Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss großräumiger Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht

Xing Yi¹ und Ralf Weisse²

¹ Helmholtz-Zentrum Geesthacht, xing.yi@hzg.de

Zusammenfassung

Seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts wird an den Pegeln entlang der deutschen Nordsee-küste ein zum Teil beschleunigter Anstieg des mittleren Tidenhubs beobachtet. Dieser Anstieg verläuft nicht kontinuierlich und ist von zum Teil erheblichen Schwankungen sowohl im Bereich von Jahren als auch von Jahrzehnten gekennzeichnet. Die Zunahme des Tidenhubs unterscheidet sich dabei von Pegel zu Pegel, ist aber generell mit einer Zunahme des im Küstenschutz bemessungsrelevanten mittleren Hochwassers verbunden. Zur Erklärung dieser Veränderungen kommen eine Reihe lokaler, regionaler und großskaliger Prozesse und deren Wechselwirkungen in Betracht. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit Hilfe modellgestützter und statistischer Untersuchen mögliche Beiträge regionaler und großräumiger Prozesse zu den beobachteten Veränderungen in der Tidedynamik in der Deutschen Bucht zu quantifizieren. Dabei zeigte sich, dass sich die beobachteten Veränderungen nicht durch einzelne Prozesse, sondern eher durch das Zusammenspiel sowohl großräumiger, regionaler als auch lokaler Faktoren erklären lassen.

Schlagwörter

Gezeiten, Tidedynamik, Tidenhub, Deutsche Bucht, Nordsee, Modellierung, Bathymetrie, Morphologie, Baumaßnahmen, Meeresspiegelanstieg, atmosphärische Zirkulation

Summary

Increases in mean tidal range are observed at most tide gauges along the German North Sea coast. This increase is most pronounced since about the 1950s and is superimposed with strong inter-annual and decadal variability. Amplitudes and characteristics of the increases vary among tide gauges but generally, a large-scale increase in mean tidal high water relevant for design of coastal protection is observed. There are a number of local, regional and large-scale processes that, together with their interactions, may potentially account for the observed changes. The objective of this study is to assess potential contributions from regional and large-scale factors using a combination of modelling and statistical approaches and techniques. No process was identified that could solely account for most of the observed changes. Instead, an interplay between large-scale, regional as well as local factors and their interactions appears to be the most likely explanation for the observed changes.

² Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Keywords

tides, tidal dynamics, tidal range, German Bight, North Sea, modelling, bathymetry, morphology, water works, sea level rise, atmospheric circulation

1 Einleitung

Die Gezeiten und der mit Ihnen verbundene Tidenhub sind eines der prägenden Merkmale an der deutschen Nordseeküste. Das Steigen und Fallen des Wassers und die mit Ihnen verbunden Strömungen und Kräfte verursachen Umlagerungen von Sediment, Veränderungen von Küstenlinien und beeinflussen die Dynamik von Ökosystemen oder die Befahrbarkeit von Fahrwassern und die Erreichbarkeit von Häfen. Der mittlere Tidenhub nimmt vom Inneren der Deutschen Bucht zu den Küsten hin deutlich zu und erreicht in Teilen der Wattgebiete Werte um etwa drei Meter und zum Teil noch höhere Werte in den Ästuaren (Kohlus und Küpper 1998).

Analysen von Tideparametern an den deutschen Nordseepegeln zeigen, dass sich diese Parameter sowohl langfristig verändert haben als auch Schwankungen im Bereich von Jahren und Jahrzehnten aufweisen. Insbesondere seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts kann aufgrund zum Teil gegenläufiger Entwicklungen in den mittleren Hoch- und Niedrigwassern eine Zunahme des mittleren Tidenhubs beobachtet werden (Jensen et al. 1992, Jensen und Mudersbach 2007). Dabei zeigen Trendanalysen, dass sich die beobachteten Veränderungen im Tidenhub im Wesentlichen aus einem an allen Pegeln zu beobachtenden Anstieg des mittleren Hochwassers und einem weniger einheitlichen Signal (Anstieg, Fall oder keine Änderung) des mittleren Niedrigwassers zusammensetzen (Ebener et al. 2020). Zur Erklärung dieser Veränderungen kommen sowohl großräumige Faktoren – wie z. B. der Anstieg des Meeresspiegels oder regionale Faktoren wie z. B. größere Baumaßnahmen und morphologische Veränderungen – als auch lokale Faktoren wie Änderungen in den Ästuaren in Frage (Haigh et al. 2020, Hollebrandse 2005, Hubert et al. 2020).

Ziel des Projekts "Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee" (ALADYN 2016) war es, Beiträge verschiedener möglicher Faktoren zu den beobachteten Änderungen zu untersuchen und zu vergleichen. Aufgrund der räumlichen Kohärenz der beobachteten Änderungen sollte dabei insbesondere auch betrachtet werden, ob großräumige Einflussfaktoren (s. z. B. Jensen et al. 2020, Haigh et al. 2020) einen entscheidenden Einfluss haben können, oder ob es sich ausschließlich um die Überlagerung lokaler küstennaher Signale handelt. Im Kontext des Gesamtprojekts befasst die vorliegende Arbeit sich dabei ausschließlich mit der Analyse möglicher Beiträge großskaliger Veränderungen und Prozesse. Lokale Faktoren und kleinskalige Prozesse insbesondere im Bereich der Ästuare und ihr Einfluss auf die Deutsche Bucht sind in Hubert et al. (2020) beschrieben.

Im Folgenden werden kurz die Daten, das verwendete numerische Modell und dessen Setup sowie die wesentlichen statistischen Analysemethoden beschrieben (Kapitel 2). Die Ergebnisse sind in Kapitel 3 dargestellt. In Kapitel 3.1 werden zunächst kurz die beobachteten großräumigen Veränderungen von Tideparametern an 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste beschrieben. Die daran anschließenden Abschnitte befassen sich mit der Analyse möglicher Einflüsse großräumiger und regionaler Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht. In Kapitel 3.2 wird dabei auf Beiträge durch Veränderungen

in der großräumigen Tidedynamik, d. h. durch von außen in die Nordsee gelangende Einflüsse, eingegangen. Dieses umfasst sowohl eine Diskussion möglicher Änderungen des großräumigen Gezeitensignals als auch mögliche Änderungen in Folge des bereits beobachteten Meeresspiegelanstiegs. In Kapitel 3.3 werden Einflüsse aufgrund langfristiger Schwankungen und Veränderungen im Windklima über der Nordsee analysiert. In Kapitel 3.4 wird schließlich auf mögliche Beiträge durch großskalige morphologische Veränderungen und durch veränderte Küstenlinien durch größere Baumaßnahmen in Schleswig-Holstein eingegangen. Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse (Kapitel 4).

