarten Bereich südlich der Insel Föhr bis zur Halbinsel Eiderstedt der Fall ist (Vergleich Abbildung 4-3c mit Abbildung 4-5c). Dennoch ist eine geringe Zunahme des Tidehubs in den Wattbereichen bei Sylt zu erkennen, obwohl diese Wattgebiete kein Wachstum erfahren haben (Abbildung 4-5c).

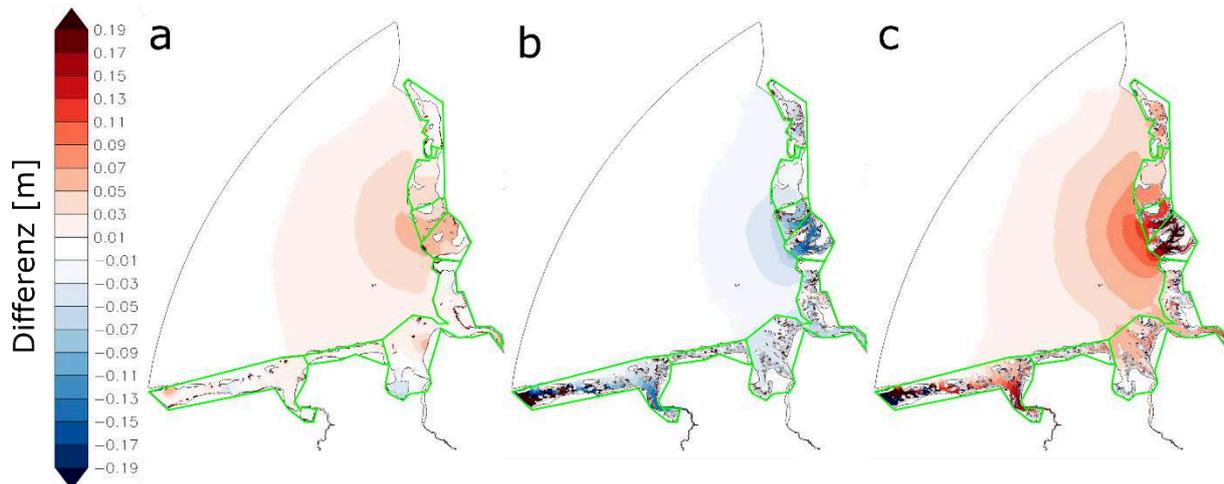


Abbildung 4-5 Änderung gegenüber einem reinen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m infolge der Topographieänderung des Szenarios TOPO_reg7 im Tidehochwasser (a), Tideniedrigwasser (b) sowie Tidehub (c).

Das weniger differenzierte Topographieszzenario TOPO_reg3 (Abbildung 4-6) zeigt von der Insel Terschelling bis zur Inneren Deutschen Bucht nahezu die gleichen Änderungsmuster im Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub wie das stärker differenzierte Topographieszzenario TOPO_reg7 (Abbildung 4-5). Im Nordfriesischen Wattenmeer zeigt sich eine großräumige Änderung in den Wasserstandskennwerten trotz des nicht vorhandenen Wattwachstums. Die Änderungen des Tidehochwassers, wie auch des Tideniedrigwassers im Nordfriesischen Wattenmeer sind zwar geringer als beim stärker differenzierten Topographieszzenario TOPO_reg7, jedoch führen sie trotzdem zu einem Anstieg des Tidehubs um bis zu 0,1 m.

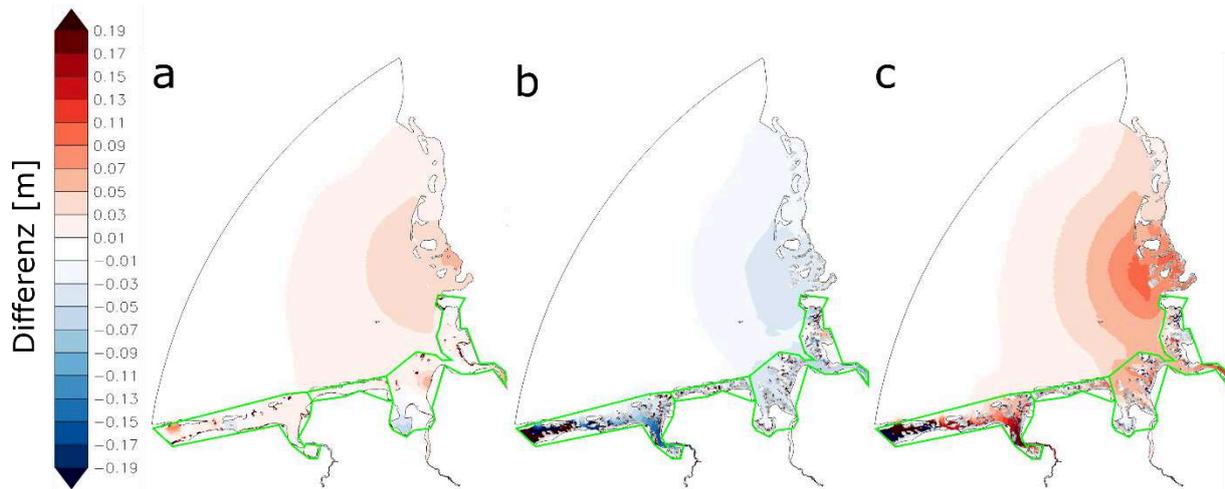


Abbildung 4-6 Änderung gegenüber einem reinen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m infolge der Topographieänderung des Szenarios TOPO_reg3 von Tidehochwasser (a), Tideniedrigwasser (b) sowie Tidehub (c).

