

Die Deutsche Bucht: mögliche Zukünfte im Klimawandel

Ein Beitrag von CAROLINE RASQUIN

Meeresspiegel, Meteorologie, Topographie des Wattenmeers, binnenseitiger Abfluss in die Ästuarie: All dies wird durch den Klimawandel beeinflusst. Und das nicht einzeln nacheinander, sondern alles parallel auf unterschiedlichen Zeitskalen, weil alles mit allem zusammenhängt. Wir wagen einen Blick in die Zukunft und zeigen mit Hilfe von numerischen Modellen, was uns in der Deutschen Bucht erwarten könnte.

numerische Modellierung | Klimawandel | Meeresspiegelanstieg | Wattenmeerentwicklung | Deutsche Bucht
numerical modelling | climate change | sea level rise | tidal flat development | German Bight

Sea level, meteorology, topography of the Wadden Sea, inland runoff into the estuaries: all these are influenced by climate change. And not one after the other, but all in parallel on different time scales, because everything is connected to everything else. We dare to look into the future and, with the help of numerical models, show what could await us in the German Bight.

Autorin

Caroline Rasquin ist wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der BAW in Hamburg.

caroline.rasquin@baww.de

Im BMVI-Expertennetzwerk arbeiten seit 2016 sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) verkehrsträgerübergreifend zusammen, um durch Klimaveränderungen und extreme Wetterereignisse bedingte Betroffenheiten für Verkehr und Infrastruktur zu bestimmen und beispielhaft Anpassungsoptionen zu entwickeln. Schwerpunkte der BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) liegen unter anderem auf der Fragestellung, welche Änderungen von Hydrodynamik und Sedimenttransport in den Küstenbereichen der Deutschen Bucht bei einem Meeresspiegelanstieg zu erwarten sind und welche Folgen sich daraus für den Verkehrsträger Wasserstraße ergeben. Die im BMVI-Expertennetzwerk entwickelten Methoden und Verfahren sollen im DAS-Basisdienst »Klima und Wasser« der Deutschen Anpassungsstrategie in den Routinebetrieb überführt werden.

In vorangegangenen Studien, z. B. KLIWAS (BAW 2015), ProWaS (BAW 2018), wurden bereits zahlreiche an der Küste vom Klimawandel beeinflusste Komponenten (Meeresspiegelanstieg, Abfluss aus den Flüssen, Meteorologie) einzeln untersucht. Im BMVI-Expertennetzwerk kombinieren wir die einzelnen Sensitivitätsstudien und untersuchen, wie eine mögliche Zukunft aussehen kann, in der die zu erwartenden Veränderungen zusammenspielen.

Dafür werden unterschiedliche Szenarien-Pakete geschnürt, die jeweils mögliche und plausible zu erwartende Verhältnisse hinsichtlich des Windklimas, des binnenseitigen Abflusses in die Ästuarie, des Meeresspiegelanstiegs, des Salzgehalts in der Nordsee sowie der Topographie der Wattge-

biete der Deutschen Bucht beinhalten. Im Gegensatz zu klassischen Wenn-Dann-Studien, bei denen zwischen Szenarien immer nur ein Parameter, wie z. B. der Meeresspiegel, variiert wird, werden bei dieser Vorgehensweise mehrere Parameter auf einmal geändert. Das führt dazu, dass keine eindeutigen Rückschlüsse gezogen werden können, welches Änderungssignal von welchem Parameter stammt. Die Änderungen liefern aber Hinweise über die Größenordnung möglicher zukünftiger Entwicklungen. Auf diese Weise können kritische Punkte erkannt und bei Bedarf mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden. Die Informationen und Daten für die jeweiligen Szenarien-Pakete wurden durch die Bundesbehörden BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie), DWD (Deutscher Wetterdienst), BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) und BAW zusammen erarbeitet (Schade et al. 2020; BAW 2020a).

Untersucht werden charakteristische Jahre der Zeitscheiben »Referenz« (1971 bis 2000), »nahe Zukunft« (2031 bis 2060) und »ferne Zukunft« (2071 bis 2100). Als Klimaszenario wird das »Weiter-wie-bisher«-Szenario RCP8.5 verwendet. Die charakteristischen Jahre sollen möglichst typische Verhältnisse der jeweiligen Zeitscheibe abbilden.

Für die Untersuchungen wird ein hydrodynamisch-numerisches Modell verwendet. Das Modell basiert auf dem hydrodynamisch-numerischen Verfahren UnTRIM² (Casulli 2008; Casulli und Stelling 2011), das die dreidimensionalen Flachwassergleichungen und die dreidimensionale Transportgleichung für Salz, Schwebstoffe und Wärme auf einem orthogonalen, unstrukturierten Gitter löst (Casulli und Walters 2000).

