

# ALADYN: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight

## Schlussbericht zu 3.2 BNBest-BMBF 98

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen: 03F0756A, 03F0756B und 03F0756C

Bearbeitungszeitraum: 10/2016 – 09/2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Dr.-Ing. Arne Arns

Andra Ebener, M.Sc.

Dr. Ralf Weisse

Dr. Xing Yi

Dr.-Ing. Andreas Wurpts

Dipl.-Ing. Cordula Berkenbrink

Dipl.-Ing. Krischan Hubert

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)

Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau

Universität Siegen

Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)

Institut für Küstenforschung

Forschungsstelle Küste (FSK)

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Siegen, den 31.03.2020



## Vorwort

Bei der Nordsee und insbesondere der Deutschen Bucht handelt es sich um ein stark tidebeeinflusstes und ebenso komplexes wie sensibles System, welches fortwährenden, natürlichen Veränderungen unterworfen ist. Diese Veränderungen spiegeln sich auch in den Charakteristiken der Tide wider, welche i. d. R. aus Pegelaufzeichnungen abgeleitet werden können. Im letzten Jahrhundert unterlag die Küstenlinie der (deutschen) Nordsee jedoch vermehrt großskaligen anthropogenen Einflüssen. Hiermit scheinbar korrelierend zeigen lange zurückreichende Aufzeichnungen entlang der Deutschen Nordseeküste eine deutlich beschleunigte Zunahme des Tidehubs seit Mitte der 1950er Jahre, die in den letzten Jahren jedoch wieder nachgelassen hat. Während dieser Phase wurde der sonst vorherrschende lunare Zyklus (Minima um 1951 und 1970, Maxima um 1960 und 1979) von diesem starken Anstieg überschattet. Einige der Pegel, die diese Änderungen anzeigen (besonders Helgoland und LT Alte Weser aufgrund ihrer exponierten Lage), gelten zumindest nach heutigem Kenntnisstand als durch unnatürliche Quellen wenig beeinflusst. Um diese ungewöhnlichen Anstiegsraten zu erklären, wurden in den vergangenen Jahren unterschiedlichste Untersuchungen zur Interaktion zwischen veränderten Randbedingungen (z. B. mittlerer Meeresspiegel, Astronomie, Meteorologie) und der Reaktion des MThb durchgeführt. Jedoch konnte keine dieser Untersuchungen die beobachteten Raten vollständig erklären. Eine weitere, bisher nicht im Detail untersuchte Erklärung, sieht die Hauptursache in dem Einfluss größerer Baumaßnahmen. Durch ALADYN soll die genannte (Schein-)Korrelation der gemessenen Anstiege im Tidehub zu der erhöhten anthropogenen Einflussnahme auf Stichhaltigkeit geprüft werden. Es wird also untersucht inwieweit die einzelnen Pegel tatsächlich durch Baumaßnahmen und den daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld beeinflusst sind. Zusätzlich sollen auch mögliche Effekte auf die Lage der amphidromischen Punkte betrachtet werden. Hierzu wurden im Laufe des Projektes u. a. detaillierte Analysen zur Veränderung der Tidedynamik auf Basis der verfügbaren Daten sowie im Rahmen von hochaufgelösten Modellstudien durchgeführt.

Dieser Schlussbericht stellt die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben ALADYN zusammen und gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten. Als Anhang zum formalen Teil, in dem die verkürzte Darstellung der Ergebnisse gemäß der in Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98 vorgegebenen Struktur erfolgt, werden die fachlichen Abschlussberichte der Teilprojekte des Verbundprojektes „ALADYN – Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight“ bei, der für eine Veröffentlichung in der Schriftenreihe Die Küste - herausgegeben durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI) - vorgesehen ist. Hier findet sich eine detaillierte Darstellung der erfolgten Arbeiten. An geeigneter Stelle wird im formalen Teil auf diesen ausführlichen Fachbericht verwiesen.

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 03F0756A, 03F0756B und 03F0756C gefördert.**

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.**



<b>ALADYN – Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight</b>	
<b>Förderkennzeichen: 03F0756A, 03F0756B und 03F0756C</b>	
<b>Projektlaufzeit: 10/2016 – 09/2019</b>	
<b>PROJEKTPARTNER</b>	
	<p>Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen und Küstenwasserbau</p> <p>Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)</p> <p>Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen</p> <p><b>Titel: Analyse der beobachteten Tidedynamik (ALADYN-A)</b></p>
	<p>Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)</p> <p>Zentrum für Material- und Küstenforschung</p> <p>Insitut für Küstenforschung</p> <p>Dr. Ralf Weisse</p> <p><b>Titel: Modellgestützte Untersuchungen zur großräumigen Tidedynamik Verstärkungen (ALADYN-B)</b></p>
	<p>Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)</p> <p>Forschungsstelle Küste (FSK)</p> <p>Dr.-Ing. Andreas Wurpts</p> <p><b>Titel: Wechselwirkungen zwischen Ästuar und Küstenvorfeld (ALADYN-C)</b></p>

