

Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste (ALADYN)

Jürgen Jensen¹, Andra Ebener², Leon Jänicke¹, Arne Arns², Krischan Hubert³, Andreas Wurpts³, Cordula Berkenbrink³, Ralf Weisse⁴, Xing Yi⁴ und Elke Meyer⁴

¹ Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau, juergen.jensen@uni-siegen.de

² Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau

³ Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

⁴ Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Zusammenfassung

Die deutsche Nordseeküste ist ein stark tidebeeinflusstes und komplexes Küstengewässer, das vielen natürlichen und anthropogenen Einwirkungen unterliegt. Diese Einwirkungen spiegeln sich in der Ausprägung der Gezeiten wider, die i. d. R. aus Pegelaufzeichnungen abgeleitet werden können. Das Verbundprojekt ALADYN („Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee“, Förderkennzeichen: 03F0756 A-C) liefert einen Beitrag zur Erklärung der Änderungen und zeitlichen Variationen der Tidewasserstände und des Tidehubs seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Untersucht wurden dazu mögliche groß- und kleinräumige Einflussfaktoren, die die Entwicklungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht beeinflusst haben. Zu den untersuchten großräumigen Einflussfaktoren zählen u. a. großräumige Veränderungen der Tidedynamik im Nordostatlantik, der Anstieg des mittleren Meeresspiegels, langfristige Schwankungen oder Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation, überregionale morphologische Änderungen entlang der Küsten und der Einfluss größerer historischer Baumaßnahmen. Berücksichtigt wurden aber auch kleinräumige Einflüsse und lokale Maßnahmen im Bereich einzelner Pegel, wie z. B. größere Baumaßnahmen und die daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld. Um die beteiligten Prozesse zu identifizieren, wurde eine Abschätzung des Einflusses von lokalen Baumaßnahmen im Rahmen des Teilprojekts ALADYN-A durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen durchgeführt. Entwickelt wurde ein Ansatz zur Separierung großräumiger Entwicklungen von lokalen Effekten in langjährigen Beobachtungsdaten der Tidewasserstände und des Tidehubs. Mithilfe von Detailuntersuchungen der lokalen Effekte konnten Auswirkungen einzelner Baumaßnahmen beschrieben werden. Darüber hinaus wurden im Teilprojekt ALADYN-B die durchgeführten statistischen Analysen durch numerische Modelluntersuchungen zum Einfluss großräumiger Effekte auf die Tidedynamik am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) ergänzt. Zusätzlich untersuchte die Forschungsstelle Küste im Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) im Teilprojekt ALADYN-C Wechselwirkungen zwischen regionalen morphologischen Veränderungen in den Ästuaren und der Tidedynamik im angrenzenden Küstenvorfeld. Anhand der Gegenüberstellung verschiedener morphologischer Zustände konnte aufgezeigt

werden, wie weit und wie stark die großräumige Tidedynamik durch regionale Veränderungen beeinflusst werden kann.

Schlagwörter

Tidedynamik, Deutsche Bucht, Nordsee, Ästuar, Gezeiten, Tidenhub, Tideregime, Tidewasserstände, Zeitreihenanalyse, lokale Effekte, Modellierung, Bathymetrie, Baumaßnahmen, Bruchpunktanalyse, Hauptkomponentenanalyse, Morphologie, Scheitelwasserstände, Meeresspiegelanstieg

Summary

The German North Sea coast is a tidal and complex coastal water, which is subject to numerous natural and anthropogenic influences. These influences are reflected in the tidal characteristics, which can usually be derived from tide gauge records. The collaborative project ALADYN ("Analysis of observed tidal dynamics in the North Sea", grant no. 03F0756 A-C) contributes to the explanation of changes and temporal variations of tidal water levels and tidal range since the middle of the 20th century. Possible large- and small-scale factors that have affected the development of tidal dynamics in the German Bight were investigated. Among the large-scale factors investigated are large-scale changes in tidal dynamics in the Northeast Atlantic, the rise of mean sea level, long-term fluctuations or changes in large-scale atmospheric circulation, large-scale morphological changes along the coasts and the influence of historical construction measures. However, small-scale influences and local measures in the area of individual gauges, such as larger construction measures and the resulting morphological changes in the coastal foreland, were also taken into account. In order to identify the processes involved, an estimation of the influence of local construction measures was carried out by the Research Institute for Water and Environment (fwi) of the University of Siegen within the subproject ALADYN-A. An approach was developed to separate large-scale developments from local effects in long-term observation data of tidal water levels and tidal range. With the help of detailed investigations of the local effects, the impact of individual construction measures could be described. Furthermore, in the subproject ALADYN-B the statistical analyses carried out were supplemented by numerical model investigations on the influence of large-scale effects on tidal dynamics at the Helmholtz Centre Geestbacht (HZG). In addition, the coastal research center of the Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN) investigated interactions between morphological changes in the estuaries and tidal dynamics in the adjacent coastal foreland in the subproject ALADYN-C. By comparing different morphological conditions it could be shown how far and to what extent the large-scale tidal dynamics can be influenced by locally limited changes.