4.3.2 Partiahtidenanalyse

Die Änderungen der M2-Amplitude in der Modellsimulation mit einem Meeresspiegelstieg von 0,8 m im Vergleich zum Referenzzustand weist eine Abnahme der M2-Amplitude um etwa 4 cm in den Bereichen der Heverströme (Norderhever und Heverstrom), südöstlich bis südlich der Insel Pellworm bis zur Insel Föhr auf (Abbildung 4-7a) und ist vergleichbar mit dem Ergebnis von Rasquin et al. (2020). Die weiträumige Änderung der M2-Amplitude ähnelt überwiegend der Entwicklung des Tidehubs in Abbildung 4-1c. Bei dem weniger differenzierten Topographieszenario TOPO_reg3 erfährt der direkte Bereich über Eiderstedt und die Heverströme einen geringeren Anstieg der M2-Amplitude als in benachbarten Tidebecken (Abbildung 4-7b). Eine Abnahme der M4-Amplitude im gleichen Gebiet (Abbildung 4-8b), könnte zu dem geringeren Anstieg des Tidehubs in den Wattgebieten der Heverströme beitragen. Im stark differenzierten Topographieszenario TOPO_reg7 zeigt sich im ganzen Wattenmeerraum, einschließlich im Bereich der Heverströme ein deutlicher Anstieg der M2-Amplitude (Abbildung 4-7c) im Vergleich zum Referenzzustand. Die Abnahme der M4-Amplitude ist in dem Bereich wesentlich geringer ausgeprägt (Abbildung 4-8c) als im TOPO_reg3 Szenario und zeigt die deutlichsten Reduzierungen in den Wattgebieten bei Sylt, die kein Wattwachstum erfahren haben. Generell lässt sich sagen, dass die durch einen Meeresspiegelanstieg reduzierte M4-Amplitude (Abbildung 4-8a) in jenen Bereichen wieder vergrößert wird (und damit der Effekt des Meeresspiegelanstiegs kompensiert wird), in denen die Watten erhöht wurden (Polygone 1-3 in Abbildung 4-8b und Polygone 1-5 und 7 in Abbildung 4-8c).

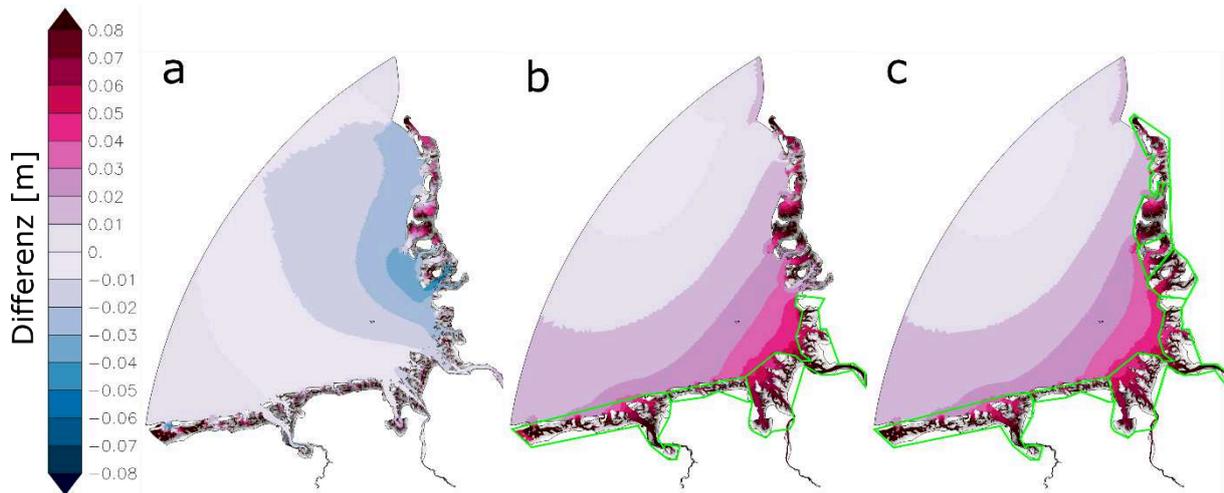


Abbildung 4-7 Änderung der M2-Amplitude gegenüber des Referenzzustandes aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m (a), in Verbindung mit der weniger differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg3 (b) und der stärker differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg7 (c).