**Anschriften der Projektpartner:**

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen  
Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57076 Siegen  
E-Mail: [juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)  
Tel.: 0271-7402172; Fax.: 0271-7402722  
Internet: [www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/](http://www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/)

Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)  
Dr. Ralf Weisse  
Zentrum für Material- und Küstenforschung, Institut für Küstenforschung  
Max-Planck-Str. 1  
21502 Geesthacht  
E-Mail: [ralf.weisse@hzg.de](mailto:ralf.weisse@hzg.de)  
Tel.: 04152-872819; Fax.: 04152-872818  
Internet: [https://www.hzg.de/institutes\\_platforms/coastal\\_research/index.php.de](https://www.hzg.de/institutes_platforms/coastal_research/index.php.de)

Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz  
(NLWKN)  
Dr.-Ing. Andreas Wurpts  
Forschungsstelle Küste (FSK)  
An der Mühle 5  
26548 Norderney  
E-Mail: [andreas.wurpts@nlwkn-ny.niedersachsen.de](mailto:andreas.wurpts@nlwkn-ny.niedersachsen.de)  
Tel.: 04932-916121  
Internet: [https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wir\\_uber\\_uns/  
betriebsstellen/norden\\_norderney/forschungsstelle\\_kuste/fsk-42612.html](https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wir_uber_uns/betriebsstellen/norden_norderney/forschungsstelle_kuste/fsk-42612.html)

## Für die Kapitel des Schlussberichts verantwortliche Projektpartner:

**Schlussbericht (formaler Teil)**      Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen  
Autoren: A. Arns, A. Ebener, J. Jensen (in Zusammenarbeit mit allen anderen Projektpartnern)

### Anlage (Fachbericht):

**Teil 1**                      **Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideänderungen durch locale Systemänderungen (ALADYN-A)**

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen

Autoren: A. Ebener, A. Arns, L. Jänicke, S. Dangendorf, J. Jensen

**Teil 2**                      **Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss großräumiger Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht (ALADYN-B)**

Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)

Autoren: Y. Xing, R. Weisse

**Teil 3**                      **ALADYN: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight. Interaction between estuaries and the open sea. (ALADYN-C)**

Forschungsstelle Küste (FSK), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Autoren: K. Hubert, A. Wurpts, C. Berkenbrink

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis .....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	VIII
1 Kurzdarstellung.....	1
1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung .....	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn.....	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2 Eingehende Darstellung.....	9
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	9
2.2 Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordsee- küste (ALADYN-A, WP A.1–A.4, fwu).....	9
2.3 Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss großräumiger Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht (ALADYN-B, WP B.1–B.4, HZG).....	11
2.4 Wechselwirkungen zwischen Ästuar und Küstenvorfeld (ALADYN-C, WP C.1, NLWKN).....	12
2.5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	13
2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	13
2.7 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	13
2.8 Fortschritt bei anderen Stellen .....	13
2.9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	14
Literaturverzeichnis .....	17
Anhang .....	18

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projekttreffen im Rahmen des Verbundprojekts ALADYN und Teilnahme an nationalen und internationalen Fachkonferenzen.....	7
--	---

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Einer der Hauptparameter zur Beschreibung der Tidedynamik ist der mittlere Tidehub (MThb), d. h. die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Hoch- (Thw) und Niedrigwasser (Thw). In der Deutschen Bucht kann das MThb je nach Standort Werte von mehr als 3,0 m erreichen. Auf der Grundlage von Pegelaufzeichnungen wurden in den letzten Jahrzehnten große Zunahmen der MThb festgestellt (Jensen et al., 1992; Jensen und Mudersbach, 2007). Bis heute gibt es jedoch keine veröffentlichte Erklärung, die die ungewöhnlichen Zunahmen des MThb umfassend beschreibt. Eine ziemlich schwierige Aufgabe, da die Quantifizierung des Beitrags einzelner Komponenten (z. B. Mean Sea Level (MSL), astronomischer und atmosphärischer Antrieb usw.) oder deren Veränderungen allein anhand von Beobachtungsdaten schwierig ist. Aus diesem Grund konzentrieren sich zahlreiche Studien auf modellbasierte Untersuchungen, bei denen eine oder mehrere zu verändernde Komponenten berücksichtigt werden. So kamen Arns et al. (2015) aus numerischen Modellexperimenten in der Deutschen Bucht zu dem Schluss, dass die Erhöhung des MThb zumindest teilweise durch Veränderungen einiger der wichtigsten Gezeitenkomponenten als Folge des Sea Level Rise (SLR) zu erklären ist. Ihre Ergebnisse waren jedoch immer noch nicht in der Lage, die beobachteten Veränderungen des MThb vollständig zu beschreiben, was darauf hindeutet, dass auch andere Phänomene als der Anstieg des MSL zu den in der Deutschen Bucht festgestellten Zunahmen der lokalen Tidedynamik beitragen. Dazu können morphologische Veränderungen durch natürliche (z. B. Erosion) und anthropogene (z. B. Baggerarbeiten) Einflüsse hervorgerufen werden. Inwieweit die einzelnen Pegel tatsächlich durch Baumaßnahmen und den daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld beeinflusst wurden, wurde im Rahmen des Projektes untersucht. Wesentliche 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. adressierte Fragestellungen:

- i. Wie hat sich die beobachtete Tidedynamik verändert und welchen Auswirkung haben anthropogene Einflüsse? (ALADYN-A)
- ii. Welche großräumigen Auswirkungen auf die Tidedynamik lassen sich im Bereich der Deutschen Bucht feststellen? (ALADYN-B)
- iii. Gibt es relevanten Wechselwirkungen zwischen den Ästuaren und der Deutschen Nordsee? (ALADYN-C)

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bereits zu Projektbeginn lagen umfangreiche Untersuchungen zur Veränderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht vor. Diese stützen sich im Wesentlichen auf die Auswertung vorhandener Pegeldaten. Durch die Kooperation der am Projekt ALADYN beteiligten Partner wurde erstmalig eine integrative Betrachtungsweise ermöglicht, bei der Expertise aus dem Küsteningenieurwesen, der Ozeanographie und der Klimatologie beteiligt war, um mit Hilfe numerischer Simulationen und statistischer Analysen systematisch mögliche Einflüsse sowohl großskaliger als auch kleinskaliger Faktoren auf die Veränderung des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht zu untersuchen.

Das Projekt basiert auf dem verfügbaren Fachwissen und den Modellierungstechniken der beteiligten Partner sowie auf allen verfügbaren Informationen und Daten, die den nationalen und internationalen Stand der Technik in den verschiedenen Disziplinen repräsentieren. Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, ein verbessertes Wissen über langfristige Veränderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht wissenschaftlich abzuleiten. Deshalb wurde eine interdisziplinäre Forschungsgruppe eingerichtet, die über eine große Erfahrung (auch gemeinsam) in ihren einzelnen Fachgebieten verfügt:

### Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)

Das 1994 gegründete fwu im Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Siegen besteht heute aus den drei Lehrstühlen „Abwasser- und Abfalltechnik“, „Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau“ sowie „Wasserwirtschaftliche Risikobewertung und Klimafolgenforschung“. Das Ziel der Abteilung „Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau“, geleitet von Professor Jensen, ist es, die Kompetenz der verschiedenen Fachgebiete Binnenwasserbau, Küstenwasserbau, Hochwasserschutzkonzepte, statistische Analysen und Wasserkraft zu vereinen und vorhandene Ressourcen für fächerübergreifende Fragestellungen im Bereich Wasser und Umwelt in Forschung und Praxis effektiv zu nutzen. Dies wird unter anderem durch die enge Zusammenarbeit mit zahlreichen nationalen und internationalen Kooperationspartnern unterstützt. Im Bereich der Klimafolgenforschung werden verschiedene Vorhaben zum Thema „Wasserstandsentwicklung an der Deutschen Nord- und Ostseeküste“ sowie zum Thema „Hochwasserschutz“ sowohl im Binnen- als auch im Küstenbereich bearbeitet. Die Forschung der Abteilung „Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau“ ist dabei von der Historie auf hydrologische und wasserbauliche Systemanalysen sowie Flussgebiets- und Küstenzonenmanagement gerichtet. Angewendet werden dabei sowohl Techniken des klassischen Wasserbaus bzw. Gewässerausbau als auch numerische und physikalische Modellverfahren der Hydraulik und Hydrologie.

### Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)

Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG) ist eines von 18 Mitgliedern der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.



Das HZG hat seinen Sitz in Geesthacht bei Hamburg und verfügt über Niederlassungen in Teltow bei Berlin und in Hamburg mit insgesamt rund 850 Mitarbeitern, darunter etwa 600 Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker. Das HZG umfasst 3 Forschungsinstitute, darunter das Institut für Küstenforschung (IfK) mit dem Schwerpunkt Umweltforschung in marinen, küstennahen und polaren Systemen und das Deutsche Klimaservicezentrum, eine vom Bund geförderte Einrichtung, die die neuesten Ergebnisse der weltweiten Klima- und Umweltforschung zusammenfasst, um den Akteuren in Deutschland und darüber hinaus konkrete Informationen zur Verfügung zu stellen. Das HZG verfügt über jahrelange Erfahrung und pflegt eine erfolgreiche Tradition in der Koordination und Beteiligung an verschiedenen Arten von national oder EU-geförderten Projekten. Seit dem Jahr 2000 haben die Forscher des HZG etwa 35 Projekte koordiniert und an mehr als 110 EU-Projekten teilgenommen, die von der Europäischen Kommission über Schwerpunktprogramme kofinanziert wurden.

*Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)*

Die NLWKN-Forschungsstelle Küste (FSK) ist eine landeseigene Forschungseinrichtung und Teil der niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung. Sie ist als wissenschaftliche Einheit von vier Abteilungen (Küstenmorphologie, Küsteningenieurwesen, Vermessung und Sturmflutwarndienst) innerhalb des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft, Küstenschutz und Naturschutz (NLWKN) organisiert und beschäftigt eine Vielzahl von interdisziplinären Wissenschaftlern, die von Naturwissenschaften wie Geologie, Ökologie, Geographie bis hin zu Küsten- und Umweltingenieuren reichen. Die FSK strebt aus mehreren Gründen Förderungen im Rahmen von Forschungsprojekten an, z. B. um die notwendige wissenschaftliche Kompetenz zu erhalten und kontinuierlich auszubauen oder um neue wissenschaftliche Methoden auf ihre Anwendbarkeit in den Verwaltungsaufgaben zu evaluieren und zu implementieren. Das Aufgabengebiet umfasst die gesamte niedersächsische Küste. Die FSK erbringt zentrale Dienstleistungen für den niedersächsischen Küstenschutz wie die Ermittlung und fortlaufende Bemessung niedersächsischer Küstenschutzmaßnahmen sowie die kontinuierliche Weiterentwicklung des deterministischen niedersächsischen Ansatzes der Ermittlung von Bemessungswasserständen, der u.a. Annahmen über den zukünftigen Meeresspiegelanstieg beinhaltet. Die FSK erstellt die entsprechenden natur- und ingenieurwissenschaftlichen Gutachten für die hoheitliche Festlegung des niedersächsischen Deichbesticks. Letztere Punkte machen die FSK auch im Hinblick auf die transdisziplinäre Wissensgenerierung und Beteiligung zu einem interessanten Partner in diesem Projekt.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliederte sich in drei Teilprojekte mit jeweiliger Unterteilung in verschiedene Arbeitspakete. Die drei am Verbundvorhaben ALADYN beteiligten Teilprojekte befassten sich mit der statistischen Analyse beobachteter Veränderungen (ALADYN-A), der modellbasierten Untersuchung möglicher großskaliger Einflüsse (ALADYN-B) sowie der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Ästuaren und der offenen See (ALADYN-C). Insgesamt waren drei Forschungsinstitutionen der Universität Siegen, des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz an dem Verbundprojekt beteiligt.

#### Arbeitspakete ALADYN-A (Zuständigkeit: Universität Siegen, fwu)

Im ersten Arbeitspaket WP A.1 „Observed changes of the mean tidal range (MTR) in the North Sea“ wurden die beobachteten Änderungen des mittleren Tidehubs (MThb) sowie der mittleren Tidewasserstände (MTnw und MThw) in der Deutschen Bucht untersucht. Veränderungen der Tideparameter wurden unter Verwendung verfügbarer Wasserstandsdatensätze analysiert. Das Gesamtziel des WP A.1 war die Quantifizierung von Veränderungen der Tidewasserstände und des MThb, sowie des Zeitraums, in dem diese initiiert wurden. Erst nachdem bekannt war, wie sich die Tidedynamik insgesamt verändert hat, war es möglich die Auswirkungen großräumiger und lokaler Effekte zu beschreiben. Dazu wurden lineare und nichtlineare Trendanalysen verwendet und um weiterführend gemeinsame Entwicklungen und räumliche Muster zu detektieren.

Innerhalb des zweiten Arbeitspakets WP A.2 „Changes in the main tidal constituents“ wurde untersucht, wie das Gezeitenregime der Deutschen Bucht durch übergeordnete Systeme wie bspw. den Nordatlantik beeinflusst wird. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, den Einfluss solcher übergeordneten und großräumigeren Einflüsse auf die Beobachtungszeitreihen zu beschreiben. Die Grundidee dieses WPs war es, (zumindest teilweise) Erklärungen zu den ungewöhnlichen Veränderungen der MThb an einzelnen Stationen in der Nordsee abzuleiten und gemeinsamen Entwicklungen der Pegelstandorte herauszuarbeiten.

Im Rahmen des dritten WP A.3 „Impact of SLR on tidal dynamics“ wurden die Auswirkungen des SLR auf die Tidedynamik, insbesondere auf das MThb, untersucht. Daher wurden alle verfügbaren veröffentlichten Forschungsarbeiten zu diesem speziellen Thema mit besonderem Schwerpunkt auf der Nordsee gesammelt und ausgewertet. In einem nächsten Schritt wurde die Reaktion des im letzten Jahrhundert beobachteten MThb auf den Meeresspiegelanstieg mit Hilfe eines bestehenden numerischen Modells der Nordsee bewertet (siehe Arns et al., 2015).

Mit dem vierten Arbeitspaket WP A.4 „Small scale effects in the North Sea“ wurden lokale Effekte in der Nordsee untersucht. Zugrunde lag die Frage, wie sich historische Baumaßnahmen auf die Gezeitendynamik auswirken. Zur Untersuchung wurden alle relevanten Baumaßnahmen entlang der Deutschen Bucht der letzten ~50 Jahre zusammengestellt (vgl.