Keywords

tidal dynamics, German Bight, North Sea, estuaries, tides, tidal range, tidal regime, tidal water levels, time series analysis, local effects, modeling, bathymetry, construction measures, change point analysis, morphology, peak water levels, sea level rise

1 Einleitung

Bei der Nordsee und insbesondere der Deutschen Bucht handelt es sich um ein stark tidebeeinflusstes und ebenso komplexes wie sensitives System, das fortwährenden, natürlichen und anthropogenen Veränderungen unterworfen ist. Entlang der gesamten deutschen Nordseeküste wurden ab Mitte der 1950er Jahre starke Veränderungen der Tidewasserstände und des Tidehubs beobachtet. Dabei variieren die Entwicklungen auf lokaler Ebene deutlich. Jensen (1984), sowie Führböter und Jensen (1985) konnten eine deutliche Zunahme des mittleren Tidehubs (MThb) entlang der deutschen Nordseeküste aufgrund von ansteigenden mittleren Hochwasserständen (MThw) feststellen, während die Niedrigwasserstände (MTnw) nahezu unverändert blieben. Während über den Zeitraum von 1884 bis 1983 die MThw im Mittel um $0,25 \pm 0,04$ m pro 100 Jahre angestiegen sind, hat sich dieser Anstieg deutlich beschleunigt und die MThw haben sich zwischen 1959 und 1983 bereits um $0,64 \pm 0,15$ m pro 100 Jahre erhöht (Führböter und Jensen 1985). Weitere Untersuchungen beschrieben die Veränderung der MTnw ab den 1950er Jahren als zunächst leicht sinkend, woraufhin in den 1980er Jahren ein stationäres Verhalten bzw. ein leicht positiver Trend folgt. Die konträre Entwicklung der Scheitelwasserstände hatte somit nach 1950 eine Zunahme des MThb zur Folge (Jensen et al. 1992). Sowohl großräumige Entwicklungen (z. B. Klimaänderungen und Meeresspiegelanstieg) als auch kleinräumige Effekte (z. B. natürliche morphologische Prozesse und anthropogene Einflüsse) haben zu diesen Veränderungen beigetragen (Haigh et al. 2020). Die Abschätzung der Größenordnung der Beiträge der beteiligten Prozesse ist jedoch noch immer eine große Herausforderung, und eine umfassende Antwort auf die Frage, inwieweit die baulichen Veränderungen (Vor- und Eindeichungen, Sturmflutsperrwerke usw.) an der Küste zu einer Veränderung der Tidedynamik beigetragen haben, steht noch aus.

Um diese ungewöhnlichen Veränderungen zu erklären, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Untersuchungen zur Interaktion zwischen veränderten Randbedingungen (z. B. mittlerer Meeresspiegel, Astronomie, Meteorologie) und der Reaktion des Tidehubs durchgeführt. Die beobachteten Veränderungen in der Ausprägung der Gezeiten konnten bislang nicht vollständig erklärt werden; infolgedessen wurde im Rahmen dieser Bearbeitung der Einfluss verschiedener möglicher groß- und kleinräumiger Faktoren detailliert untersucht.

Natürliche und anthropogene Einwirkungen auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht sind in einer schematischen Übersicht der Abbildung 1 zu entnehmen. Aufgeführt sind hier die Einwirkungen, auf denen der Fokus in den drei Teilprojekten lag. So zählen zu den großräumigen Einflüssen u. a. die Veränderung der Tidedynamik im Nordostatlantik, der Anstieg des mittleren Meeresspiegels sowie Schwankungen und Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, die im Teilprojekt ALADYN-B untersucht wurden. Im Teilprojekt ALADYN-C wurden die regionalen und überregionalen Einflussfaktoren wie die natürlichen morphodynamischen Prozesse entlang der Küste sowie Bodensenkungen, z. B. infolge von Gasentnahmen, detailliert betrachtet. Die lokalen und kleinräumigen Faktoren wurden wiederum im Teilprojekt ALADYN-A adressiert. Zu den hier untersuchten Einflüssen zählen u. a. Ausbaumaßnahmen in den Ästuren und Tideflüssen (z. B. Fahrrinnenvertiefungen), Deichbaumaßnahmen wie die Eindeichung der Meldorfer Bucht und weitere lokale Baumaßnahmen (z. B. Hafenumgestaltung und der Bau von Sperrwerken).