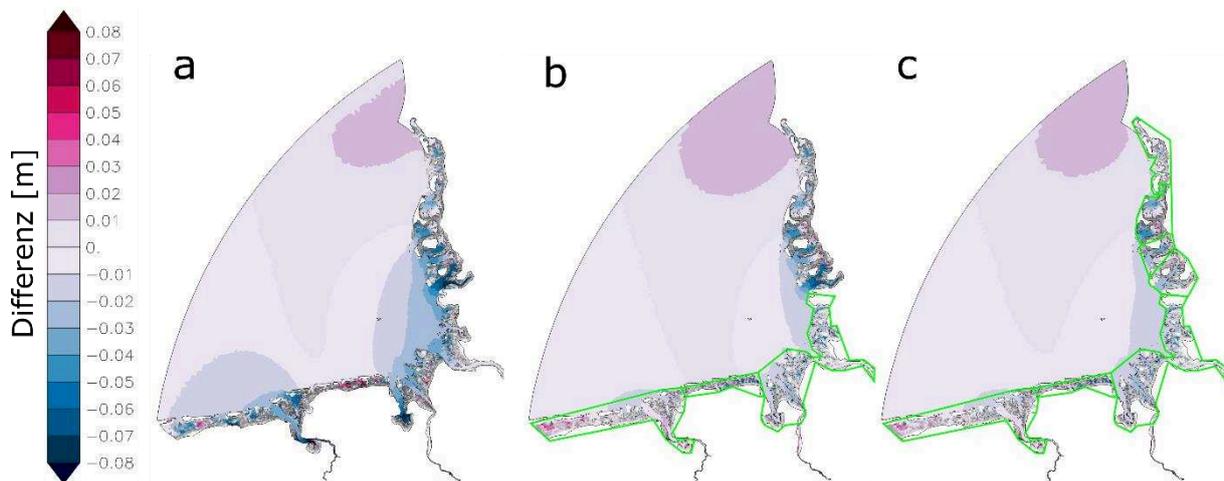


Abbildung 4-8 Änderung der M4-Amplitude gegenüber des Referenzzustandes aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m (a) und in Kombination mit der geringer differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg3 (a) und der stärker differenzierten topographischen Anpassung TOPO_reg7 (b).

4.3.3 Tidekennwertanalyse der Strömung

Bei der Betrachtung der Änderungen in den maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten zeigt sich, wie bereits bei Wachler et al. (2020), ein eher systematisches Bild. Im weniger differenzierten Topographieszenario TOPO_reg3 führt die Erhöhung der Wattgebiete zu einer deutlicheren Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in den Tidebecken mit den angepassten Watten. Die größte Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten erfolgt vor allem in den Rinnen (Abbildung 4-9a). Bei der maximalen Ebbstromgeschwindigkeit ist der geschwindigkeitsreduzierende Effekt durch die Topographieerhöhung geringer, sowohl auf den angepassten Wattflächen als auch in den Rinnen (Abbildung 4-9b). Der Effekt der schwächeren Reaktion der Ebbstromgeschwindigkeit (im Vergleich zur Flutstromgeschwindigkeit) war auch in Bezug auf den Meeresspiegelanstieg zu beobachten (vgl. Abbildung 4-2c mit Abbildung 4-2b). Diese systematischen Änderungen in den maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten auf den erhöhten Watten sind ebenfalls im stärker differenzierten Topographieszenario TOPO_reg7 zu erkennen. Je höher das regionale Wattwachstum, desto stärker reduzieren sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der jeweiligen Wattregion (Abbildung

4-9c, d). Betrachtet man nun die Wattregionen, die kein vertikales Wachstum erfahren haben (Nordfriesland), so fällt auf, dass sich dort die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten erhöht haben. Dies ist vor allem im weniger differenzierten Topographieszenario TOPO_reg3 im Bereich des Nordfriesischen Wattenmeeres an den deutlichen Anstiegen in den Rinnensystemen zu erkennen (Abbildung 4-9a). Die Größenordnung der Zunahme ist jedoch deutlich kleiner als die Größenordnung der Abnahme in den Wattregionen mit vertikalem Wachstum in der südlichen Deutschen Bucht. Eine geringe Zunahme der maximalen Ebbstromgeschwindigkeit nördlich der Halbinsel Eiderstedt beschränkt sich vorwiegend auf die Rinnen (Abbildung 4-9b). Die Zunahmen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten sind auch im stärker differenzierten Topographieszenario TOPO_reg7 im Bereich der Wattregionen der Insel Sylt zu erkennen, welche kein Wattwachstum erfuhren (Abbildung 4-9c). Die benachbarten Tidebecken, sowohl in Richtung Dänemark als auch nach Süden bis unterhalb der Nordfriesischen Insel Föhr, zeigen ebenfalls leicht zunehmende maximale Flutstromgeschwindigkeiten, obwohl diese Wattregionen ein moderates Wattwachstum von 0,3 m erfuhren. Im stärker differenzierten Topographieszenario TOPO_reg7 zeigt sich im Bereich der Heverströme eine geringfügige Abnahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten. Im Fall der maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten zeigt sich keine klare systematische Änderung im Bereich des Nordfriesischen Wattenmeeres (Abbildung 4-9d).