Lehmann, 2018). Gleichzeitig wurden statistische Methoden zur Erkennung von Bruchpunkten in Zeitreihen angewendet und verbessert. Dieser Schritt baute auf den Arbeiten von Dangendorf und Jensen (2011) auf. Dieser Teil des WPs dient der Erkennung von Unstetigkeiten und ermöglichte es, festgestellte unetige Veränderungen bekannten Baumaßnahmen zuzuordnen und deren Einfluss auf die Tideparameter zu qualifizieren.

#### Arbeitspakete ALADYN-B (Zuständigkeit: HZG)

Im ersten Arbeitspaket WP B.1 „Influence of large-scale tidal dynamics“ wurden die Analysen des WP A.2 durch entsprechende numerische Modellstudien ergänzt. Ziel der Arbeiten in diesem Arbeitspaket war es zu untersuchen, inwieweit die in der Deutschen Bucht beobachteten Veränderungen der Tidedynamik auf entsprechende Veränderungen am Rande der Nordsee und damit auf großräumige Signale im Nordatlantik zurückzuführen sind. Dazu wurden zunächst Veränderungen in Tideparametern an Pegeln an den Modellgrenzen berücksichtigt werden (z. B. aus Aberdeen, siehe Weisse und Plüß, 2006) analysiert. In WP B.1 wurde ein hochauflösendes Modell verwendet, das die gesamte Nordsee abdeckt. Es wurden Analysen des Modelloutputs insbesondere entlang der deutschen Küstenlinie durchgeführt und Beiträge von großräumigen Veränderungen der Gezeitendynamik bis hin zu beobachteten Veränderungen (Variabilität und Trend) in der Deutschen Bucht beschrieben.

Das zweiten Arbeitspaket WP B.2 „Impact wind climate on tidal dynamics“ umfasste die Untersuchung des Einflusses des Windklimas auf die auf die beobachteten Veränderungen des MThb. Langfristige Variabilität und Veränderungen des Windklimas können sich auf die Nordseezirkulation und den regionalen Meeresspiegel auswirken. Aufgrund der nicht-linearen Wechselwirkung zwischen mittlerem Meeresspiegel und Gezeitendynamik, können Änderungen des Windklimas daher indirekt zu den beobachteten Änderungen der Gezeitendynamik beigetragen haben. Ziel von WP B.2 war es, zu beurteilen, ob diese Auswirkungen relevant sind oder nicht. Es wurde der folgende zweistufige Ansatz gewählt: Zunächst wurde das coastDat-Modell Hindcast verwendet, um die Auswirkungen der beobachteten atmosphärischen Veränderungen auf die Gezeitendynamik abzuschätzen. Anschließend wurde mit Hilfe der in Albrecht und Weisse (2012) beschriebenen Methoden ein statistisches Modell erstellt, das die Abhängigkeit zwischen der großräumigen atmosphärischen Zirkulation und den Tideparametern beschreibt. Letzteres wurde verwendet, um windklimabedingte Veränderungen der Gezeitendynamik zu bewerten.

Großräumige Auswirkungen in der Nordsee wurden im Arbeitspaket WP B.3 „Large scale effects in the North Sea“ untersucht. Einer der Hauptaspekte war die Untersuchung von Veränderungen der zugrundeliegenden Bathymetrie, da dies einen großen Einfluss auf die Tidedynamik hat. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurden großräumige Effekte in der Nordsee untersucht. Unter Verwendung desselben Modells wie in WP B.1 wurde eine Sensitivitätsanalyse der großräumigen bathymetrischen Veränderungen auf die Tidedynamik

durchgeführt. Dabei wurden verschiedene historische Bathymetrien verwendet, die großräumige Veränderungen, wie z. B. Veränderungen in den äußeren Ästuaren oder im Wattenmeer, berücksichtigten.

Für einige der größeren Baumaßnahmen (z. B. Eindeichungen), die in der jüngeren Vergangenheit durchgeführt wurden, wurden im Arbeitspaket WP B.4 „Effects of larger construction measures“ zusätzliche Simulationen mit einer sehr hohen Auflösung Modells aus WP B.1 durchgeführt. Die Simulationen wurden mit Hilfe von Bathymetrien vor und nach der Umsetzung durchgeführt. Dies half bei der Quantifizierung der Auswirkungen auf das Gezeitenregime auf lokaler und regionaler Ebene und ermöglichte eine qualitative Bewertung der Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen.