Das Modellgebiet umfasst die gesamte Deut-

sche Bucht von den Niederlanden bis Dänemark sowie die angrenzenden Ästuar von Elbe, Weser und Ems mit den jeweiligen Nebenflüssen (Abb. 1). Die Auflösung des Rechengitters ist räumlich variabel mit einer Kantenlänge von 5 km am offenen Seerand, 300 m im Küstenvorfeld und etwa 50 m in den Ästuaren. Die verwendete Subgrid-Technologie ermöglicht in den küstennahen Bereichen und in den Ästuaren eine detailliertere Darstellung der Topographie (Sehili et al. 2014). In den hoch aufgelösten Bereichen (z. B. dem Dollart, auf den Watten oder der Elbmündung) liegt auf Subgrid-Ebene eine Auflösung von etwa 10 bis 20 m vor. Aufgrund der hohen Auflösung kann das Überfluten und Trockenfallen in der intertidalen Zone gut reproduziert werden. Die hohe Auflösung des Modells im küstennahen Bereich ist besonders bei der Untersuchung von Meeresspiegelanstiegen entscheidend (Rasquin et al. 2020).

Szenarien der Untersuchung

Zur Steuerung des Deutsche-Bucht-Modells werden Randdaten für den Wind, die binnenseitigen Abflüsse, den Meeresspiegelanstieg, den Salzgehalt in der Nordsee sowie die Topographie der Wattgebiete benötigt. Diese Parameter werden zu einzelnen Szenarien-Paketen kombiniert. Die Randdaten für Wind, Abfluss und Salzgehalt stammen aus gekoppelten Klimasimulationen und sind somit in sich konsistent.

Für den Meeresspiegel ist zukünftig mit einem beschleunigten Anstieg zu rechnen (IPCC 2014, 2019). Die Bandbreite der möglichen Anstiegsraten ist groß. Basierend auf dem RCP8.5-Szenario wird exemplarisch im Szenario-Paket »Nahe Zukunft« ein Meeresspiegelanstieg von 0,30 m und im Szenario-Paket »Ferne Zukunft« ein Anstieg von 0,80 m angenommen. Zusätzlich wird auch ein High-End-Szenario mit einem Anstieg um 1,74 m untersucht.

Bei einem Anstieg des Meeresspiegels wird nicht nur die Tidedynamik beeinflusst, sondern auch die Topographie im Küstenbereich, da diese ein morphodynamisches Gleichgewicht mit den hydrodynamischen Kräften anstrebt (Friedrichs 2011). Die Wattflächen können bis zu einem gewissen Grad des Meeresspiegelanstiegs mitwachsen (z. B. Becherer et al. 2018). Dies kann jedoch nur geschehen, wenn eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit gegeben ist. Sedimentquellen sind zum Beispiel die Wattrinnen, Sandbänke, Barriereinseln

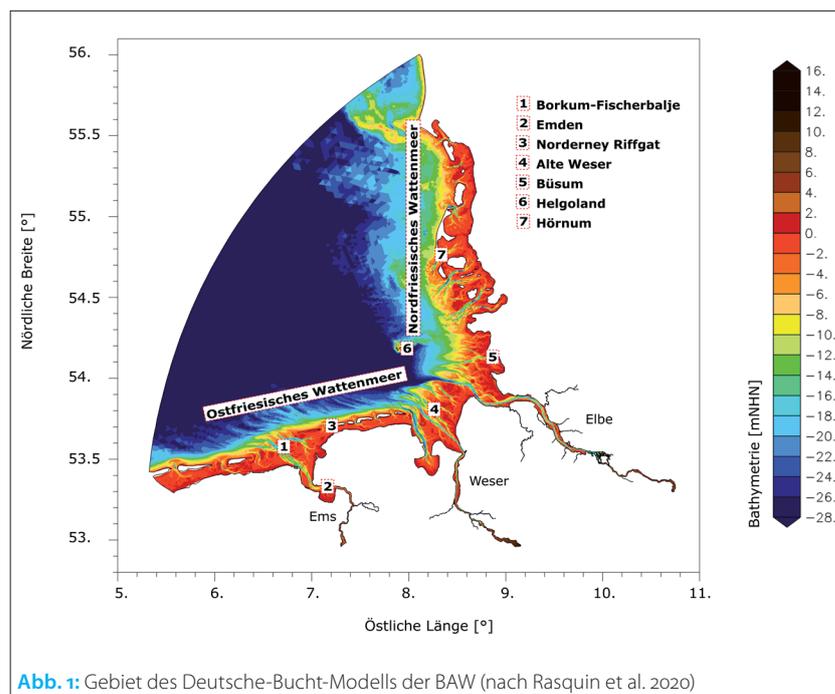


Abb. 1: Gebiet des Deutsche-Bucht-Modells der BAW (nach Rasquin et al. 2020)