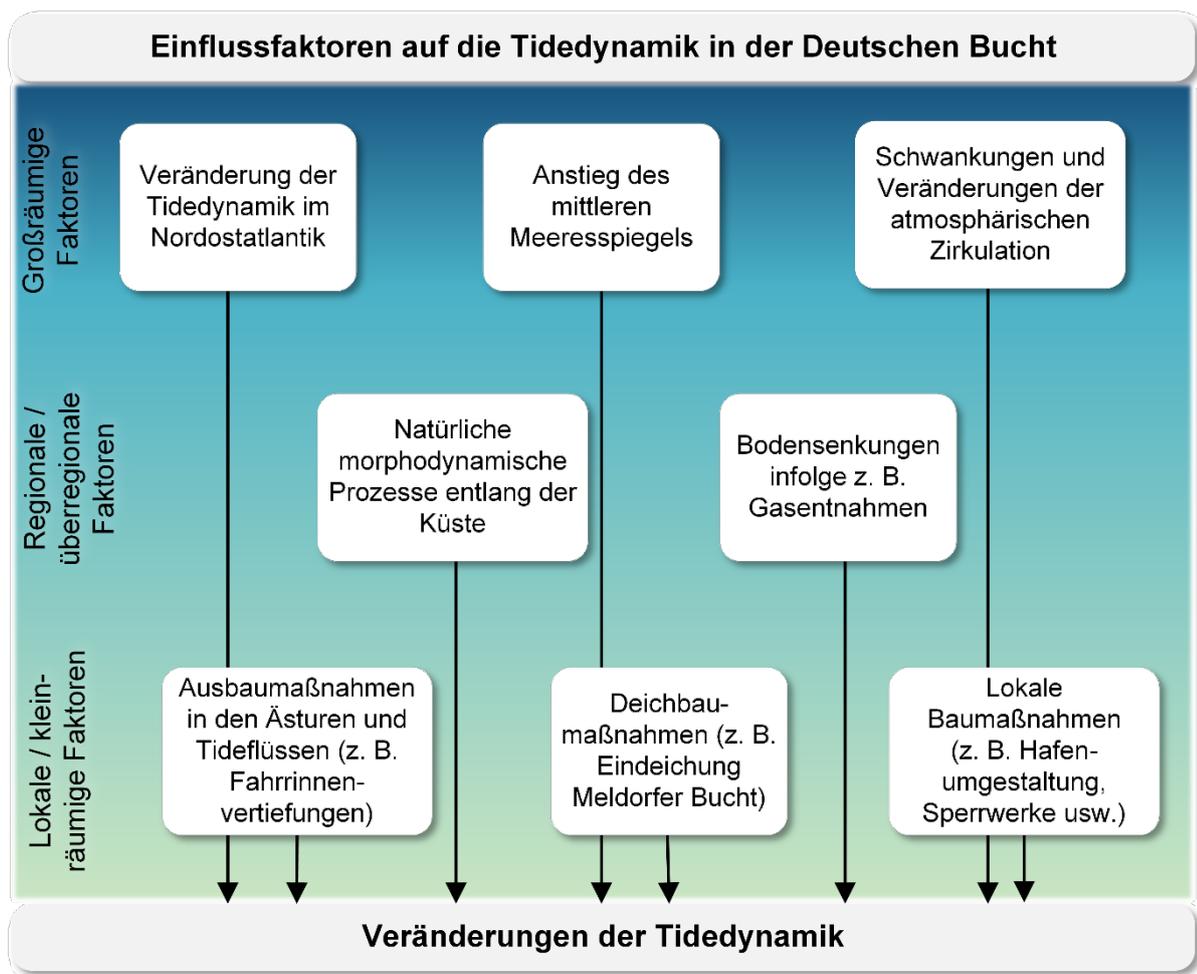


Abbildung 1: Übersicht der Einflussfaktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht, differenziert nach großräumigen (Untersuchungsschwerpunkt ALADYN-B), regionalen/überregionalen (Untersuchungsschwerpunkt ALADYN-C) und lokalen/kleinräumigen (Untersuchungsschwerpunkt ALADYN-A) Einflussfaktoren.

2 Forschungsfragen und Vorgehen

Durch das Forschungsvorhaben ALADYN sollten Zusammenhänge zwischen den beobachteten Änderungen in den Tidehubzeitreihen und möglichen externen natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren untersucht werden. Die übergeordneten Ziele des Projekts waren folglich detaillierte Analysen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht, wobei sowohl Pegelstandsaufzeichnungen der gesamten Nordsee als auch szenariobasierte numerische Modelldaten betrachtet wurden. Das Projekt gliedert sich wie folgt in die drei Teilprojekte bzw. die darin adressierten Fragestellungen:

- i. Wie hat sich die beobachtete Tidedynamik verändert und welche Auswirkung haben anthropogene Einflüsse? (ALADYN-A)
- ii. Welche großräumigen Auswirkungen auf die Tidedynamik lassen sich im Bereich der Deutschen Bucht feststellen? (ALADYN-B)
- iii. Welche Wechselwirkungen bezüglich der Tidedynamik zwischen den Ästuaren und der angrenzenden offenen See lassen sich feststellen?? (ALADYN-C)

In diesen drei Teilprojekten werden mithilfe verschiedener Ansätze die möglichen antreibenden Einwirkungen für Veränderungen der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste umfassend untersucht (vgl. Abbildung 1). Am Verbundprojekt beteiligt waren insgesamt drei Forschungsinstitutionen: das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen (Koordinator), das Zentrum für Material- und Küstenforschung, Institut für Küstenforschung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) und die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Die Vernetzung der beteiligten Teilprojekte ist in Abbildung 2 dargestellt.

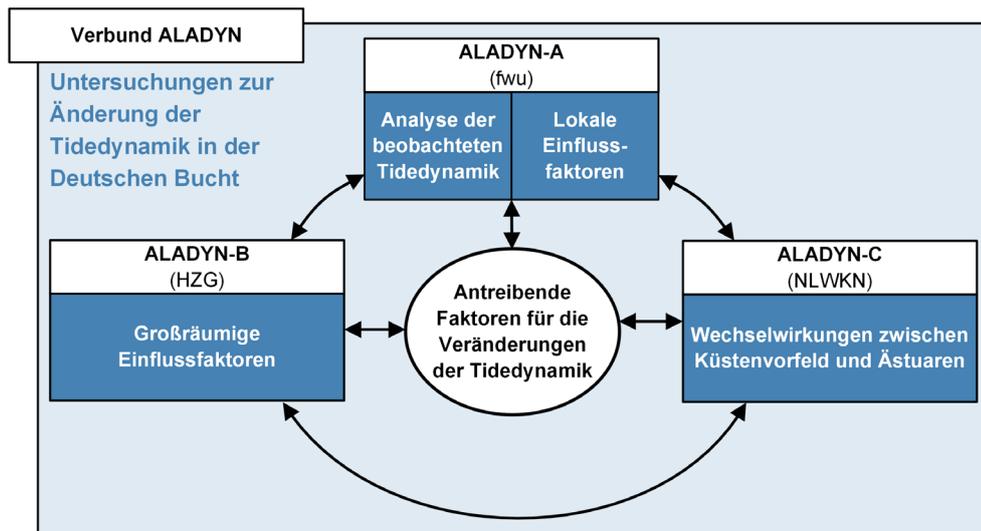


Abbildung 2: Vernetzung der Teilprojekte und Bausteine des Verbundprojekts ALADYN.