2 Daten und Methoden

2.1 Daten

Bei den durchgeführten Arbeiten wurden beobachtete Tideparameter an 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste (Abbildung 1) für den Zeitraum 1958-2014 verwendet, wie sie innerhalb des Projekts ALADYN durch die Universität Siegen aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden (Ebener et al. 2020). In der vorliegenden Arbeit wurden dabei jährliche Werte des mittleren Tidenhubs (MThb, MTR), des mittleren Tidehochwassers (MThw, MHW), des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw, MLW) sowie des mittleren Meeresspiegels (MSL) verwendet. Zusätzlich wurde auf Daten der an den nördlichen und südlichen Rändern der Nordsee gelegenen Pegel Aberdeen und Newlyn zurückgegriffen, die durch das British Oceanographic Data Centre (BODC 2020) zur Verfügung gestellt wurden.

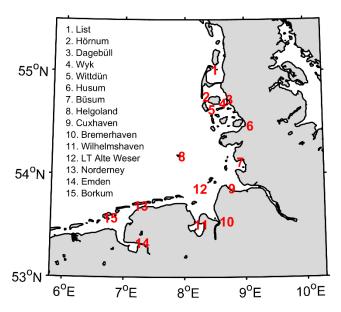


Abbildung 1: Positionen und Namen der verwendeten 15 Pegel entlang der deutschen Nordseeküste. Die roten Zahlen beziehen sich auf die im Folgenden verwendete Nummerierung.

2.2 Numerische Modellierung

Für die im Folgenden beschriebenen numerischen Experimente wurde das im 2D-Modus genutzte Modell TRIM-NP (Tidal Residual Intertidal Mudflat – Nested and Parallized) (Kapitza und Eppel 1990, Pätsch et al. 2017) verwendet. Dieses geht zurück auf das

ursprünglich von Casulli und Cattani (1994) entwickelte Modell TRIM. Das größte im Folgenden verwendete Modellgebiet umfasst die Nordsee und angrenzende Teile des Nordostatlantiks mit einer Auflösung von 12,8 km x 12,8 km. In dieses Gebiet wurden insgesamt drei weitere kleinere Gebiete mit verschiedenen Gitterweiten von 6,4 km, 3,2 km und 1,6 km genestet, wobei das feinste Gitter im Wesentlichen die südliche Nordsee und die Deutsche Bucht abdeckt (Abbildung 2). Für einige Experimente, wie zum Beispiel die Abschätzung des Einflusses von Baumaßnahmen oder von morphologischen Veränderungen, wurden zusätzliche Modellgebiete mit einer Gitterweite von 800 m x 800 m bzw. 400 m x 400 m aufgesetzt und genutzt, die im Wesentlichen die Deutsche Bucht abbilden. Die verwendeten Gitter und Auflösungen stellen einen Kompromiss dar, bei dem versucht wurde, zum einen großräumige Prozesse über längere Zeiträume, zum anderen aber auch den Einfluss größerer regionaler Faktoren zu berücksichtigen. Der Einfluss lokaler kleinräumiger Faktoren konnte und sollte mit diesem Setup nicht abgebildet werden.

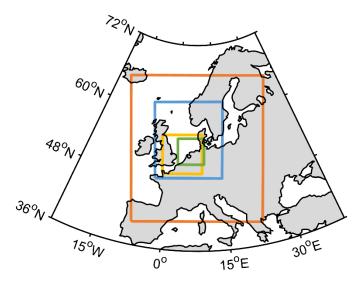


Abbildung 2: Modellgebiet der genesteten Version des hydrodynamischen Modells TRIM-NP mit den Gebieten der vier Gitterweiten von 12,8 km (orange), 6,4 km (blau), 3,2 km (gelb) und 1,6 km (grün).

Das Modell TRIM-NP löst die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen auf einem regulären Arakawa-C-Gitter mit kartesischen Koordinaten, wobei tidebedingtes Trockenfallen und Überfluten küstennaher Gitterpunkte möglich ist. An den offenen Rändern des größten Modellgebiets wurden in allen Experimenten astronomische Tiden aus FES2004 (Lyard et al. 2006) in Form von Amplituden und Phasen von insgesamt 33 Partialtiden auf einem 0,125° x 0,125° Gitter vorgegeben. In Experimenten, in denen der atmosphärische Einfluss berücksichtigt wurde, wurden die bodennahen Winde durch eine Parametrisierung von Smith und Banke (1975) in Windschubspannungen umgerechnet. Die Parametrisierung wurde ursprünglich anhand von Windgeschwindigkeitsmessungen im Bereich von 3-21 m/s entwickelt. Jensen et al. (2006) zeigten jedoch, dass sie für die Nordsee auch bei höheren Windgeschwindigkeiten angewendet werden kann. Die Ausgabe von Wasserständen erfolgte bei allen Experimenten alle 20 Minuten. Basierend auf diesen Daten wurden anschließend entsprechende Kenngrößen wie MThw, MTnw, MThb etc. berechnet. Kalibrierung und Validierung des Modells sind in (Gaslikova et al. 2013) und (Pätsch et al. 2017) beschrieben.

2.3 Statistische Methoden

Zur Analyse großräumiger Veränderungen in der Tidedynamik und möglicher Einflüsse großräumiger Faktoren wurden zwei statistische Verfahren verwendet, die besonders gut in der Lage sind, großräumige Signale zu extrahieren. Dies sind zum einen die Analyse mittels empirischer Orthogonalfunktionen (EOFs, auch Hauptkomponenten-Analyse genannt) und zum anderen die kanonische Korrelationsanalyse (CCA) (Storch und Zwiers 2003). Bei der EOF Analyse wird ein orts- und zeitabhängiger Datenvektor $\mathbf{x}(\vec{r},t)$ (z. B. von Tideparametern an verschiedenen Pegeln) in eine Reihe von zeitunabhängigen Mustern (EOFs) $p_k(\vec{r})$ und zugehörigen Zeitreihen (Amplituden) $\alpha_k(t)$ zerlegt, so dass gilt:

$$\mathbf{x}(\vec{r}, \mathbf{t}) = \sum_{k=0}^{n} \alpha_k(t) \, p_k(\vec{r}). \tag{1}$$

Dabei sind die Muster $p_k(\vec{r})$ orthogonal zueinander und absteigend nach ihrem Anteil an erklärter Varianz sortiert. Das erste Muster erklärt somit den größten Anteil an der Gesamtvarianz und bildet damit in der Regel großskalige, an allen Orten gleichzeitig ablaufende Veränderungen ab. Um anschließend Zusammenhänge zwischen großskaligen Änderungen verschiedener Größen aufzuzeigen, wurde zum einen auf eine kanonische Korrelationsanalyse zurückgegriffen, bei der jeweils nach Linearkombinationen von EOF-Moden gesucht wird, deren Korrelation maximal ist, zum anderen wurden multiple Regressionsverfahren verwendet (Storch und Zwiers 2003).