oder auch der Küstenlängstransport sowie der Eintrag aus den Ästuaren. Ein Aufwachsen der Wattflächen kann den Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik teilweise entgegenwirken (Wachler et al. 2020). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden für jeden angenommenen Meeresspiegelanstieg Topographieszzenarien entwickelt. Diese weisen einem Szenario eine bestimmte Erhöhung der Watten zu. Es wird hier vorausgesetzt, dass diese Erhöhung geringer ausfällt als der dem Szenario zugehörige Meeresspiegelanstieg. Die Rinnen im Wattgebiet werden vertieft, da angenommen wird, dass etwa 30 bis 40 % des zur Watterhöhung benötigten Materials aus den Rinnen stammt. Die Vertiefung der Rinnen wird prozentual vorgenommen. So wird erreicht, dass tiefe Abschnitte stärker vertieft werden als flachere Übergänge zu den Wattflächen.

Die hier getroffenen Annahmen werden vereinfachend für das gesamte Wattenmeer getroffen. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die morphologischen Reaktionen lokal sehr unterschiedlich ausprägen können. Zudem zeigen die Wasserstände in der Elbe eine unterschiedliche Reaktion je nachdem, ob auch die Watten im Ästuar angehoben werden (BAW 2020b).

Die untersuchten Szenarien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Szenarienkürzel	REF	NZ30	FZ80	FZ174
Zeitscheibe bzw. Szenario	Referenz	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft	Ferne Zukunft
Verwendeter Meeresspiegelanstieg	0 m	0,30 m	0,80 m	1,74 m
Verwendetes Topographieszzenario	Keine Änderung	Watten um 0,20 m erhöht, Rinnen um 4 % vertieft	Watten um 0,50 m erhöht, Rinnen um 11 % vertieft	Watten um 0,65 m erhöht, Rinnen um 14 % vertieft

Tabelle 1: Untersuchte Szenarien mit verwendeten Meeresspiegelanstiegen und Topographieszzenarien