Im Teilprojekt ALADYN-A wurden am fwu die beobachteten Veränderungen der Tideparameter Mittlere Tidewasserstände (MT_{nw} und MT_{hw}) und Mittlerer Tidehub (MThb) in der Deutschen Bucht untersucht. Das Ziel war, Erklärungen für die Veränderungen in den MThb-Zeitreihen an den einzelnen Pegelstandorten abzuleiten und Gemeinsamkeiten in der Entwicklung herauszuarbeiten. Anschließend wurden die lokalen Effekte in der Nordsee untersucht. Dazu wurden relevante Baumaßnahmen ab etwa den 1950er Jahren zusammengestellt (Lehmann 2018) und Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgestellt sowie deren Einfluss auf die Tideparameter quantifiziert.

Das Teilprojekt ALADYN-B, bearbeitet vom HZG, ergänzte die Untersuchungen durch entsprechende numerische Modellstudien. Untersucht wurde dabei, inwieweit mögliche Veränderungen großräumiger Prozesse zu den in der Deutschen Bucht beobachteten Veränderungen der Tidedynamik beigetragen haben. Anhand einer Reihe von Hindcast- und Sensitivitätsexperimenten wurden damit unter anderem mögliche Beiträge von großräumigen Veränderungen der Gezeitendynamik am Rande der Nordsee, mögliche Einflüsse des Meeresspiegelanstiegs und der Variabilität des Windklimas sowie Einflüsse großräumiger Veränderungen der Bathymetrie in der Deutschen Bucht und die direkten Auswirkungen größerer Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste untersucht.

Im Teilprojekt ALADYN-C untersuchte der NLWKN auf Basis numerischer Modellrechnungen MThb-Veränderungen in der Nordsee, die durch anthropogene Eingriffe in den Ästuaren (am Beispiel von Ems und Weser) hervorgerufen wurden. Auf der Grundlage

von Rekonstruktionen historischer morphologischer Zustände (u. a. Homeier et al. 2010) wurde qualitativ und quantitativ abgeschätzt, inwieweit regionale Veränderungen innerhalb der Ästuare die überregionale Tidedynamik im angrenzenden Küstenvorfeld beeinflussen. Zudem wurde auch der Einfluss von Landsenkungen infolge von Gasförderung einbezogen. Das Modell des Teilprojektes ALADYN-C wurde mit dem Modell des Teilprojektes ALADYN-B durch den Austausch von Randwerten verknüpft.

Für die Untersuchungen der Veränderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht stehen Zeitreihen der Tidewasserstände sowie des Tidehubs von verschiedenen Pegelstandorten zur Verfügung. In Abbildung 3 ist die räumliche Verteilung der verwendeten Pegelzeitreihen dargestellt. Insgesamt wurden Wasserstandsaufzeichnungen von 21 Tidepegeln verwendet, von denen 18 Pegel in der Deutschen Bucht, zwei an der niederländischen Küste im Bereich der Emsmündung und ein weiterer Pegel an der Küste Dänemarks liegen.