3 Ergebnisse

3.1 Großräumige Veränderungen von Tideparametern entlang der deutschen Nordseeküste

Die Veränderung des mittleren Tidenhubs im Zeitraum 1958–2014 an den betrachteten 15 Pegeln ist in Abbildung 3 dargestellt. Mit der Ausnahme von Büsum zeigen alle Zeitreihen eine von inter-annualer und dekadischer Variabilität überlagerte Zunahme des MThb. Diese liegt im Bereich von einigen Millimetern pro Jahr und erreicht ihre größten Werte an den Pegeln Dagebüll, Bremerhaven und Emden, wo die beobachteten Anstiegsraten Werte von 5 mm/Jahr überschreiten. Details und weitergehende Untersuchungen sind in Ebener et al. (2020) dargestellt.

Diese Veränderungen können prinzipiell durch Veränderungen im mittleren Tidehochwasser, im mittleren Tideniedrigwasser oder durch Kombinationen von beiden verursacht und beschrieben werden. Um großräumige Veränderungen im MThw und MTnw zu identifizieren, wurden für die jährlichen Werte beider Parameter EOF-Analysen für den Zeitraum 1958–2014 durchgeführt (Abbildung 4). Für das MThw beschreibt die erste EOF kohärente großskalige Schwankungen von Jahr zu Jahr an den betrachteten Pegeln sowie einen kohärenten, an allen Pegeln zu beobachtenden großskaligen Anstieg von etwa 3,7 mm/Jahr im Untersuchungszeitraum. Mit dieser EOF lassen sich bereits 96 % der beobachteten Variabilität im MThw beschreiben, so dass davon auszugehen ist, dass die beobachteten Veränderungen im Wesentlichen großräumig sind. Für das MTnw liegt die erklärte Varianz der ersten EOF mit 79 % etwas niedriger. Auch hier lassen sich kohärente Schwankungen, allerdings kein statistisch signifikanter gemeinsamer Trend über den Untersuchungszeitraum feststellen. Dies legt nahe, dass die beobachteten Veränderungen an

den 15 Pegeln durch eine Kombination großräumiger Veränderungen im MThw und eher kleinräumiger oder lokaler Veränderungen im MTnw zurückzuführen sein könnten. Diese Vermutung wird durch den stark lokalen Charakter der 2. EOF des MTnw gestützt, die einen deutlichen zum Teil gegenläufigen Trend an mehreren Pegeln beschreibt (Abbildung 4).

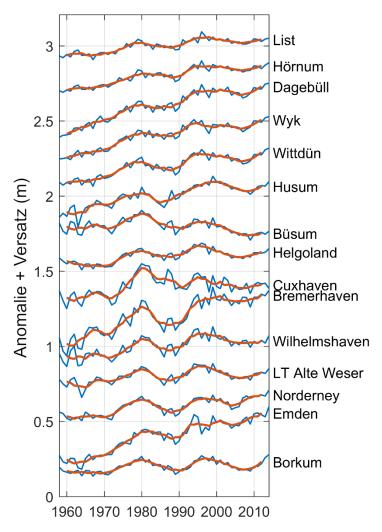


Abbildung 3: Veränderung des jährlichen mittleren Tidenhubs (blau) und des zugehörigen 5-jährig gleitenden Mittels an den 15 betrachteten Nordseepegeln.

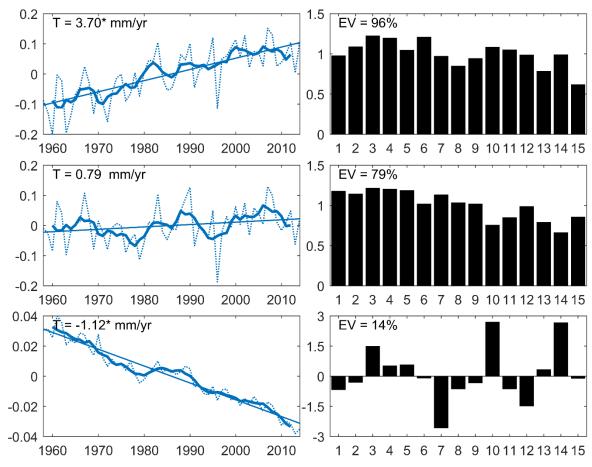


Abbildung 4: Erste EOF des MThw (oben) sowie erste (Mitte) und zweite (unten) EOF des MTnw. Muster (rechts; dimensionslos; Stationsnummern s. Abbildung 1) und zugehörige Zeitreihen (links; in Metern; dick: 5-jährig gleitendes Mittel).

3.2 Einfluss großräumiger Veränderungen ozeanographischer Faktoren

Prinzipiell können sowohl großräumige Veränderungen der Tidedynamik im Nordatlantik als auch der in der Vergangenheit beobachtete Anstieg des Meeresspiegels zu den Veränderungen der Tideparameter in der Deutschen Bucht beigetragen haben (Haigh et al. 2020). Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich die Tidedynamik im Nordatlantik selbst innerhalb geologischer Zeiträume nur langsam ändern wird, wurde der Faktor hier in Betracht gezogen, da Schelfmeere, die sich nahe der Resonanz befinden, möglicherweise sensitiv auf bereits geringfügige Änderungen reagieren können.

Im Folgenden wurde deshalb zunächst untersucht, ob und wenn ja welche Veränderungen in der Tidedynamik am Rande der Nordsee beobachtet werden konnten. Daran anschließend wurde untersucht, inwieweit eine mögliche resonante Verstärkung von am Rande der Nordsee beobachteten Signalen innerhalb der Nordsee wahrscheinlich ist.