#### Arbeitspakete ALADYN-C (Zuständigkeit: NLWKN)

Die stärksten lokalen Auswirkungen anthropogener Maßnahmen sind in den Ästuaren zu beobachten. ALADYN-C konzentrierte sich daher im Arbeitspaket WP C.1 „Effects of estuarine changes“ auf eine numerische Modellstudie zu MThb-Veränderungen in der Nordsee, die durch anthropogene Eingriffe in Ästuaren (hier am Beispiel der Ems und Weser) hervorgerufen wurden. Als Folge von Vertiefungen, Begradigungen und anderen baulichen Maßnahmen im vergangenen Jahrhundert haben der MThb und die Tidevolumina der Ästuar deutlich zugenommen. Auch die angrenzenden Wattenzugsgebiete veränderten sich durch die Baumaßnahmen innerhalb der Ästuar sowie durch zusätzliche Eindeichungen. Auf der Grundlage von Rekonstruktionen historischer morphologischer Zustände (u. a. Homeier et al., 2010) wurde im Arbeitspaket qualitativ und quantitativ abgeschätzt, inwieweit die Auswirkungen der Ästuarveränderungen die Tidedynamik im Küstenvorfeld beeinflussen. Dazu wurden modellbasierte Analysen auf Grundlage eines unstrukturierten HN-Modellsystems durchgeführt, welches auf solche skalenübergreifenden Anwendungen zugeschnitten ist (Zhang et al., 2016). Der Ansatz überwindet mehrere Einschränkungen früherer Untersuchungen, wie z. B. einseitig verschachtelte Modellkaskaden und die Schwierigkeit, unterschiedliche Diskretisierungsgrade von inneren Ästuaren und der offenen Nordsee zu kombinieren. Im Arbeitspaket wurde auch der Einfluss von Landsenkungen infolge von Gasförderung einbezogen. Das Modell wurde mit dem großmaßstäblichen Modell des WP B.1 durch den Austausch von Randwerten verknüpft.

Im Rahmen des Projekts ALADYN wurden zur Erreichung der Ziele sowohl regelmäßige Projekttreffen mit allen Projektpartnern und der projektbegleitenden Gruppe als auch ein Austausch mit der Praxis und anderen Forschungsinstitutionen durchgeführt. Alle durchgeführten Treffen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 1: Projekttreffen um Rahmen des Verbundprojekts ALADYN und Teilnahme an nationalen und internationalen Fachkonferenzen.

<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Anlass</b>	<b>Teilnehmer</b>
09.11.2016	Hamburg	1. Projektgruppensitzung (Kick-Off Meeting)	Alle Projektpartner
18.05.2017	Hannover	2. Projektgruppensitzung	Alle Projektpartner
09.11.2017	-	3. Projektgruppensitzung per Skype	Alle Projektpartner
22.11.2017	Hamburg	22. KfKI-Seminar 2017	Alle Projektpartner
09.01.2018	Hamburg	1. Sitzung mit der Projektbegleitenden Gruppe	Alle Projektpartner
22.02.2018	Hamburg	Projekttreffen zu Meilenstein M10: Abgleich der Modellsteuerung zwischen WP B.3 und WP C.1	HZG/NLWKN
07.08.2018	-	4. Projektgruppensitzung per Skype	Alle Projektpartner
28./29.08.2018	Hannover	KüNO-Jahrestagung 2018	Alle Projektpartner
11. bis 14.09.2018	Hamburg	17th IMUM Workshop	NLWKN
16.10.2018	Hamburg	2. Sitzung mit der Projektbegleitenden Gruppe	Alle Projektpartner
17. bis 19.10.2018	Hamburg	Internationaler ALADYN-Workshop	Alle Projektpartner
05.12.2018	Hamburg	23. KfKI-Seminar 2018	Alle Projektpartner
21.11.2018	Geesthacht	Projekttreffen zu Meilenstein M11: Abgleich der Modellsteuerung zwischen WP B.4 und WP C.1	HZG/NLWKN
02.04.2019	Hamburg	3. Sitzung mit der Projektbegleitenden Gruppe	Alle Projektpartner
07. bis 12.04.2019	Wien, Österreich	European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2019	Universität Siegen
01. bis 06.09.2019	Panama City, Panama	38th IAHR World Congress	NLWKN

30.10.2019	Hamburg	KüNO II Abschlusstagung	Alle Projektpartner
21.11.2019	Hamburg	24. KfKI-Seminar 2019	Alle Projektpartner

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde, ist auf die detaillierten Fachberichte im Anhang, den Zwischenberichten I-III der Projektpartner und in den aus dem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichungen dargestellt.

#### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Grundlage für eine erfolgreiche Projektdurchführung war eine enge Zusammenarbeit aller am Vorhaben beteiligter Verbundpartner. Hierzu kamen neben der Durchführung der halbjährlichen Projekttreffen eine Vielzahl von Arbeitstreffen innerhalb der einzelnen Arbeitspakete. Neben den planmäßigen projektinternen Treffen aller Verbundpartner fanden in der Projektlaufzeit regelmäßige Projekttreffen statt, zu dem auch die Vertreter der projektbegleitenden Gruppe eingeladen waren, um in einer Beraterfunktion dem unmittelbaren Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis beizutragen.

Desweiteren wurde kooperierten die Verbundpartner mit der Schleswig-Holsteinischen Landesanstalt für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN-SH), die erforderlichen Datensätze und Informationsgrundlagen zu historischen Baumaßnahmen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste verarbeitete und lieferte. Die Bearbeitung umfasste dabei u. a. die Digitalisierung historischer Tiefenpläne, die nur in Papierform vorlagen.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Für eine ausführliche Darstellung der im einzelnen erlangten Ergebnisse sei auf die detaillierten Fachberichte im Anhang verwiesen. Im Folgenden findet sich eine stark verkürzte Darstellung der erlangten Ergebnisse.