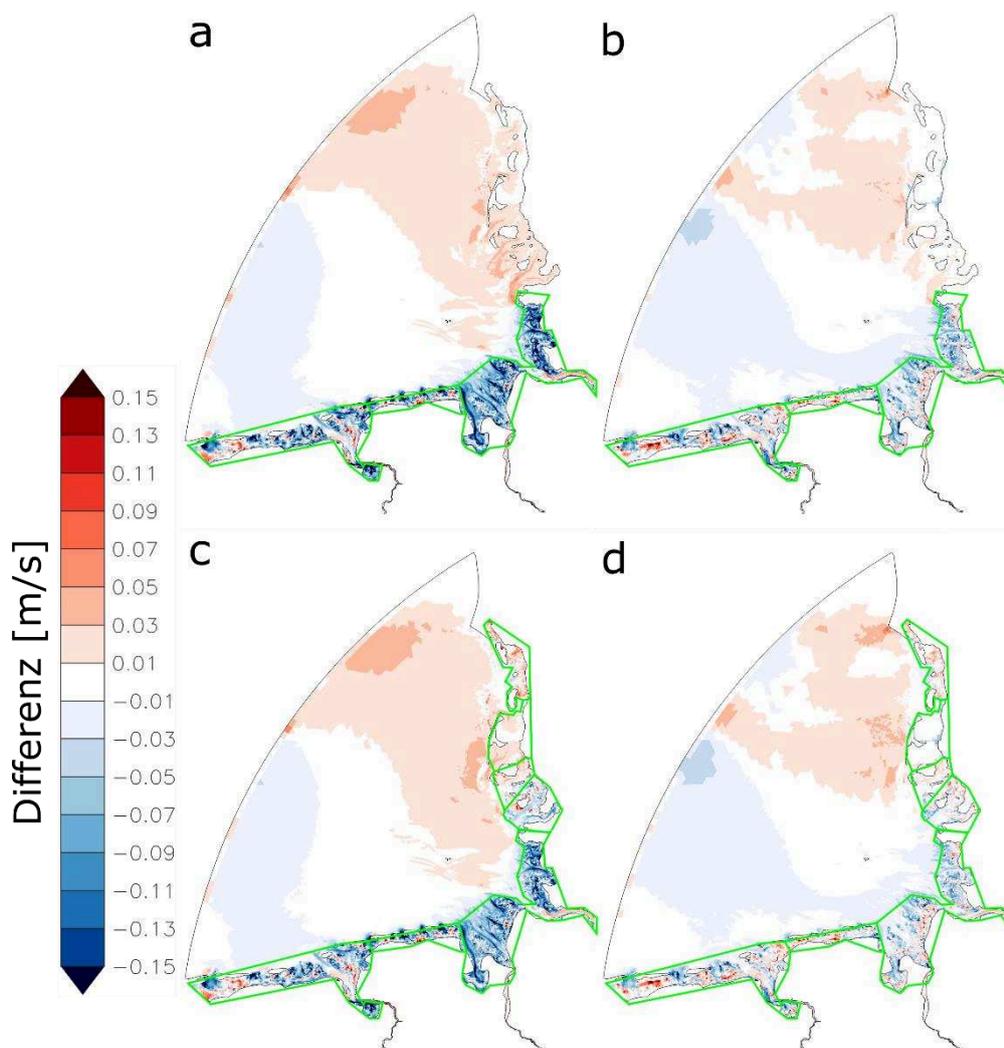


Abbildung 4-9 Änderungen im Vergleich zu einem alleinigen Meeresspiegelanstieg (0,8 m) durch das regionale Wattwachstum Szenario TOPO_reg3 auf die maximale Flutstromgeschwindigkeit (a) und maximale Ebbstromgeschwindigkeit (b). Gleiches für das regionale Wattwachstum Szenario TOPO_reg7 in Hinblick auf die maximale Flutstromgeschwindigkeit (c) und maximale Ebbstromgeschwindigkeit (d).

5 Diskussion

Grundlegend zeigen sich auf den regional erhöhten Wattgebieten die gleichen Änderungen in der regionalen Tidedynamik wie in den Ergebnissen der homogenen Topographieszenarien von Nilson et al. (2020) und Wachler et al. (2020). Die Watterhöhung verringert das Tideprisma in dem betreffenden Tidebecken und somit auch die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in den dazugehörigen Rinnensystemen (v.a. in den Seegatten). Die Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten ist dabei stärker ausgeprägt als die Reduzierung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten während der Ebb-Phase. In den landseitigen Abschnitten der Rinnensysteme (im Inneren der Tidebecken) kommt es durch die Watterhöhung sogar teilweise zu einer Verstärkung der Ebbstromgeschwindigkeit. Die Reduzierung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit durch das Wattwachstum führt wiederum zu einer geringeren Energiedissipation. Die verringerte Energiedissipation könnte ein Grund für den erhöhten Tidehub sein. Jacob et al. (2016) zeigten bereits, dass bei Änderungen der Topographie im Wattenmeer die größten Auswirkungen auf die Tidewelle im Nordfriesischen Wattenmeer auftreten. Dieses Ergebnis findet sich auch in Nilson et al. (2020).

Bei den regionalen Topographieszenarien zeigt sich ein ähnliches Bild bezüglich der Zunahme des Tidehubs. Obwohl die Tidebecken bei Sylt im stark differenzierten Topographieszenario TOPO_reg7 nicht aufwachsen, erhöht sich in diesem Szenario der Tidehub dort leicht (Abbildung 4-5c). Dies deutet bereits auf überregionale Änderungen in der Tidedynamik hin (v.a. der Tidewasserstände), welche sich nicht auf einzelne Tidebecken beschränken.