Dazu wurden zunächst Zeitreihen des jährlichen MThb sowie der jährlichen MThw und MTnw an den Pegeln Aberdeen und Newlyn nahe der nördlichen und südlichen Nordseeränder untersucht. Für beide Pegel standen dazu relativ lange Beobachtungszeitreihen seit 1936 zur Verfügung. Es zeigte sich, dass an beiden Pegeln in den vergangenen etwa 80 Jahren die jährlichen mittleren Hoch- und Niedrigwasser signifikant angestiegen sind. Diese Änderungen liefen jedoch in etwa parallel, so dass sich der mittlere Tidenhub an

beiden Pegeln, abgesehen von deutlichen nodalen Schwankungen, die am Pegel Aberdeen zum Beispiel im Bereich von etwa ein bis zwei Dezimetern liegen, nicht signifikant geändert hat. Dieses wird durch frühere Untersuchungen von z. B. Cartwright (1972) gestützt, der für den Pegel Brest zwischen 1711 und 1936 keine Veränderung im Tidenhub feststellen konnte.

Um zu untersuchen, ob dennoch Signale vom Rand der Nordsee, wie z. B. nodale Schwankungen im Tidenhub, innerhalb der Nordsee durch Resonanz verstärkt werden können und so potentiell zu den beobachteten Veränderungen in der Deutschen Bucht beigetragen haben könnten, wurden mit TRIM-NP eine Reihe von Sensitivitätsexperimenten durchgeführt, bei denen der Tidenhub an den Rändern systematisch variiert wurde. Anschließend wurde untersucht, inwieweit sich diese Signale innerhalb der Nordsee verändert und möglicherweise verstärkt haben könnten. Dabei zeigte sich, dass die im Inneren des Modellgebiets auftretenden Änderungen im Tidenhub generell geringer als die am Rand vorgegebenen Änderungen waren (Abbildung 5). Das deutet darauf hin, dass Änderungen im Inneren des Modellgebiets eher gedämpft werden und die ohnehin geringen Änderungen am Rand vermutlich keine wesentliche Ursache und Erklärung für die beobachteten Änderungen im Tidenhub in der Deutschen Bucht liefern.

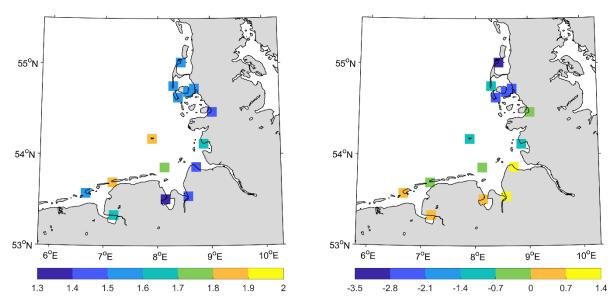


Abbildung 5: Veränderungen im von TRIM-NP modellierten mittleren Tidenhub (MTR) in der Nähe der 15 Pegel in der Deutschen Bucht in Prozent bei einer Erhöhung des Tidenhubs an den Modellrändern um 5 % (links) und in cm bei einer Erhöhung des mittleren Meeresspiegels um 20 cm (rechts).

In den letzten etwa 100 Jahren ist der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee um etwa 20 cm angestiegen (Albrecht et al. 2011, Wahl et al. 2013). Durch diesen Anstieg kann sich prinzipiell zum einen das Resonanzverhalten der Nordsee verändern, zum andern kann sich durch die Veränderung der Wassertiefe die Propagation der Tidewelle und damit die Tidedynamik ändern (Haigh et al. 2020). Um zu untersuchen, inwieweit ein großräumiger Anstieg des Meeresspiegels die Tidedynamik in der Deutschen Bucht beeinflusst haben könnte, wurde am Rand des äußersten Gitters des Modells TRIM-NP eine Erhöhung des mittleren Wasserstands von 20 cm vorgegeben, die in etwa dem beobachteten Anstieg des mittleren Meeresspiegels in den letzten 100 Jahren entspricht (Wahl et al. 2013). Dadurch

werden im Modell entlang der niedersächsischen/schleswig-holsteinischen Küste leicht erhöhte/verringerte Tidenhübe erzeugt. Jedoch sind auch in diesem Modellexperiment die Signale zu klein, als dass sie als wesentliche Erklärung für die beobachteten Veränderungen des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht dienen könnten (Abbildung 5).

Um diese Aussage zu stützen, wurde zusätzlich eine statistische Analyse durchgeführt, die die Veränderungen der beobachteten Tideparameter an den Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste in Bezug zu beobachteten Änderungen des mittleren Meeresspiegels setzte (Abbildung 6). Sowohl für die Original- als auch für die trendbereinigten Zeitreihen zeigten sich deutliche und statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen dem beobachteten Meeresspiegelanstieg und den mittleren Tidehoch- und -niedrigwassern. Es konnte jedoch keine signifikante Korrelation zwischen den beobachteten Veränderungen im mittleren Tidehoub und dem beobachteten Meeresspiegelanstieg gefunden werden. Diese Analyse stützt die Ergebnisse der Modellstudie und deutet darauf hin, dass großräumig betrachtet sowohl das mittlere Tidehoch- als auch das mittlere Tideniedrigwasser mit dem beobachteten Meeresspiegelanstieg angewachsen ist, der Tidenhub sich dabei aber nicht signifikant verändert hat. Die gleichen Schlussfolgerungen gelten analog für die trendbereinigten Zeitreihen und damit für die beobachteten jährlichen und dekadischen Schwankungen.

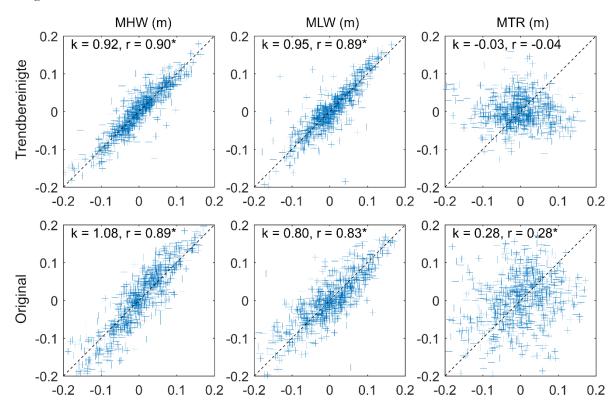


Abbildung 6: Streudiagramme von jährlichen Anomalien des mittleren Hochwassers (MHW, links), des mittleren Tideniedrigwassers (MLW, Mitte) und des mittleren Tidenhubs (MTR, rechts) 1958–2014 im Vergleich zu Anomalien des mittleren Meeresspiegels für die Original- (unten) und die trendbereinigten (oben) Zeitreihen basierend auf Daten der 15 untersuchten Pegel entlang der deutschen Nordseeküste. Gezeigt sind jeweils Anomalien in Bezug auf das jeweilige langjährige Mittel an den einzelnen Pegeln. Im oberen Teil jeder Abbildung sind zusätzlich die linearen Regressions- (k) und Korrelationskoeffizienten (r) angegeben. Signifikant von Null verschiedene Korrelationen (5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) sind mit einem Stern gekennzeichnet.