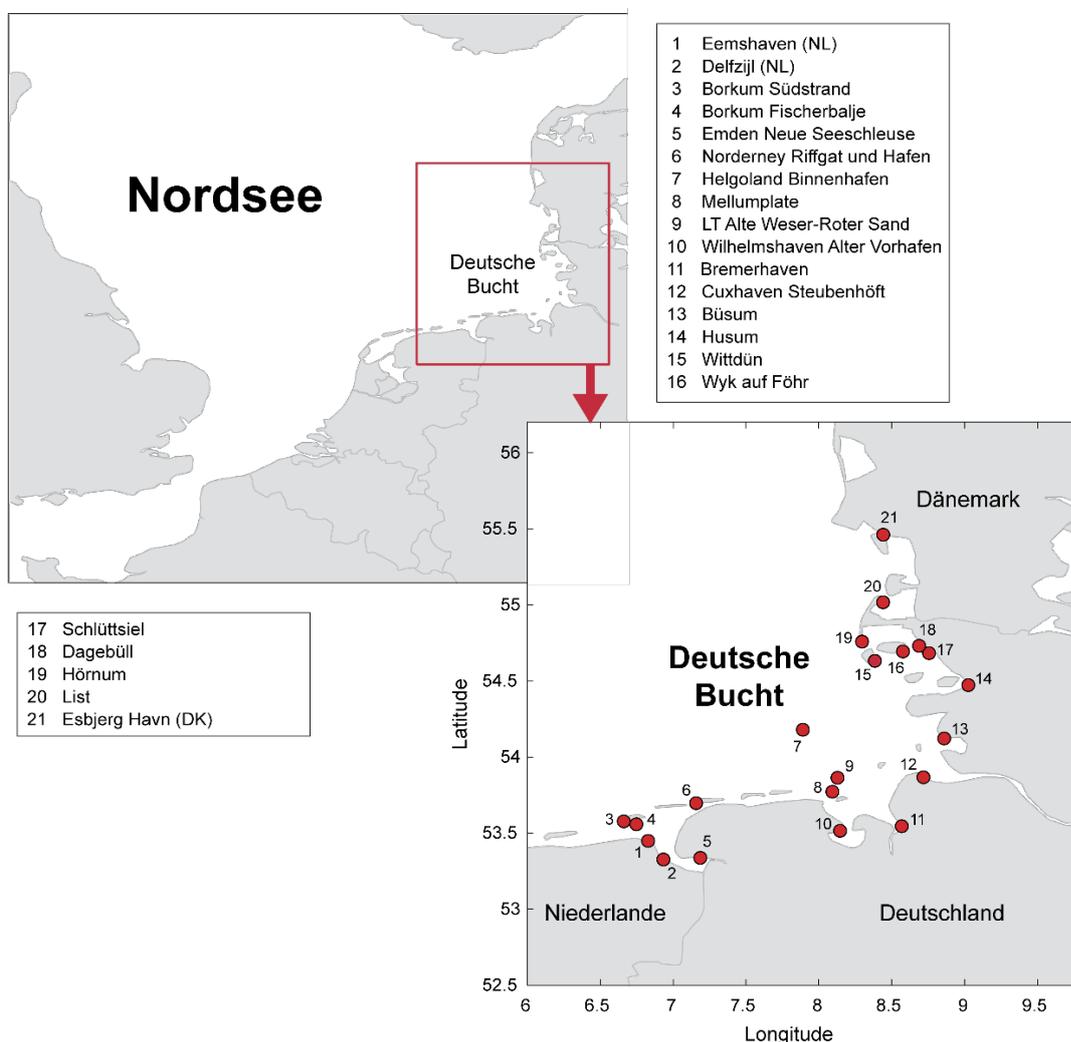


Abbildung 3: Verwendete Pegelstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die für die jeweiligen Pegelstandorte verfügbaren Datensätze wurden von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowie über die Portale des zugehörigen Zentralen Datenmanagements (ZDM, <https://www.portalnsk.de/>) für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Pegeldata wurden als Teil dieses Forschungsvorhabens für alle weiteren Analysen plausibilisiert und bereinigt.

3 Ergebnisse und Ausblick

3.1 ALADYN-A – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen (fwu)

Entlang der deutschen Nordseeküste ist es seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu beträchtlichen Veränderungen der Tidedynamik gekommen. Die Entwicklungen spiegeln sich insbesondere in einem Anstieg des MThb wieder, wobei an der Küste Schleswig-Holsteins die größeren Veränderungen im Vergleich zur Nordseeküste Niedersachsens stattgefunden haben. Die Trends des MTnw hingegen variieren sowohl in ihrer Ausprägung als auch zwischen positiven und negativen Werten über das gesamte Untersuchungsgebiet. Diese inhomogene Entwicklung des MTnw in der Deutschen Bucht liefert ein erstes Indiz für die Beeinflussung des Tidegeschehens an unterschiedlichen Küstenabschnitten durch lokale Effekte. Demnach scheinen die abgeleiteten Veränderungen der Tidewasserstände im Untersuchungsgebiet sowohl eine gemeinsame Entwicklung durch großräumige Einwirkungen als auch kleinräumige Effekte zu enthalten. Diese kleinräumigen Effekte können z. B. durch lokale bauliche Maßnahmen und morphologische Entwicklungen verursacht werden. Die vorgestellte Methodik der Kombination verschiedener statistischer Verfahren ermöglicht es, diese beiden genannten Komponenten an jedem beliebigen Pegelstandort im Untersuchungsgebiet zu trennen. Die zugrunde liegende Annahme der Methodik ist, dass die ähnlichen Trends insbesondere der MThw- und MThb-Zeitreihen einer gemeinsamen und großräumigen Beeinflussung unterliegen und sich dies in einem gemeinsamen Signal äußert. Durch die starke Variation der Trends der MTnw wird deutlich, dass die Pegel unter dem starken Einfluss lokaler Effekte stehen.

Als Methodik zur Separierung der klein- und großräumigen Signale in den Zeitreihen der Tideparameter wurde die sog. Hauptkomponentenanalyse (*engl. Principal Component Analysis, PCA*) herangezogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die erste Hauptkomponente (*engl. Principal Component, PC*), die den Großteil der Varianz im Untersuchungsgebiet beschreibt, auch das jeweils in den betrachteten Zeitreihen enthaltene gemeinsame Signal abbildet (vgl. Jänicke et al. 2020). Demzufolge bilden alle weiteren, in den höheren Hauptkomponenten enthaltenen Veränderungen die lokalen Effekte ab. Rund 90 % der Varianz wird im Untersuchungsgebiet im Fall der MThw- und MThb-Zeitreihen durch die erste PC (PC1) abgebildet, wohingegen das MTnw nur zu 70 % durch PC1 repräsentiert wird. Dies bedeutet, dass MThw und MThb signifikant stärker von großräumigen Einwirkungen beeinflusst werden. Zudem weisen die Zeitreihen des MTnw räumlich variierende Varianzen der niedrigeren PC auf und nur rund 70 % lassen sich über das gemeinsame Signal beschreiben. Für jeden Pegelstandort lässt sich also zusätzlich zu den Beobachtungszeitreihen über eine Rekonstruktion mit der ersten Hauptkomponente sowohl das gemeinsame Signal ermitteln als auch über Differenzbildung ein lokales Signal generieren.

Mithilfe einer Bruchpunktanalyse lassen sich un stetige Veränderungen in den Tidekennwerten detektieren. Angewendet wurde die Bruchpunktanalyse auf die jeweils ermittelten Differenzzeitreihen zwischen Beobachtungszeitreihen und dem gemeinsamen Signal an den einzelnen Pegelstandorten. Im Weiteren können die linearen Trends der Teilzeitreihen untersucht werden, die durch die detektierten Bruchpunkte begrenzt werden. Dadurch lässt sich wiederum die Entwicklung vor und nach einem Bruchpunkt vergleichen. Durch die zeitliche und räumliche Zuordnung der identifizierten Bruchpunkte können für diese potentielle Ursachen gefunden werden. Aufgrund der resultierenden Änderungen nach einem