### 2.2 Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste (ALADYN-A, WP A.1–A.4, fwu)

Entlang der deutschen Nordseeküste ist es seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu großen 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 Trends über das gesamte Untersuchungsgebiet. Diese inhomogene Entwicklung des MTnw liefert ein erstes Indiz für die Beeinflussung des Tidegeschehens durch lokale Effekte. Demnach scheinen die abgeleiteten Veränderungen der Tidewasserstände im Untersuchungsgebiet sowohl eine gemeinsame Entwicklung durch großräumige Einwirkungen als auch eine lokale Komponente zu enthalten. Diese lokalen Komponenten können z. B. durch bauliche Maßnahmen und lokale morphologischen Entwicklungen verursacht werden. Die entwickelte Methodik der Kombination verschiedener statistischer Verfahren ermöglicht es, diese beiden genannten Komponenten an jedem beliebigen Pegelstandort in der Deutschen Bucht zu trennen. Die zugrunde gelegte Annahme 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 gleichzeitig auch unter dem Einfluss kleinräumiger und lokaler Effekten stehen.

Einer der wesentlichen Schritte zur Separierung der klein- und großräumigen Signale ist die sog. Hauptkomponentenanalyse (PCA). Es wurde davon ausgegangen, dass die erste Hauptkomponente (PC), die den Großteil der Varianz im Untersuchungsgebiet beschreibt, somit auch die gemeinsamen Entwicklungen abbildet. Demzufolge entsprechen alle weiteren, in den höheren Hauptkomponenten enthaltenen Veränderungen den lokalen Signalen. Rund 90 % der Varianz wird im Untersuchungsgebiet im Fall der MThw- und MThb-Zeitreihen durch die erste PC abgebildet, wohingegen das MTnw nur zu 70 % durch PC1 repräsentiert wird. Dies bedeutet, dass MThw und MThb stärker von großräumigen Einflüssen geprägt werden. Zudem weisen die MTnw räumlich variierende erklärte Varianzen der niedrigeren PC auf. Regionale Entwicklungen und räumlich begrenzte Systemveränderungen bilden sich also in den höheren PCs aus. Für jeden Pegelstandort lässt sich also über

eine Rekonstruktion mit der ersten Hauptkomponente zum einen das gemeinsame Signal ermitteln und zum anderen über Differenzenbildung aus der Zeitreihen eliminieren.

Nachdem das gemeinsame Signal aus jeder Aufzeichnungszeitreihe separiert wurde, wurden die lokalen Effekte über die Differenzenzeitreihen untersucht. Mithilfe einer Bruchpunktanalyse lassen sich un stetige Veränderungen in den Tidekennwerten detektieren. Angewendet wurde die Bruchpunktanalyse auf die jeweils ermittelten Differenzen zwischen Beobachtungszeitreihen und dem gemeinsamen Signal an den einzelnen Pegelstandorten. Im Weiteren wurden die linearen Trends der Teilzeitreihen betrachtet, die sich durch die detektierten Bruchpunkte ergeben. Dadurch lässt sich wiederum die Entwicklung vor und nach einem Bruchpunkt vergleichen. Durch die zeitliche und räumliche Zuordnung der un stetigen Änderungen können für die Bruchpunkte potentielle Ursachen gefunden werden. Mithilfe der resultierenden Änderung durch einen Bruchpunkt, lassen sich die zugeordneten Ursachen plausibilisieren und 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 Effekte wie bspw. von Baumaßnahmen beschreiben. Im untersuchten Gebiet jedoch konnten durch eine solche Betrachtung für keinen der drei Tideparameter ein räumliches Muster oder zusammenhängende Bruchpunkte identifiziert werden. Demzufolge scheint die Wirkung von Baumaßnahmen lokal begrenzt zu sein. An vielen Pegelstandorten konnte jedoch gezeigt werden, dass sich durch die Methodik Auswirkungen von Baumaßnahmen feststellen lassen, die zudem physikalisch plausibel erscheinen. Die Methodik wird daher als geeignet erachtet, großräumige bzw. gemeinsame Signale in Wasserstandsaufzeichnungen zu separieren und die Tideparameter hinsichtlich einzelner lokalen Effekte zu untersuchen.