3.3 Möglicher Einfluss großräumiger Schwankungen und Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation

Langfristige Schwankungen oder Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation (z. B. in der Nordatlantischen Oszillation; Hurrell et al. 2001) können prinzipiell zu veränderten Wind- und Luftdruckverhältnissen über der Nordsee und dem angrenzenden Nordostatlantik führen, die einen veränderten mittleren Wasserstand in der Nordsee zur Folge haben und damit potentiell Veränderungen im Tidegeschehen triggern könnten.

Um diese Hypothese zu untersuchen, wurde eine multi-dekadische Modellsimulation mit TRIM-NP (Weisse et al. 2014) herangezogen, die mit räumlich hochaufgelösten stündlichen Wind- und Luftdruckfeldern für den Zeitraum 1958–2014 (Geyer 2014) angetrieben wurde. An den offenen Rändern wurden wiederum Amplituden und Phasen von 33 Partialtiden aus FES2004 (Lyard et al. 2006) vorgeschrieben und Beiträge des Meeresspiegelanstiegs vernachlässigt, so dass alle in der Modellsimulation auftretenden Veränderungen in den Tideparametern ausschließlich auf Veränderungen im Wind- und Luftdruckklima zurückzuführen sind.

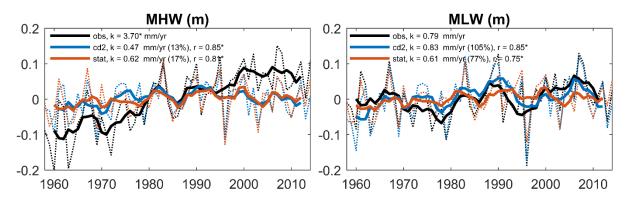


Abbildung 7: Schwarz: Zeitreihen (dünn) der jeweils 1. EOF der beobachteten jährlichen mittleren Tidehochwasser MHW (links) und Tideniedrigwasser MLW (rechts), basierend auf Daten der 15 betrachteten Pegel in der Deutschen Bucht, und zugehöriges 5-jährig gleitendes Mittel (dick). Entsprechende Zeitreihen aus der Analyse des Modelllaufs (blau; Trend 0,47 mm/Jahr bzw. 0,83 mm/Jahr) und eines statistischen Modells (orange; Trend 0,62 mm/Jahr bzw. 0,61 mm/Jahr), basierend auf den ersten drei EOFs des Luftrucks über dem Nordatlantik.

Um zu untersuchen, inwieweit beobachtete Veränderungen in dieser Simulation abgebildet werden, wurden die beobachteten großräumigen Signale des MThw und des MTnw in Form ihrer jeweils ersten EOF (Abbildung 4) auf die Modelldaten projiziert. Die entsprechenden Zeitreihen sind in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigte sich, dass die entsprechenden Zeitreihen aus dem Modellauf mit jeweils etwa 0,85 hohe Korrelationen mit den aus den Beobachtungen abgeleiteten Zeitreihen aufweisen, dass sich allerdings die Trends insbesondere beim MThw deutlich unterscheiden. Daraus lassen sich prinzipiell zwei Schlüsse ableiten: Zum einen hängen die jährlichen großräumigen Schwankungen im MThw und MTnw offensichtlich stark mit der jährlichen Variabilität der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zusammen, wobei letztere jeweils etwa 72 % der beobachteten Variabilität im MThw und MTnw erklären kann. Zum anderen tragen langfristige Veränderungen im Windklima dagegen vermutlich nur in sehr geringem Umfang zu möglichen langfristigen

Veränderungen der Tideparameter bei. So beträgt beispielsweise der anhand der modellierten Daten abgeschätzte Trend im MThw lediglich knapp 13 % des beobachteten Wertes.

Um diese Ergebnisse zu stützen, wurde wiederum zusätzlich eine statistische Analyse durchgeführt, bei der die großräumigen beobachteten Luftdruckfelder in Bezug zu den beobachteten Veränderungen der Tideparameter an den Pegeln gesetzt wurden. Dabei wurden zunächst die jährlichen Luftdruckfelder über der Nordsee und dem Nordostatlantik mittels einer EOF-Analyse in ihre dominierenden großräumigen Moden zerlegt. Anschließend wurde zwischen den drei dominierenden Moden der atmosphärischen Variabilität, die insgesamt etwa 81 % der Gesamtvariabilität der Luftdruckfelder beschreiben, und den beobachteten jährlichen Tideparametern basierend auf einer multiplen Regressionsanalyse ein statistisches Modell aufgestellt, das die Veränderungen der Tideparameter aufgrund von Schwankungen und Änderungen in den drei dominierenden EOF-Moden beschreibt. Die Ergebnisse dieses statistischen Ansatzes weisen eine hohe Ähnlichkeit mit denen des dynamischen Modellexperiments auf (Abbildung 7) und bestätigen die bereits getroffenen Schlussfolgerungen.

3.4 Möglicher Einfluss großräumiger morphologischer Änderungen auf die Tidedynamik

Größere Änderungen im MThb im Bereich der Deutschen Bucht insbesondere seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts lassen sich über mehrere Dekaden nachverfolgen (z. B. Jensen et al. 1992; Abbildung 3). Angesichts solcher Zeiträume ist es möglich, dass die Tidedynamik einzelner oder mehrerer Pegel durch größere Baumaßnahmen (z. B. infolge von Eindeichungen) und die daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld beeinflusst worden ist. Auch hier werden im Folgenden lediglich mögliche großräumige Effekte untersucht, wohingegen lokale Auswirkungen in Hubert et al. (2020) beschrieben und untersucht worden sind.

Ein Beispiel für die beobachteten großräumigen morphologischen Änderungen in der Deutschen Bucht über einen Zeitraum von 20 Jahren ist in Abbildung 8 anhand der durch das Projekt EasyGSH-DB (EasyGSH-DB 2020) entwickelten hochaufgelösten Bathymetrien der Jahre 1996 und 2014 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die größten Änderungen im Bereich der Watten und der Ästuare befinden und dort lokal Größenordnungen von einigen Metern erreichen können, die dann z. B. durch mögliche Veränderungen von Tideprismen zu Änderungen von Tideparametern an den küstennah gelegenen Pegeln beigetragen haben könnten.