Bruchpunkt lassen sich die zugeordneten Ursachen plausibilisieren und ggf. physikalisch erklären. Zusätzlich dazu können die Bruchpunkte der lokalen Signale in einer gemeinsamen Betrachtung Aufschluss über räumliche Muster geben. So lässt sich der Wirkungsradius einzelner plausibilisierter Ursachen wie bspw. größerer Baumaßnahmen beschreiben. Im untersuchten Gebiet jedoch konnten durch eine solche Betrachtung für keinen der drei Tideparameter ein räumliches Muster oder zusammenhängende Bruchpunkte eindeutig identifiziert werden. Demzufolge scheint die Wirkung von Baumaßnahmen lokal begrenzt zu sein oder aber die abgeleitete Methodik stößt hier an ihre Grenzen. Anhand der verwendeten Pegelstandorte konnte jedoch gezeigt werden, dass sich durch die Methodik Auswirkungen von Baumaßnahmen in den Zeitreihen feststellen lassen, die zudem physikalisch plausibel erscheinen. Die Methodik wird daher als geeignet erachtet, großräumige bzw. gemeinsame Signale in Wasserstandsaufzeichnungen zu separieren und einzelne lokale Effekte zu untersuchen.

Mit dem vorgestellten Verfahren konnten verschiedene Baumaßnahmen bzw. deren Auswirkungen in den Beobachtungszeitreihen detektiert werden. Ausbaumaßnahmen und Vertiefungen von Gewässerabschnitten der drei großen Tideästuare wurden als unetwige Veränderungen vorwiegend, aber nicht ausschließlich, im MTnw erkennbar. So führte die Vertiefung des Emders Fahrwassers zwischen 1952 und 1972 vermutlich zu Bruchpunkten an den Pegeln Borkum Südstrand und Emden, der Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998/99 zu Bruchpunkten an den Pegeln Mellumplate und Bremerhaven und die Elbvertiefung im Zeitraum von 1974 bis 1978 scheint für unetwige Veränderungen von MTnw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft verantwortlich zu sein. Auch die Eindeichungsmaßnahmen der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978 lassen sich sehr deutlich im MThb des Pegels Büsum erkennen und durch ansteigendes MTnw und stagnierendes MThw beschreiben. Zudem konnten Hafenbaumaßnahmen wie am Pegel Delfzijl, erkennbar durch einen Bruchpunkt gegen Ende der 1970er, in den Aufzeichnungen detektiert werden. Außerdem scheint die Methode geeignet zu sein, Änderungen am Pegelstandort (z. B. Lage, Bezugsniveau) in den Zeitreihen der Tidekennwerte zu identifizieren. So lässt sich vermutlich die Umstellung des Pegels Norderney Hafen auf Norderney Riffgat in den 1960er Jahren feststellen, und am Pegel Esbjerg Havn lässt sich eine plötzliche Erhöhung von MTnw und MThw um einige Zentimeter auf eine örtliche Versetzung des Pegels zurückführen. An einigen Pegeln wie bspw. Helgoland Binnenhafen und Dagebüll wurden ebenfalls ein bzw. zwei Bruchpunkte detektiert, die jedoch keiner Baumaßnahme bzw. keinem lokalen Effekt zugeordnet werden konnten. Dies muss jedoch nicht zwingend auf ein ungeeignetes Verfahren hinweisen, vielmehr kann eine mangelhafte Informationsgrundlage zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen es erschweren, allen kleinräumigen Änderungen Ursachen zuzuordnen. Auch andere Ursachen, wie kleinräumige und nicht als Bruchpunkte detektierbare Änderungen, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht adressiert wurden, sind nicht auszuschließen. Dazu können bspw. auch morphologische Prozesse und Entwicklungen gehören, deren Kippunkt (noch) nicht erreicht ist. Insbesondere in solch einem komplexen System wie dem der Nordsee und insbesondere deren Küstengewässern kann nicht davon ausgegangen werden, dass vielfältige Änderungen von groß- und kleinräumigen Randbedingungen auch kontinuierliche Systemreaktionen verursachen. Wie auch bei der Methodik der Kippunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al. 2008) sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung nicht immer offensichtlich und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen.

3.2 ALADYN-B – Modellgestützte Untersuchungen zur großräumigen Tidedynamik (HZG)

Mithilfe numerischer hydrodynamischer Modellierung und statistischer Auswertung wurden verschiedene großräumige Faktoren untersucht, die zu den beobachteten Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht beigetragen haben könnten. Dazu wurde das im 2D-Modus genutzte Modell TRIM-NP (Tidal Residual Intertidal Mudflat - Nested and Parallized) (Kapitza und Eppel 1990; Pätsch et al. 2017) in einer genesteten Version verwendet. Dabei werden immer kleinere Modellgebiete mit höherer Auflösung von Randwerten größerer Gebiete mit geringerer Auflösung angetrieben. Das größte verwendete Modellgebiet umfasste dabei die Nordsee und angrenzende Teile des Nordostatlantiks mit einer Auflösung von 12,8 km x 12,8 km. In dieses Gebiet wurden weitere kleinere Gebiete mit verschiedenen Gitterweiten von 6,4 km, 3,2 km und 1,6 km sowie von 800 m und 400 m genestet. Dabei wird die südliche Nordsee durch das 1,6-km-Gitter abgedeckt, wohingegen die Modellgebiete mit 800 m und 400 m Gitterweite im Wesentlichen die Deutsche Bucht und die deutschen Küstengebiete umfassen. Die verwendeten Gitter stellen einen Kompromiss dar, um zum einen großräumige Prozesse über längere Zeiträume, zum anderen aber auch Einflüsse überregionaler Faktoren zu berücksichtigen. Der Einfluss lokaler kleinräumiger Faktoren konnte und sollte mit diesem Setup nicht abgebildet werden.