Eine überregionale Änderung in der Tidedynamik wird besonders am Beispiel des weniger stark differenzierten Topographieszenarios TOPO_reg3 erkennbar. Obwohl die Wattgebiete nördlich der Halbinsel Eiderstedt kein Wachstum erfahren haben, zeigt sich dennoch eine großräumige Zunahme des Tidehubs im Nordfriesischen Wattenmeer (Abbildung 4-6c). Hierfür ist vor allem eine Zunahme der M2-Amplitude als Antwort auf die erhöhten Watten im südlichen Teil der Deutschen Bucht verantwortlich (Abbildung 4-7b). Diese Beobachtungen machten auch Jacob et al. (2016), die ebenfalls die größten Änderungen der M2- und M4-Amplitude im Nordfriesischen Wattenmeer als Reaktion einer weiträumigen veränderten Topographie ermittelten. Als Grund für diese Änderung der M2- und M4-Amplituden im Nordfriesischen Wattenmeer bzw. in der nördlichen Deutschen Bucht nennen die Autoren die Nähe zu einem amphidromischen Punkt. Jordan et al. (2021) gehen hier noch einen Schritt weiter und zeigen in ihrer Modellstudie, wie in einem Meeresspiegelanstiegsszenario (0,8 m) die M2-Amplitude in der Deutschen Bucht als Antwort auf eine sich stetig erhöhte homogene Wattwachstumsrate (0 – 0,8 m) im gesamten Wattenmeerraum zunimmt. Die Erhöhung der Watten führt den Autoren zu Folge zu einer Reduzierung der Energiedissipation im Bereich des Wattenmeeres. In den Szenarien ist auch eine Verschiebung des amphidromischen Punktes zu sehen. Die Verschiebung des amphidromischen Punktes in der Deutschen Bucht in Richtung Nordosten ist nach den Autoren von Jordan et al. (2021) umso größer, je mehr Energie dissipiert wird. Die Abnahme (Abbildung 4-7a) und Zunahme (Abbildung 4-7b, c) der M2-Amplitude aufgrund des in dieser Arbeit vorgenommenen regionalen Wattwachstums deutet auf einen ähnlichen Mechanismus als Grund für die Änderung des Tidehubs im Nordfriesischen Wattenmeer hin.

Die Unterschiede in der Zunahme der M2-Amplitude zwischen den zwei regionalisierten Topographieszenarien (Abbildung 4-7b, c), können als Resultat der unterschiedlich hohen Wattwachstumsraten und der unterschiedlichen Lokationen der Tidebecken, in denen die Watten angehoben worden sind, betrachtet werden. So kommt es im Topographieszenario TOPO_reg3 zu einer geringen Erhöhung des

Tidehubs im Nordfriesischen Wattenmeer als Folge einer Watterhöhung im Ostfriesischen Wattenmeer und der Inneren Deutschen Bucht. Eine ebenfalls erhöhte Watttopographie im Nordfriesischen Wattenmeer (TOPO_reg7 Szenario) lässt den Tidehub im gleichen Gebiet stärker ansteigen, da es nun zu einer direkten lokalen Reduzierung der Energiedissipation kommt. Die Ergebnisse der Partialtidenanalyse zeigen auch, dass es in diesem Gebiet zu einer deutlichen Reduzierung der M4-Amplitude im Vergleich zum Referenzzustand gekommen ist (Abbildung 4-8b). Die Reduzierung der M4-Amplitude im TOPO_reg3 Szenario könnte der Grund dafür sein, dass der Tidehub im Nordfriesischen Wattenmeer nicht im gleichen Maße ansteigt wie im TOPO_reg7 Szenario (Abbildung 4-8c). Diese Schlussfolgerung wird von den Ergebnissen von Jacob et al. (2016) gestützt, deren größte Differenzen in den M2- und M4-Amplituden, in den gleichen Gebieten auftreten, in denen auch in dieser Arbeit die größten Differenzen ermittelt worden sind (Abbildung 4-8b, c). Das vereinfachte Topographie-Szenario TOPO_reg3 veranschaulicht, dass lokale Änderungen in der Topographie nicht nur zu einer lokalen Veränderung der Tidewelle führen, sondern dass auch überregionale Veränderungen der Tidewelle hervorgerufen werden können. So können z.B. topographische Änderungen im Bereich des Ostfriesischen Wattenmeeres zu einer Verstärkung des Tidehubs im Nordfriesischen Wattenmeer führen.

Die systematischen Topographieänderungen im Wattenmeer gehen auch mit Änderungen der Tideasymmetrie einher, die maßgeblich den Sedimenttransport in das betreffende Tidebecken steuert (Friedrichs und Aubrey 1988). Eine kürzere Flutstromphase mit höheren Flutstromgeschwindigkeiten im Vergleich zu einer längeren Ebbstromphase mit geringeren Ebbstromgeschwindigkeiten führt zu einem Sedimentimport in das betreffende Tidebecken. Die Tideasymmetrie kann u.a. durch das Verhältnis der maximalen Flut- zu den maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten bewertet werden, die auch als *peak current asymmetry* (Jacob und Stanev 2021) bezeichnet wird. Die Tideasymmetrie könnte noch durch weitere Größen-Verhältnisse bewertet werden (Verhältnis der mittleren Flutstrom- zur mittleren Ebbstromgeschwindigkeit, Verhältnis von Flutstrom- zu Ebbstromdauer, etc.). Die *peak current asymmetry* ist jedoch am geeignetsten, um Aussagen für den residuellen Sedimenttransport aus der Tideasymmetrie ableiten zu können, da der Sedimenttransport nicht-linear mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt (in kurzer Dauer sehr hoher Strömungsgeschwindigkeit kann in der Regel mehr Sediment transportiert werden als in einer doppelt so langen Zeit mit halb so großer Strömungsgeschwindigkeit, zumindest in Bezug auf Sandfraktionen). Der Vergleich der Änderungen in den maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten zeigt ebenfalls überregionale Auswirkungen auf die Tideasymmetrie. Für ein einfacheres Systemverständnis kann hierfür das weniger differenzierte Topographieszenario TOPO_reg3 herangezogen werden. Zu sehen ist, dass sowohl die maximale Flutstromgeschwindigkeit als auch die maximale Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnensystemen des Nordfriesischen Wattenmeeres infolge der Watterhöhung im Ostfriesischen Wattenmeer zunehmen. Dabei ist die Zunahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (Abbildung 4-9a) stärker als die Zunahme der maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten (Abbildung 4-9b). Dies führt zu einer Intensivierung der Flutstromdominanz und einem Sedimentimport in die betreffenden Tidebecken. Die überregionalen Auswirkungen (in Nordfriesland) infolge der Watterhöhung im Ostfriesischen Wattenmeer sind um ein Vielfaches (ca. Faktor 5) kleiner als die lokalen Auswirkungen im Ostfriesischen Wattenmeer selbst. Dies steht im Gegensatz zu den Auswirkungen auf die Wasserstände, bei welchen die überregionalen Effekte zum Teil sogar größer als die lokalen Effekte sind. An dieser Stelle sei nochmal erwähnt, dass ein solch vereinfachtes regionales Wattwachstum-Szenario wie das TOPO_reg3 dem Systemverständnis dient, sich aber in dieser hier betrachteten Form für die Zukunft vermutlich nicht abzeichnen wird. Das TOPO_reg_7 Szenario ist nach den in Kapitel 3.2 genannten Punkten zur Sedimentverfügbarkeit ein realistischeres Szenario für die zukünftige Entwicklung der Watten und der daraus resultierende Einfluss auf die Tidendynamik als das TOPO_reg3 Szenario. Dennoch sind auch diese Prognosen mit