Hochaufgelöste Bathymetrien wie durch EasyGSH-DB bereitgestellt, liegen erst ab 1996 vor und umfassen damit nicht den Zeitraum von ca. 1960–1990, innerhalb dessen die markantesten Veränderungen in der Tidedynamik beobachtet wurden. Um trotzdem zu einer Größenabschätzung möglicher Einflüsse auf das Tidegeschehen zu gelangen, wurde deshalb sowohl eine Reihe von Sensitivitätsexperimenten mit TRIM-NP und vorhandenen Bathymetrien als auch eine statistische Analyse durchgeführt, die mögliche großskalige Zusammenhänge aufzeigen könnte.

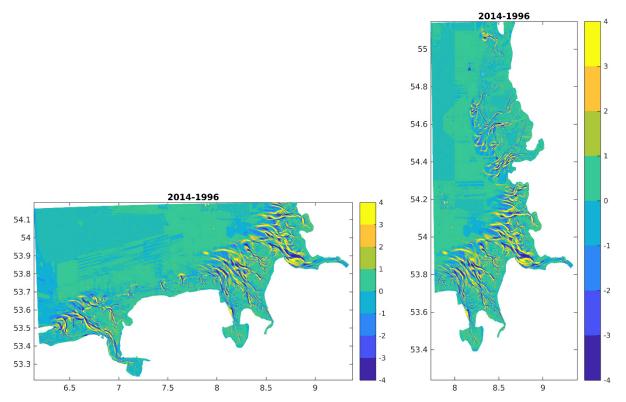


Abbildung 8: Differenzen in Metern zwischen den EasyGSH-DB-Bathymetrien 2014 und 1996 entlang der niedersächsischen (links) und entlang der schleswig-holsteinischen Küste (rechts).

Um mögliche großskalige Zusammenhänge zwischen morphologischen Veränderungen und Änderungen in den Tideparametern zu untersuchen und herauszufiltern, wurden zunächst wiederum EOF-Analysen des beobachteten mittleren Tidenhubs an den 15 untersuchten Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste und der EasyGSH-DB Bathymetrien durchgeführt. Um mögliche Zusammenhänge zwischen großskaligen Änderungen aufzuzeigen, wurde anschließend basierend auf den dominanten EOF-Moden eine kanonische Korrelationsanalyse durchgeführt, bei der nach Linearkombinationen von EOF-Moden gesucht wird, deren Korrelation maximal ist. Dazu wurden für den Tidenhub zwei und für die Bathymetrie drei EOFs verwendet, die insgesamt 84 % bzw. 76 % der Gesamtvarianz erklärten. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 9 dargestellt. Es zeigte sich, dass großräumige Veränderungen im Tidenhub eher mit vielen zeitgleich ablaufenden kleinräumigeren Variationen als mit größerskaligen morphologischen Anderungen korreliert sind. Zeitlich besteht zwischen diesen Änderungen mit etwa 0,82 eine sehr hohe Korrelation (Abbildung 9). Entsprechend der Ergebnisse dieser Analyse waren die zwischen etwa 2007 und 1996 beobachteten morphologischen Änderungen von Änderungen im Tidenhub im Bereich von einigen Zentimetern begleitet. Auffallend ist, dass diese Änderungen bis etwa 2014 dann wieder rückläufig sind und sich die Werte am Ende kaum von denen am Anfang des Untersuchungszeitraumes unterscheiden.

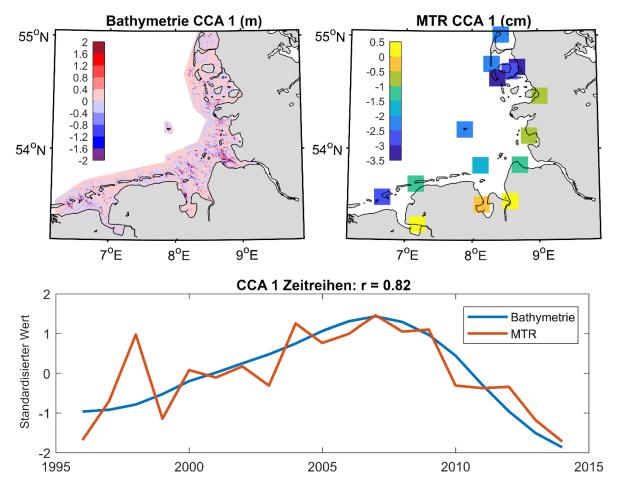


Abbildung 9: Erstes Paar kanonisch korrelierter Muster der jährlichen Bathymetrien des EasyGSH-DB Datensatzes (links) und des jährlichen mittleren Tidenhubs an den 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste (rechts) 1996–2014 und zugehörige Zeitreihen (unten).

Um diese Ergebnisse näher zu untersuchen, wurden mit dem hydrodynamischen Modell TRIM-NP drei Sensitivitätsexperimente durchgeführt. Dazu wurden für das Modell zwei zusätzliche genestete Gitter mit Auflösungen von 800 m x 800 m und 400 m x 400 m aufgesetzt, welche die die durch die EasyGSH-DB-Bathymetrien abgedeckten Teile der Deutschen Bucht umfassen. Anschließend wurden die durch EasyGSH-DB bereitgestellten Bathymetrien der Jahre 1996, 2007 und 2014 auf das Gitter interpoliert und mit identischen am Rand vorgeschriebenen Tiden für jeweils einen Monat gerechnet. Abbildung 10 zeigt die durch die TRIM-NP simulierten Veränderungen im mittleren Tidenhub für die Jahre 2007–1996 bzw. 2014–1996 im Vergleich zu den Ergebnissen des statistischen Modells und den Beobachtungen. Anhand der Beobachtungen ist zu erkennen, dass der MThb an den meisten Pegeln zwischen 1996 und 2007 zunächst um einige Zentimeter abgenommen hat, um sich dann bis 2014 wieder auf die Werte von etwa 1996 einzupendeln. Sowohl das statistische als auch das hydrodynamische Modell, die diese Entwicklung ausschließlich aufgrund von morphologischen Änderungen simulieren, können diese Entwicklung in etwa nachbilden, wobei die dynamisch modellierten Anderungen für 1996-2007 im Mittel etwas zu gering ausfallen.



Abbildung 10: Verteilungen von Veränderungen im MThb in cm anhand von beobachteten jährlichen (grün) und modellierten (CCA – rot; TRIM – blau) MThb an den betrachteten 15 Pegeln für die Zeiträume 1996–2007 und 1996–2014. Die Werte aus dem statistischen Modell für 1996–2014 sind alle kleiner als einen halben Zentimeter. Durch Runden auf ganze Zentimeter wird die Verteilung sehr schmal.