Mit diesem Setup wurden mögliche Beiträge einer Reihe großräumiger Faktoren zu den beobachteten Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht untersucht. Dazu zählten großräumige Veränderungen der Tidedynamik im Nordostatlantik sowie der in der Vergangenheit beobachtete Anstieg des mittleren Meeresspiegels, langfristige Schwankungen oder Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation, großräumige morphologische Änderungen entlang der Küsten und der direkte Einfluss größerer historischer Baumaßnahmen, von denen ein räumlich größerer Beitrag ausgegangen sein könnte.

Um die großräumigen Veränderungen in der Tidedynamik vom Einfluss lokaler Effekte zu trennen, wurde zunächst für die jährlichen Tideparameter (MThb, MThw, MTnw) an 15 Pegeln entlang der deutschen Küste für den Zeitraum 1958-2014 eine Zerlegung mittels empirischer Orthogonalfunktionen (EOFs) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die erste EOF des MThw durch kohärente großräumige inter-annuale Schwankungen sowie einen kohärenten, an allen Pegeln zu beobachtenden großräumigen Anstieg von etwa 3,7 mm/Jahr im Untersuchungszeitraum charakterisiert war. 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 % 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 erklärt werden könnten.

In einem nächsten Schritt wurden dann mögliche Beiträge großräumiger Prozesse untersucht. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich die Tidedynamik im Nordatlantik selbst innerhalb geologischer Zeiträume nur langsam ändern wird, wurde dieser Faktor in Betracht gezogen, da Schelfmeere, die sich nahe der Resonanz befinden, möglicherweise sensitiv bereits auf kleine Änderungen reagieren können. Dazu wurde zunächst untersucht, ob – und wenn ja, welche – Veränderungen der Tidedynamik am Rande der

Nordsee beobachtet werden konnten und daran anschließend, inwiefern mögliche resonante Verstärkungen innerhalb der Nordsee wahrscheinlich sind. Die Analyse von Pegel-daten aus Aberdeen und Newlyn am nördlichen bzw. südlichen Rand der Nordsee zeigte, dass sich an beiden Pegeln in den vergangenen etwa 80 Jahren der mittlere Tidehub abge-sehen von deutlichen nodalen Schwankungen nicht signifikant geändert hat. Sensitivitäts-experimente mit dem beschriebenen hydrodynamischen Modell ergaben des Weiteren, dass am Rande der Nordsee vorgegebene Änderungen im Tidehub im Inneren des Modellge-biets gedämpft wurden, so dass mögliche Beiträge von Veränderungen in der großräumigen Tidedynamik außerhalb der Nordsee vermutlich keinen wesentlichen Beitrag zu den beobachteten Veränderungen in der Deutschen Bucht geliefert haben.

Die möglichen Beiträge von beobachtetem Meeresspiegelanstieg und von Veränderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zu den Änderungen in der Tidedy-namik wurden sowohl mit Modellexperimenten und Hindcasts als auch mit statistischen Analysen untersucht. Hierbei ergab sich, dass statistisch signifikante Zusammenhänge zwi-schen dem beobachteten Meeresspiegelanstieg und dem MThw sowie dem MTnw existie-ren. Es konnte jedoch keine signifikante Korrelation zwischen den beobachteten Verände-rungen im mittleren Tidehub und dem beobachteten Meeresspiegelanstieg gefunden wer-den. Die jährlichen großräumigen Schwankungen im MThw und MTnw hängen stark mit der jährlichen Variabilität der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zusammen, wo-bei letztere jeweils etwa 72 % der beobachteten Variabilität im MThw und MTnw erklären kann. Dagegen tragen langfristige Veränderungen im Windklima vermutlich nur in sehr geringem Maß zu langfristigen Veränderungen der Tideparameter bei. So beträgt beispie-lsweise der anhand der modellierten Daten abgeschätzte Trend im MThw lediglich knapp 13 % des beobachteten Wertes.

In einem letzten Schritt wurden mögliche Beiträge größerer Baumaßnahmen (z. B. in-folge von Deichbaumaßnahmen) und morphologischer Veränderungen untersucht. Auch hier wurden lediglich mögliche großräumige Effekte untersucht. Analog zum obigen Vor-gehen wurden die Veränderungen in einer Kombination aus Modellexperimenten und sta-tistischen Analysen untersucht. Sowohl in der statistischen Modellbildung als auch in den numerischen Experimenten zeigte sich, dass die beobachteten großräumigen morphologi-schen Veränderungen in der Lage sind, einen Großteil der beobachteten Veränderungen im MThb zu erklären. Allerdings standen großräumige Bathymetriedaten erst ab 1996 zur Verfügung, so dass kein umfassender Rückschluss auf frühere Veränderungen möglich ist.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse von ALADYN-B, dass das Zusammenspiel mehrerer großräumiger Faktoren zumindest deutliche Beiträge zu den beobachteten Ver-änderungen und Schwankungen in den Tideparametern in der Deutschen Bucht geliefert haben könnten. Insbesondere können jährliche und dekadische Schwankungen in der groß-räumigen atmosphärischen Zirkulation einen wesentlichen Teil der beobachteten jährli-chen und dekadischen Variabilität der mittleren Hochwasser erklären. Beobachtete lang-fristige Veränderungen können Beiträge durch den gestiegenen mittleren Meeresspiegel sowie durch morphologische Änderungen und Veränderungen von Küstenlinien durch Baumaßnahmen enthalten. Hierbei scheint der Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Vergangenheit eher mit gleichläufigen Anstiegen im MThw und MTnw verbunden gewesen zu sein. Großräumige morphologische Veränderungen und Veränderungen der Küstenli-nien scheinen dagegen in der Lage zu sein, den Tidehub wesentlich zu beeinflussen.