Analyse und Ergebnisse

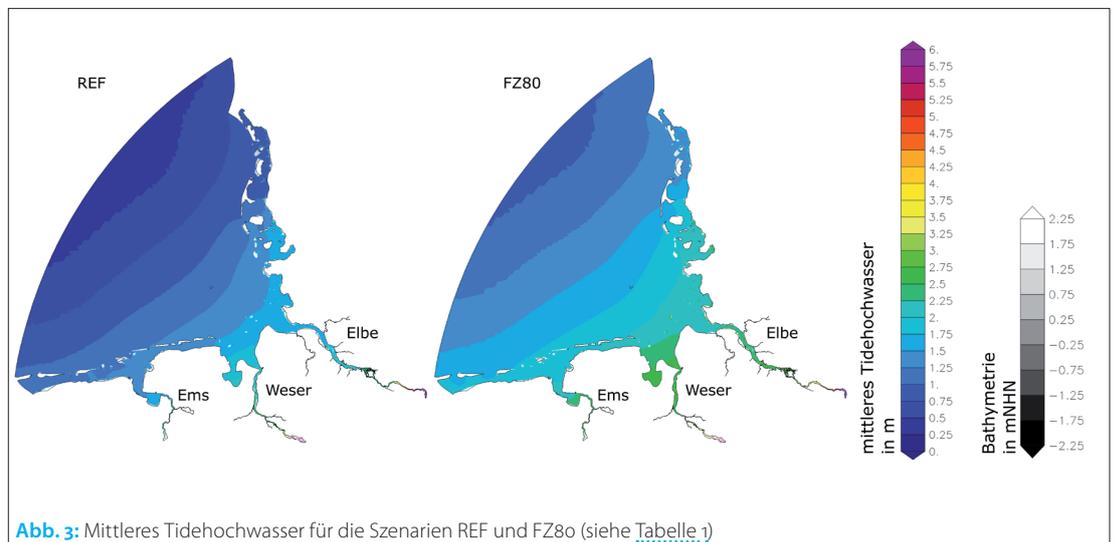
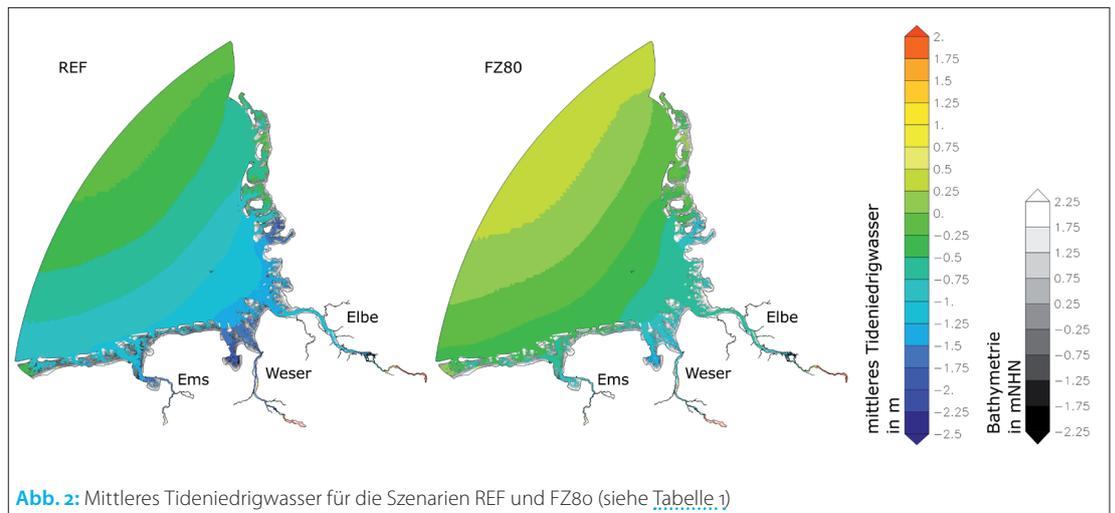
Für jedes der Szenarien-Pakete wird ein hydrologisches Jahr (1. November bis 31. Oktober) mit dem Deutsche-Bucht-Modell simuliert. Die Ergebnisse können je nach Forschungsfrage auf verschiedene Arten analysiert werden. Es können sowohl tideabhängige als auch tideunabhängige Kennwerte erstellt werden (BAWiki 2021). Dabei kann der Analysezeitraum das gesamte hydrologische Jahr, einzelne Spring-Nipp-Zyklen oder auch einzelne Ereignisse umfassen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss stets bedacht werden, dass es sich um Szenarien handelt und die Ergebnisse keine Prognosen für ein bestimmtes zukünftiges Jahr darstellen. Die Modellsimulationen liefern unter den angenommenen Randbedingungen belastbare Aussagen und können somit Anhaltspunkte zu möglichen Entwicklungen geben. Die Ergebnisse sind in einem Bildatlas veröffentlicht (BAW 2020a). An dieser Stelle sollen einige ausgewählte Ergebnisse vorgestellt werden.

Durch einen Anstieg des Meeresspiegels werden sich Tidehoch- und Tideniedrigwasser erhöhen. Diese Entwicklung ist in [Abb. 2](#) und [Abb. 3](#)

dargestellt. Es ist jeweils der Referenzzustand (kein Meeresspiegelanstieg und keine topographischen Veränderungen) gezeigt sowie das Szenario FZ80 (siehe [Tabelle 1](#)). Eine Erhöhung der Wasserstände kann vielerlei Auswirkungen haben. An der Küste Norddeutschlands und in den Ästuaren wird das Hinterland über Siele entwässert, was größtenteils im Freispiegelgefälle erfolgt. Steigen die Außenwasserstände durch den Klimawandel deutlich an, wird das Entwässerungsfenster (der Zeitraum, in dem der Wasserstand vor dem Deich niedriger ist als im Siel hinter dem Deich) deutlich kleiner. Im Extremfall muss mit Pumpen entwässert werden. Auch können erhöhte Wasserstände eine Herausforderung für den Küstenschutz darstellen.

Durch einen Anstieg des Meeresspiegels ändern sich nicht nur die Wasserstände, sondern die Tidedynamik insgesamt. Zum Beispiel wird auch das Verhältnis zwischen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit beeinflusst. Eine damit verbundene Auswirkung kann ein erhöhter Eintrag von Feinsedimenten in die Ästuar sein. Falls sich die Wassertiefe aufgrund eines erhöhten Sedimentimports stärker verringert als sie sich durch den



Meeresspiegelanstieg vergrößert, muss mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden. Auch verlagert sich die Brackwasserzone (Bereich, in dem sich Süß- und Salzwasser mischen) im Ästuar stromauf. Dies hat unter anderem Folgen für die Bewässerung.