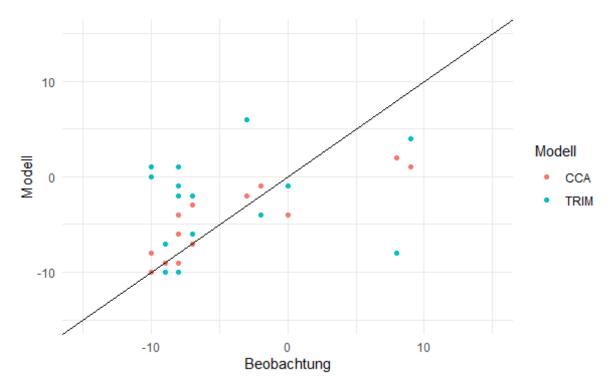


Abbildung 11: Gegenüberstellung der für 1996–2007 modellierten (CCA – rot; TRIM – blau) Veränderungen im MThb in cm mit den Beobachtungen an den 15 betrachteten Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste.

Abbildung 11 zeigt die für den Zeitraum größter Veränderungen (1996–2007) modellierten Veränderungen im MThb noch einmal im Detail. Insbesondere das statistische Modell gibt

die beobachteten Änderungen bis auf zwei Ausreißer sehr gut wieder. Die Ausreißer (Bremerhaven und Emden) liegen dabei beide in den Mündungsbereichen der Ästuare. Da das statische Modell lediglich auf drei EOFs der morphologischen Änderungen basiert, lassen sich die beobachteten Änderungen im MThb demnach bis auf die Ausreißer sehr gut durch großräumige (bzw. zeitgleich ablaufende kleinräumigere) Änderungen in der Morphologie beschreiben. Auch durch das hydrodynamische Modell wird die starke Abnahme des MThb an einigen Pegeln von 1996–2007 gut wiedergegeben, allerdings gibt es auch ein Cluster von Pegeln mit starken beobachteten Veränderungen, bei denen die modellierten Änderungen um Null schwanken. Eine mögliche Ursache könnte in der küstennahen Auflösung von TRIM-NP und hier insbesondere der fehlenden Auflösung in den Ästuaren liegen, die eventuell nicht ausreichend sein könnte, um die Reflexion der Tidewelle realistisch abzubilden (Rasquin et al. 2019).

Neben solchen morphologischen Änderungen können auch größere Änderungen der Küstenlinien, zum Beispiel durch Eindeichungen, und entsprechende Veränderungen von Tidevolumina Auswirkungen auf die Tidedynamik haben. Es wurde deshalb zusätzlich mit Hilfe numerischer Experimente untersucht, welchen möglichen direkten Einfluss größere Baumaßnahmen auf die Entwicklung des MThb gehabt haben könnten. Dazu wurden beispielhaft Veränderungen entlang der schleswig-holsteinischen Küste betrachtet und auf einen in ALADYN (s. Ebener et al. 2020) durch den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) entwickelten und georeferenzierten Katalog von Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste zurückgegriffen. Diese Änderungen wurden in das hydrodynamische Modell TRIM-NP mit einer Auflösung von 800 x 800 m eingebaut und Veränderungen im MThb untersucht.

Abbildung 12 zeigt beispielhaft die direkten Veränderungen im mittleren Tidenhub aufgrund von größeren Baumaßnahmen. Auch wenn die Details dieser Änderungen nicht sehr belastbar sind, so können doch zwei wesentliche Schlussfolgerungen gezogen werden. Zum einen sind die Veränderungen im Tidenhub aufgrund großer Baumaßnahmen vermutlich im Bereich von Zentimetern bis zu Dezimetern anzusiedeln. Zum anderen sind die Veränderungen eher kleinräumig und auf begrenzte Küstenabschnitte beschränkt. Aufgrund der Synchronität einer Vielzahl von Baumaßnahmen ab den 1960ern kann die von Woodworth et al. (1991) aufgestellte Hypothese, dass diese in der Summe einen Einfluss auf die großräumige Tidedynamik gehabt haben können, deshalb nach wie vor nicht verworfen werden.

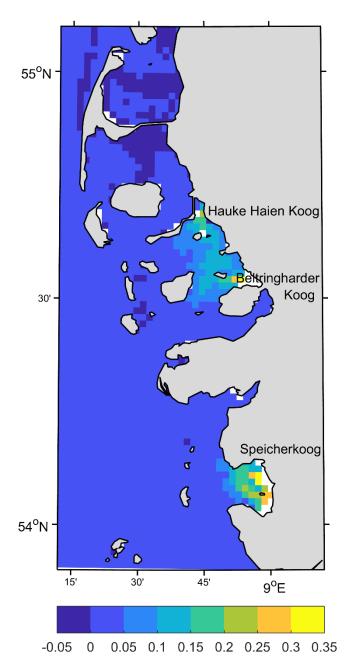


Abbildung 12: Unterschiede im mittleren Tidenhub (in Metern) aufgrund von vier größeren Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste (Eindeichung/Baumaßnahme Beltringharder Koog, Hauke Haien Koog, Speicherkoog Nord und Speicherkoog Süd).

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe numerischer Modellierung und statistischer Auswertung wurden verschiedene großräumige Faktoren untersucht, die zu den beobachteten Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht beigetragen haben könnten. Auch wenn eine abschließende und umfassende Beurteilung nach wie vor nicht möglich ist, zeigten die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen, dass das Zusammenspiel mehrerer großräumiger Faktoren zumindest wesentliche Beiträge zu den beobachteten Veränderungen und Schwankungen

in den Tideparametern in der Deutschen Bucht geliefert haben könnte. So können beispielsweise jährliche und dekadische Schwankungen im Windklima und der großräumigen atmosphärischen Zirkulation einen wesentlichen Teil der beobachteten jährlichen und dekadischen Variabilität insbesondere im mittleren Hochwasser erklären. Beobachtete langfristige Veränderungen können Anteile durch den gestiegenen Meeresspiegel sowie von morphologischen Änderungen und Veränderungen von Küstenlinien durch Baumaßnahmen enthalten. Hierbei scheint der Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Vergangenheit großräumig eher mit gleichläufigen Anstiegen im mittleren Hoch- und Niedrigwasser und weniger mit Veränderungen im mittleren Tidenhub verbunden gewesen zu sein. Morphologische Veränderungen und Veränderungen der Küstenlinien scheinen dagegen in der Lage zu sein, den Tidenhub wesentlich zu beeinflussen. Hier wäre eine Rekonstruktion älterer Bathymetrien, z. B. aus der Mitte des 20. Jahrhunderts, sowie eine georeferenzierte Katalogisierung weiterer größerer Baumaßnahmen, z. B. entlang der niedersächsischen Küste, wünschenswert, die eine umfassendere Bewertung möglicher Beiträge zur veränderten Tidedynamik ermöglichen würden.