Unsicherheiten behaftet, da auch dieses Szenario mit mehreren Annahmen versehen ist. Nichtsdestotrotz, ist bei der Betrachtung des stärker differenzierten Topographieszenario TOPO_reg7 ein überregionaler Effekt im Hinblick auf eine Intensivierung der Flutstromdominanz vor allem in den Sylter Tidebecken ebenfalls auszumachen (Vergleich Abbildung 4-9c mit Abbildung 4-9d).

6 Fazit

In der hier vorliegenden Arbeit zeigt sich, dass die hydrodynamischen Antriebsmechanismen für einen erhöhten Sedimentimport in jenen Tidebecken des Wattenmeeres zunehmen, in denen ein geringes oder gar kein Wattwachstum bei Meeresspiegelanstieg angenommen wird. Im Nordfriesischen Wattenmeer wird das Verhältnis von maximaler Flutstrom- zu maximaler Ebbstromgeschwindigkeit infolge der ausschließlich in der südlichen Deutschen Bucht angehobenen Watten verstärkt (Abbildung 4-9). Das Wattwachstum in der südlichen Deutschen Bucht hat damit einen (wenn auch geringen) positiven Effekt auf das Wattwachstum in Nordfriesland. Mit dieser erhöhten Importkapazität könnte bei einer ausreichend hoher Sedimentverfügbarkeit einem Sedimentdefizit entgegengewirkt werden, da ein dynamisches morphologisches Gleichgewicht (Stive und Wang 2003) innerhalb der betreffenden Tidebecken angestrebt wird. Eine relative Stärkung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Ebbstromgeschwindigkeiten in den Sylter Tidebecken (Abbildung 4-9c, d) könnte langfristig dafür sorgen, dass die Wachstumsraten dieser Wattbereiche durch ansteigenden Sedimenteintrag erhöht werden. Ist dies durch mangelnde Sedimentverfügbarkeit nicht möglich, könnten Sandaufspülungen, wie sie bereits aus Küstenschutzgründen vor der nordfriesischen Insel Sylt zur Anwendung kommen, eine denkbare Maßnahme bilden, um dortige Wattwachstumsraten zu fördern. Dass das Sylter Tidebecken bereits von Sandaufspülungen profitierte, zeigen die Untersuchungsergebnisse des Projektes BASEWAD (Fricke und Weilbeer 2020). Hier wurde in morphodynamischen Simulationen ein Transport von Sedimenten in das Hörnum Tidebecken beobachtet, die zuvor im südlichen Bereich der Insel Sylt aufgespült worden waren. Die Autoren zeigen weiter auf, dass hoher Wellengang unter Sturmbedingung den Transport von zuvor aufgespülten Sedimenten in das Tidebecken sogar begünstigen. Sandaufspülungen wären somit ein probates Mittel für Tidebecken mit einer deutlichen Exposition gegenüber Westwinden, da diese Gebiete durch die einhergehende Wellenaktivität unter Sturmbedingungen ein erhöhtes Erosionspotential aufzeigen und daher geringere Wattwachstumsraten aufweisen können (Fagherazzi und Wiberg 2009). Allerdings sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Sandaufspülungen vor Sylt aus Gründen des Küstenschutzes vorgenommen werden. Die mittlere Korngröße der Sandaufspülungen beträgt $D_{50}=430\ \mu\text{m}$ (LKN-SH 2020) und bietet folglich einen gewissen Schutz vor einer erneuten Remobilisierung des eingebrachten Materials. Sollte es in Zukunft, wie im TOPO_reg7 Szenario dargestellt, zu einem Anstieg der Flutdominanz an den Sylter Tidebecken kommen (Abbildung 4-9c), könnten Sedimentvorspülungen vorgenommen werden, um auch das Sedimentdefizit der Sylter Tidebecken auszugleichen. Das vorgespülte Sediment sollte dann aber eine angepasste Korngrößenzusammensetzung erhalten damit eine effizientere Verteilung der Sedimente in den Tidebecken gewährleistet werden kann.