Wie zuvor beschrieben, wird jedem Szenario eine Topographieannahme entsprechend des bis zur nahen bzw. fernen Zukunft angenommenen Meeresspiegelanstiegs zugeordnet. Diese unterliegen der Annahme, dass die Wattflächen ab einer bestimmten Meeresspiegelanstiegsrate nicht mehr Schritt halten können. Anhand der Entwicklung der mittleren Überflutungsdauer lässt sich die Aussage treffen, dass unter den getroffenen Annahmen die Zeit, in der die Wattflächen pro Tide trockenfallen, zukünftig abnehmen wird.

Die Wattflächen im Wattenmeer sowie in den Mündungsbereichen der Ästuar haben eine dämpfende Wirkung auf die Tideenergie. »Ertrinken« die Wattflächen, hat dies Auswirkungen auf den Küstenschutz und die Tidedynamik in den Ästuaren. Aber auch der einzigartige Lebensraum Wattenmeer ist bedroht. Die Reduzierung von

Treibhausgasemissionen ist daher auch für den Erhalt der Wattflächen sehr wichtig. Maßnahmen, die ein Aufwachsen der Watten bei einem beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels fördern, können unterstützend wirken.

Fazit

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, wie ein hochaufgelöstes hydrodynamisch-numerisches Modell genutzt werden kann, um verschiedene Szenarien unter den angenommenen Randbedingungen zu simulieren. Die Ergebnisse sind keine Prognosen, sondern stellen ausgewählte (aber dennoch plausible) mögliche Zukünfte dar. Trotz aller Unsicherheiten liefern die Ergebnisse Hinweise, in welcher Größenordnung die Veränderungen durch den Klimawandel liegen können. Ergebnisse dieser Art können uns helfen, Anpassungsmaßnahmen an die zu erwartenden Verhältnisse zu entwickeln.

Die Wirksamkeit solcher Maßnahmen kann wiederum mit numerischen Modellen überprüft werden, um passende Maßnahmen ausfindig zu machen und diese bei Bedarf rechtzeitig umzusetzen. //

Literatur

- BAW (Hrsg.) (2015): BAWBildatlas. Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD – Band 2. BAW; <https://izw.baw.de/e-medien/bawbildatlas-band2-2015/index.html>
- BAW (Hg.) (2018): BAWBildatlas. Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels. BAW; <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105573>
- BAW (Hrsg.) (2020a): BAWBildatlas. Darstellung möglicher Zukünfte im Klimawandel. Behördenübergreifende Simulationen im BMVI-Expertennetzwerk. BAW; <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107308>
- BAW (Hrsg.) (2020b): BAWBildatlas. Sturmflutereignisse in der Tideelbe. Eine Sensitivitätsstudie zu Meeresspiegelanstieg und Topographieänderung der Wattflächen
- BAWiki (2021): Analyse der Berechnungsergebnisse; https://wiki.baw.de/de/index.php/Analyse_der_Berechnungsergebnisse
- Becherer, Johannes; Jacobus Hofstede et al. (2018): The Wadden Sea in transition – consequences of sea level rise. *Ocean Dynamics*; DOI: 10.1007/s10236-017-1117-5
- Casulli, Vincenzo (2008): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*; DOI: 10.1002/fld.1896
- Casulli, Vincenzo; Guus Stelling (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*; DOI: 10.1002/fld.2361
- Casulli, Vincenzo; Roy A. Walters (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*; DOI: 10.1002/(SICI)1097-0363(20000215)32:3<331::AID-FLD941>3.0.CO;2-C
- Friedrichs, Carl T. (2011): 3.06-Tidal Flat Morphodynamics. A Synthesis. Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA, USA, S. 137–170
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC; Genf
- IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. IPCC, Genf
- Rasquin, Caroline; Rita Seiffert et al. (2020): The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. *Ocean Science*; DOI: 10.5194/os-16-31-2020
- Schade, Nils H.; Sabine Hüttl-Kabus et al. (2020): Klimaänderungen und Klimafolgebetrachtungen für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich. Schlussbericht des Schwerpunktthemas »Fokusgebiete Küsten« (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks
- Sehili, Aissa; Günther Lang; Christoph Lippert (2014): High-resolution subgrid models. Background, grid generation, and implementation. *Ocean Dynamics*; DOI: 10.1007/s10236-014-0693-x
- Wachler, Benno; Rita Seiffert et al. (2020): Tidal response to sea level rise and bathymetric changes in the German Wadden Sea. *Ocean Dynamics*; DOI: 10.1007/s10236-020-01383-3