5 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), welches das Projekt ALADYN-B im Rahmen der Fördermaßnahme "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee" im Rahmenprogramm FONA 3 (Förderkennzeichen 03F0756B) über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Wir danken weiterhin dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die fachliche Begleitung des Projektes in der Bearbeitungsphase und unseren Projektpartnern der Universität Siegen, der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küstenund Naturschutz sowie dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) für Ihre Zusammenarbeit und Kooperation innerhalb des Gesamtverbundvorhabens.

6 Literaturverzeichnis

ALADYN. Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee. http://www.kfki.de/de/projekte/aladyn, Stand: 20.04.2020.

Albrecht, F.; Wahl, T.; Jensen, J.; Weisse, R.: Determining sea level change in the German Bight. In: Ocean Dynamics, 61, 12, 2037–2050, https://doi.org/ 10.1007/s10236-011-0462-z, 2011.

BODC. UK Tide Gauge Network. https://www.bodc.ac.uk/data/hosted_data_systems/sea_level/uk_tide_gauge_network/, Stand: 20.04.2020.

Cartwright, D. E.: Secular Changes in the Oceanic Tides at Brest, 1711–1936. In: Geophysical Journal International, 30, 4, 433–449, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb05826.x, 1972.

Casulli, V.; Cattani, E.: Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. In: Computers & Mathematics with Applications, 27, 4, 99–112, https://doi.org/10.1016/0898-1221(94)90059-0, 1994.

EasyGSH-DB: Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht. https://mdi-de.baw.de/easygsh/, Stand: 21.04.2020.

Ebener, A.; Arns, A.; Jänicke, L.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, 89, https://doi.org/10.18171/1.089106, 2020.

Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Groll, N.: Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. In: Natural Hazards, 66, 3, 1501–1518, https://doi.org/10.1007/s11069-012-0279-1, 2013.

Geyer, B.: High-resolution atmospheric reconstruction for Europe 1948–2012. CoastDat2 In: Earth System Science Data, 6, 1, 147–164, https://doi.org/10.5194/essd-6-147-2014, 2014.

Haigh, I. D.; Pickering, M. D.; Green, J. A. M.; Arbic, B. K.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hill, D. F.; Horsburgh, K.; Howard, T.; Idier, D.; Jay, D. A.; Jänicke, L.; Lee, S. B.; Müller, M.; Schindelegger, M.; Talke, S. A.; Wilmes, S.-B.; Woodworth, P. L.: The Tides They Are A-Changin'. A Comprehensive Review of Past and Future Nonastronomical Changes in Tides, Their Driving Mechanisms, and Future Implications In: Reviews of Geophysics, 58, 1, https://doi.org/10.1029/2018RG000636, 2020.

Hollebrandse, F. A. P.: Temporal development of the tidal range in the southern North Sea. TU Delft, Delft, (Master Thesis), 2005.

Hubert, K.; Wurpts, A.; Berkenbrink, C.: Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics. In: Die Küste, 89, https://doi.org/10.18171/1.089108, 2020.

Hurrell, J. W.; Kushnir, Y.; Visbeck, M.: The North Atlantic Oscillation. In: Science, 291, 5504, 603-605. doi: 10.1126/science.1058761, 2001.

Jensen, J.; Ebener, A.; Jänicke, L.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hubert, K.; Wurpts, A.; Berkenbrink, C.; Weisse, R.; Yi, X.; Meyer, E.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste (ALADYN). In: Die Küste, 89, https://doi.org/10.18171/1.089105, 2020.

Jensen, J.; Muderbach, C.; Müller-Navarra, S.; Bork, I.; Koziar, C.; Renner, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, 71, 123–167, 2006.

Jensen, J.; Mudersbach, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser, R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H.; Wardenga, U. (Hg.): Küstenszenarien. Leipzig, 99–112, 2007.

Jensen, J.; Mügge, H. E.; Schönfeld, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 53, 211–275, 1992.

Kapitza, H.; Eppel, D.: Simulating morphodynamical processes on a parallel system. In: Spaulding, M. L. (Hg.): Estuarine and coastal modeling. Proceedings of the conference. Newport, Rhode Island, November 15–17, 1989. New York, 1990.

Kohlus, J.; Küpper, H.: Umweltatlas Wattenmeer. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer Ulmer, Stuttgart, 270 S., 1998.

Lyard, F.; Lefevre, F.; Letellier, T.; Francis, O.: Modelling the global ocean tides. Modern insights from FES2004. In: Ocean Dynamics, 56, 5–6, 394–415, https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x, 2006.

Pätsch, J.; Burchard, H.; Dieterich, C.; Gräwe, U.; Gröger, M.; Mathis, M.; Kapitza, H.; Bersch, M.; Moll, A.; Pohlmann, T.; Su, J.; Ho-Hagemann, H. T. M.; Schulz, A.; Elizalde, A.; Eden, C.: An evaluation of the North Sea circulation in global and regional models relevant for ecosystem simulations. In: Ocean Modelling, 116, 70–95, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.06.005, 2017.

Rasquin, C.; Seiffert, R.; Wachler, B.; Winkel, N.: The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. https://doi.org/10.5194/os-2019-84, 2019.

Smith, S. D.; Banke, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101, 429, 665–673, https://doi.org/10.1002/qj.49710142920, 1975.

Storch, H. von; Zwiers, F. W.: Statistical analysis in climate research. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 484 S., 2003.

Wahl, T.; Haigh, I. D.; Woodworth, P. L.; Albrecht, F.; Dillingh, D.; Jensen, J.; Nicholls, R. J.; Weisse, R.; Wöppelmann, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. In: Earth-Science Reviews, 124, 51–67, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003, 2013.

Weisse, R.; Gaslikova, L.; Geyer, B.; Groll, N.; Meyer, E. M. I.: coastDat - model data for science and industry. In: Die Küste, 81, 5–18, 2014.

Woodworth, P. L.; Shaw, S. M.; Blackman, D. L.: Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. In: Geophysical Journal International, 104, 3, 593–609, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb05704.x, 1991.