Dieser Bericht hebt hervor, dass Untersuchungen zu regionalen Wattwachstumsraten die bestehenden Erkenntnisse einer sich ändernden Tidedynamik im Wattenmeer aus homogenen Topographieszenarien ergänzen. Jacob et al. (2016) zeigen bereits, dass selbst extrem kleine Änderungen der Topographie zu Änderungen in der Tidedynamik führen könnten. Die vorliegende Arbeit trägt zu diesen Erkenntnissen bei und zeigt auf, dass bei einem zukünftigen Wattwachstum (ob auf natürliche Weise oder mit Anpassungsmaßnahmen) in einzelnen Tidebecken oder Wattbereichen sowohl mit einer sich ändernden Tidedynamik im selbigen Tidebecken als auch mit Änderungen der Tidedynamik in benachbarten oder weiter entfernten Tidebecken gerechnet werden kann. Dabei sind die überregionalen Effekte einer veränderten Wattenmorphologie insbesondere im Hinblick auf Tidewasserstände deutlich, in Bezug auf Flutstrom- und Ebbstromgeschwindigkeit sind sie schwächer.

Um die morphodynamischen Prozesse zu verstehen und die damit verbundene zukünftige Wattentwicklung besser abschätzen zu können, sind morphodynamische Simulationen notwendig, in denen die Rückkopplung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport sowie der Einfluss des Seegangs berücksichtigt wird. Ein solches morphodynamisches Modell zu etablieren und mit seiner Hilfe die morphodynamische Entwicklung im Küstenbereich aufzuzeigen, ist ein weiteres Ziel im Schwerpunkt 101 des BMDV-Expertenetzwerks. Mit dieser Herangehensweise soll das Zusammenspiel zwischen Änderungen in der Tidedynamik und deren Auswirkungen auf die morphologische Entwicklung der Wattgebiete im Deutschen Wattenmeer mit seinen Ästuaren besser eingegrenzt und eingeordnet werden können. Dies ermöglicht zukünftige Herausforderungen für die Seeschifffahrt unter dem Einfluss des Klimawandels zu identifizieren und Lösungsansätze für kritische Faktoren und Bereiche zu entwickeln.

7 Abkürzungen

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DWD	Deutscher Wetterdienst
HN Modelle	Hydrodynamisch-numerische Modelle
m ü. NHN	Meter über Normalhöhennull
QSV	Qualitätsstufe des Verkehrsablaufes
Thw	Tidehochwasser
Tnw	Tideniedrigwasser
Thb	Tidehub
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

8 Literaturverzeichnis

Ahrendt Kai (2006): Ein Beitrag zur holozänen Entwicklung Nordfrieslands. *Die Küste* 71:1–32

BAW (2005): Mathematical Module SediMorph. Validation Document Version 1.1. Unter Mitarbeit von Andreas Malcherek, Friederike Piechotta und Denise Knoch. Hamburg.

BAW (Hg.) (2020): Expertennetzwerk: Küste. FuE-Abschlussbericht B3955.03.04.7023. Unter Mitarbeit von Caroline Rasquin, Elisabeth Rudolph, Rita Seiffert, Benno Wachler und Norbert Winkel. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107128>.

Becherer, Johannes; Hofstede, Jacobus; Gräwe, Ulf; Purkiani, Kaveh; Schulz, Elisabeth; Burchard, Hans (2018): The Wadden Sea in transition - consequences of sea level rise. In: *Ocean Dynamics* 68 (1), S. 131–151. DOI: 10.1007/s10236-017-1117-5.

Benninghoff, Markus; Winter, Christian (2019): Recent morphologic evolution of the German Wadden Sea. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 9293. DOI: 10.1038/s41598-019-45683-1.

Bollmeyer, Christoph; Keller, Jan D.; Ohlwein, Christian; Wahl, S.; Crewell, Susanne; Friederichs, P. et al. (2015): Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 141 (686), S. 1–15. DOI: 10.1002/qj.2486.

Casulli, Vincenzo; Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, tree-dimensional model based on the shallow water equations. In: *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 32 (3), S. 331–348.

CPSL (2010): Third Report. The role of spatial planning and sediment coastal risk management. Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise (CPSL). Wilhelmshaven, Germany. In: *Wadden Sea Ecosystem* 28.

Dissanayake, D. M. P. K.; Ranasinghe, R.; Roelvink, J. A. (2012): The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. In: *Climatic Change* 113 (2), S. 253–276. DOI: 10.1007/s10584-012-0402-z.

Fagherazzi, S.; Wiberg, P. L. (2009): Importance of wind conditions, fetch, and water levels on wave-generated shear stresses in shallow intertidal basins. In: *J. Geophys. Res.* 114 (F3), S. 211. DOI: 10.1029/2008JF001139.

Fricke, Benjamin; Weilbeer, Holger (2020): BASEWAD (BALancing SEdiment deficits in the WADden Sea) - Systemstudien zur morphologischen Entwicklung im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg (B3955.03.04.70238).

Friedrichs, Carl T.; Aubrey, David G. (1988): Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries. A synthesis. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27 (5), S. 521–545.

Gayer, Gerhard; Dick, Stephan; Pleskachevsky, Andrey; Rosenthal, Wolfgang (2006): Numerical modeling of suspended matter transport in the North Sea. In: *Ocean Dynamics* 56 (1), S. 62–77. DOI: 10.1007/s10236-006-0070-5.

Heyer, Harro; Schrottke, Kerstin (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod). Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten.