3.3 ALADYN-C – Wechselwirkungen zwischen Ästuar und Küstenvorfeld (NLWKN)

Basierend auf numerischen Modellanalysen wurde der Einfluss von Ausbaumaßnahmen innerhalb der Ästuar Ems und Weser auf das jeweils benachbarte Küstenvorfeld untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein skalenübergreifendes, unstrukturiertes Berechnungsgitter aufgebaut und mit dem semi-impliziten hydronumerischen Finite-Elemente-Modellsystem SCHISM (Zhang et al. 2016) betrieben. Das Modell erstreckt sich in dem gewählten Setup über die gesamte Nordsee bis in Teile des Nordostatlantiks. Hintergrund dieser großräumigen Betrachtung der zunächst regionalen Veränderungen ist einerseits dessen a priori unbekannter Einflussbereich, andererseits die Bestrebung, Randbedingungen für den Antrieb des Modells möglichst fern vom Untersuchungsgebiet sowie unter Verzicht von übergeordneten Modellkaskaden zu erzeugen. Der letztgenannte Punkt minimiert das Risiko von Randeinflüssen auf die Modellergebnisse und ermöglicht eine physikalisch konsistente Ausbreitung der Tidedynamik im gesamten Modellgebiet ohne Informationsverlust an andernfalls unverzichtbaren Übergabepunkten.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde die Hydrodynamik verschiedener morphologischer Ausbauzustände mittels numerischer Modellierung auf Grundlage aktueller sowie rekonstruierter Topographien nachgebildet und die daraus resultierenden Unterschiede bestimmter Tidekennwerte in der Fläche ausgewertet. Dies ermöglichte sowohl die quantitative Erfassung der Differenzen als auch die räumliche Ausbreitung von Änderungen des Tideregimes bei Betrachtung einzelner, von anderen Einflussfaktoren isolierter Eingriffe bzw. anderweitiger morphologischer Veränderungen.

Für die Erstellung der Modelltopographie konnte einerseits auf bereits vorhandene Rekonstruktionen historischer Ausbauzustände zurückgegriffen werden (Elsebach et al. 2007, Herrling und Niemeyer 2007), andererseits wurden weitere Rekonstruktionen durch umfangreiche manuelle Digitalisierung angefertigt.

Darüber hinaus wurde mit derselben Methodik der Einfluss auf die Tidedynamik der Außenems untersucht, der sich durch Bodensenkungen infolge von Gasentnahme im benachbarten Groninger Erdgasfeld ergibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass regionale Veränderungen der Bathymetrie das Tidegeschehen auch fernab des Ausgangsgebietes beeinflussen können, insbesondere leewärts der Propagationsrichtung der Tidewelle. Die Ergebnisse liefern eine Einschätzung über den Beitrag der vergangenen umfangreichen Flussbaumaßnahmen entlang Ems und Weser an der Veränderung des Tideregimes als auch an den beobachteten langzeitlichen Trends. Somit schaffen die Ergebnisse einen neuen und relevanten Beitrag zur Interpretation dieser Daten hinsichtlich Veränderungen des mittleren Meeresspiegels sowie klimabedingter Einflussfaktoren.

4 Danksagung

Das Verbundprojekt ALADYN wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 vom BMBF im Projekt Küstenmeerforschung des Rahmenprogramms Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA 3) durch den Projektträger Jülich gefördert. (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0756 A-C).

Der Projektkoordinator, die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die sehr gute Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare und sehr kollegiale Zusammenarbeit mit der projektbegleitenden Gruppe.

Die im Rahmen des von der DFG geförderten Vorhabens TIDEDYN erzielten Ergebnisse konnten für die Entwicklung der statistischen Methodik genutzt werden und hatten hinsichtlich der Zielsetzung von ALADYN sehr positive Synergieeffekte zur Folge.

5 Literaturverzeichnis

Elsebach, J.; Kaiser, R.; Niemeyer, H. D.: Identifikation von erheblich veränderten Gewässerbereichen in der Tideweser. Untersuchungsbericht der NLWKN Forschungsstelle Küste 05/2007, Norderney (unveröffentlicht), 2007.

Führböter, A.; Jensen, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste*, 42, 78–100, 1985.

Haigh, I. D.; Pickering, M. D.; Green, J. A. M.; Arbic, B. K.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hill D.; 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 non-astronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications. *Review of Geophysics*, 58, 1, <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>, 2020.

Herrling, G.; Niemeyer, H. D.: Reconstruction of the historical tidal regime of the Ems-Dollard estuary prior to significant human changes by applying mathematical modeling. HARBASINS Report, 2007.

Homeier, H.; Stephan H.-J.; Niemeyer, H. D.: Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. *Berichte der Forschungsstelle Küste*. Band 43/2010, Norderney, 2010.

Jänicke, L.; Ebener, A.; Dangendorf, S.; Arns, A.; Schindelegger, M.; Niehüser, S.; Haigh, I. D.; Woodworth, P. L.; Jensen, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea. Preprint, Manuscript submitted in: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, <https://doi.org/10.1002/essoar.10503227.1>, 2020.

Jensen, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. In: *Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig*, 83, 1984.

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

Lehmann, C.: Baumaßnahmen an der Westküste Schleswig-Holsteins seit 1900; Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), 2018.

Lenton, T. M.; Held, H.; Kriegler, E.; Hall, J. W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H. J.: Tipping elements in the Earth's climate system. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 6, 1786–1793, <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>, 2008.

Zhang, Y.; Ye, F.; Stanev, E.V.; Grashorn, S.: Seamless cross-scale modeling with SCHISM. In: *Ocean Modelling*, 102, 64–81, 2016.