- Hofstede, Jacobus (2002): Morphologic responses of Wadden Sea tidal basins to a rise in tidal water levels and tidal range. In: *Z. Geomorph. N. F.* 46 (1), S. 93–108.
- Hofstede, Jacobus L. A. (2015): Theoretical considerations on how Wadden Sea tidal basins may react to accelerated sea level rise. In: *zfg* 59 (3), S. 377–391. DOI: 10.1127/zfg/2014/0163.
- Hofstede, Jacobus L. A.; Stock, Martin (2018): Climate change adaptation in the Schleswig-Holstein sector of the Wadden Sea. An integrated state governmental strategy. In: *J Coast Conserv* 22 (1), S. 199–207. DOI: 10.1007/s11852-016-0433-0.
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Unter Mitarbeit von Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Hg. v. Cambridge University Press. Intergovernmental Panel on Climate.
- Jacob, Benjamin; Stanev, Emil V. (2021): Understanding the Impact of Bathymetric Changes in the German Bight on Coastal Hydrodynamics. One Step Toward Realistic Morphodynamic Modeling. In: *Front. Mar. Sci.* 8, S. 9293. DOI: 10.3389/fmars.2021.640214.
- Jacob, Benjamin; Stanev, Emil Vassilev; Zhang, Yinglong Joseph (2016): Local and remote response of the North Sea dynamics to morphodynamic changes in the Wadden Sea. In: *Ocean Dynamics* 66 (5), S. 671–690. DOI: 10.1007/s10236-016-0949-8.
- Jordan, Christian; Visscher, Jan; Schlurmann, Torsten (2021): Projected Responses of Tidal Dynamics in the North Sea to Sea-Level Rise and Morphological Changes in the Wadden Sea. In: *Front. Mar. Sci.* 8, S. 40171. DOI: 10.3389/fmars.2021.685758.
- LKN-SH (2020): National Analysis. Interreg - North Sea Region - Building with Nature. Online verfügbar unter <https://northsearegion.eu/building-with-nature/output-library/>.
- Maan, D. C.; van Prooijen, B. C.; Wang, Z. B. (2018): Progradation speed of tide-dominated tidal flats decreases stronger than linearly with decreasing sediment availability and linearly with sea level rise. In: *Geophys. Res. Lett.* DOI: 10.1029/2018GL079933.
- Mahavadi, Tara (2019): Einfluss der Rinnentiefe in topografischen Szenarien des Wattenmeers auf die Tidedynamik. Studienarbeit. TUHH, Hamburg. Wasserbau.
- Milbradt, Peter; Kösters, Frank; Putzar, Bert; Plüß, Andreas (2015): Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes. In: *Die Küste* 83, S. 147–165.
- Nilson, Enno; Astor, B.; Bergmann, Linda; Fischer, H.; Fleischer, C.; Hauer, G. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.
- Rasquin, Caroline; Seiffert, Rita; Wachler, Benno; Winkel, Norbert (2020): The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. In: *Ocean Sci.* 16 (1), S. 31–44. DOI: 10.5194/os-16-31-2020.
- Reise, K.; Baptist, M.; Burbridge, P.; Dankers, N.M.J.A.; Fischer, L.; Flemming, B. W. (2010): The Wadden Sea – A Universally Outstanding Tidal Wetland. The Wadden Sea Quality Status Report - Synthesis Report 2010. In: *Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany*.

Ricklefs, Klaus; Asp Neto, Nils E. (2005): Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area Along the German North Sea Coast. In: *Die Küste* (69), S. 93–127.

Stive, Marcel J.F.; Wang, Z. B. (2003): Morphodynamic modeling of tidal basins and coastal inlets. In: *Advances in Coastal Modeling; Elsevier oceanography series* 67, S. 367–392. DOI: 10.1016/S0422-9894(03)80130-7.

Valerius, J.; Kösters, Frank; Zeiler, Manfred (2015): Erfassung von Sedimentverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht. In: *Die Küste* 83, S. 39–63.

van der Wegen, Mick; Dastgheib, Ali; Jaffe, Bruce E.; Roelvink, Dano (2011): Bed composition generation for morphodynamic modeling. Case study of San Pablo Bay in California, USA. In: *Ocean Dynamics* 61 (2-3), S. 173–186. DOI: 10.1007/s10236-010-0314-2.

van Goor, M. A.; T. J. Zitman; Z. B. Wang; M. J. F. Stive (2003): Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. In: *Marine Geology* 202, S. 211–227.

Wachler, Benno; Seiffert, Rita; Rasquin, Caroline; Kösters, Frank (2020): Tidal response to sea level rise and bathymetric changes in the German Wadden Sea. In: *Ocean Dynamics* 70 (8), S. 1033–1052. DOI: 10.1007/s10236-020-01383-3.

Wang, Zheng Bing; Elias, Edwin P.L.; van der Spek, Ad J.F.; Lodder, Quirijn J. (2018): Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea. Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. In: *Netherlands Journal of Geosciences* 97 (3), S. 183–214. DOI: 10.1017/njg.2018.8.

Zeiler, Manfred; J. Schulz-Ohlberg; K. Figge (2000): Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). In: *Marine Geology* 170, S. 363–380.

Zeiler, Manfred; Milbradt, Peter; Plüß, Andreas; Valerius, Jennifer (2018): Modellierung großräumiger Sedimenttransporte in der Deutschen Bucht (Nordsee). In: *Die Küste* (86).

Zijl, Firmijn; Sumihar, Julius; Verlaan, Martin (2015): Application of data assimilation for improved operational water level forecasting on the northwest European shelf and North Sea. In: *Ocean Dynamics* 65 (12), S. 1699–1716. DOI: 10.1007/s10236-015-0898-7.

Zijl, Firmijn; Verlaan, Martin; Gerritsen, Herman (2013): Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. In: *Ocean Dynamics* 63 (7), S. 823–847. DOI: 10.1007/s10236-013-0624-2.