Mit dem entwickelten Verfahren konnten verschiedene Baumaßnahmen bzw. deren Auswirkungen in den Beobachtungszeitreihen detektiert werden. Ausbaumaßnahmen und Vertiefungen von Gewässerabschnitten der drei großen Nordseeästuarie wurden als un stetige Veränderung, vorwiegend aber nicht ausschließlich im MTnw, sichtbar. So sorgte die Vertiefung des Emdener Fahrwassers zwischen 1952 und 1972 wahrscheinlich für Bruchpunkte an den Pegeln Borkum Südstrand und Emden, der Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998/99 für Bruchpunkte an den Pegeln Mellumplate und Bremerhaven und die Elbvertiefung im Zeitraum von 1974 bis 1978 scheint sich als un stetige Veränderung von MTnw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft zu zeigen. Auch die Eindeichungsmaßnahmen der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978 lassen sich sehr deutlich im MThb des Pegels Büsum erkennen und spiegeln sich in ansteigenden MTnw und stagnierenden MThw wieder. Zudem konnten Hafenumbaumaßnahmen wie am Pegel Delfzijl, sichtbar durch einen Bruchpunkt gegen Ende der 1970er, in den Aufzeichnungen detektiert werden. Außerdem scheint die Methode geeignet zu sein, einen Pegelversatz in den Zeitreihen der Tidekennwerte zu entdecken. So lässt sich vermutlich die Umstellung des Pegels Norderney Hafen auf Norderney Riffgat in den 1960er Jahren und am Pegel Esbjerg Havn eine plötzliche Erhöhung von MTnw und MThw um einige Zentimeter aufgrund einer Neuinstallation des Pegels feststellen. An einigen Pegeln wie bspw. Helgoland Binnenhafen und Dabgebüll

wurden ebenfalls ein bzw. zwei Bruchpunkte detektiert die jedoch keiner Baumaßnahme bzw. einem lokalen Effekt zugeordnet werden können. Dies jedoch muss jedoch nicht zwingend auf einen Fehler im Verfahren hinweisen, sondern auch mangelhafte Informationsgrundlagen zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen macht es nicht möglich, allen kleinräumigen Änderungen Ursachen zuzuordnen. Auch andere Ursachen sind nicht auszuschließen, die im Rahmen dieser Studie nicht adressiert wurden, wie kleinräumige und nicht als Bruchpunkte detektierbare Änderungen. Dazu können bspw. morphologische Prozesse zählen und Entwicklungen, deren Kipppunkt (noch) nicht erreicht ist. Insbesondere in solch komplexen System wie die Nordsee kann nicht davon ausgegangen werden, dass kontinuierliche Änderungen von groß- und kleinräumigen Randbedingungen auch immer allmähliche Systemreaktion verursachen. Wie auch bei dem Prinzip der Kipppunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al., 2008) sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung nicht immer konstant und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen.

### 2.3 Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss großräumiger Faktoren auf die Tidedynamik in der Deutschen Bucht (ALADYN-B, WP B.1–B.4, HZG)

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 großräumig in der Vergangenheit 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.

## 2.4 Wechselwirkungen zwischen Ästuar und Küstenvorfeld (ALADYN-C, WP C.1, 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 lokal begrenzten 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. Letzterer Punkt minimiert das Risiko von Randeinflüssen auf die Modellergebnisse und ermöglicht eine physikalisch konsistente Ausbreitung der Tidedynamik im gesamten Modellgebiet ohne Informationsverlust an anderenfalls 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 Tidekennwerten 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 & Niemeyer, 2007), andererseits wurden weitere Rekonstruktionen durch umfangreiche manuelle Digitalisierung angefertigt.

Darüber hinaus wurde entsprechend 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 lokale 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 und den beobachteten langzeitlichen Trends. Dies liefert einen neuen und relevanten Beitrag zur Interpretation dieser Daten hinsichtlich Veränderungen des mittleren Meeresspiegels sowie klimabedingter Einflussfaktoren.

## 2.5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird für jedes Vorhaben separat übermittelt.

## 2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Entlang der deutschen Nordseeküste wurden in den vergangenen Jahrzehnten zum Teil erhebliche bemessungsrelevante Veränderungen in der Tidedynamik beobachtet. Durch die Kooperation der am Projekt ALADYN beteiligten Partner wurde erstmalig eine integrative Betrachtungsweise dieser Änderungen ermöglicht, bei der Expertise aus dem Küsteningenieurwesen, der Ozeanographie und der Klimatologie beteiligt war, um mit Hilfe numerischer Simulationen und statistischer Analysen systematisch mögliche Einflüsse sowohl großskaliger als auch kleinskaliger Faktoren auf die Veränderung des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht zu untersuchen.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt ALADYN sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

Wie im Anhang dieses Schlussberichtes (Fachbericht) und im zahlenmäßigen Nachweis aufgeschlüsselt, wurden die Arbeiten und die finanziellen Mittel entsprechend der Arbeitspakete und an den im Verlauf des Projektes erhaltenen Ergebnissen ausgerichtet.

## 2.7 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des ALADYN-Projektes wurden und werden auf Konferenzen und in Veröffentlichungen dargestellt. Die genaue Auflistung der Veröffentlichungen kann Kapitel 2.9 entnommen werden.

## 2.8 Fortschritt bei anderen Stellen

Zu dem untersuchten Thema wurden im Rahmen der Bearbeitung sowie des wissenschaftlichen Austausches mit nationalen und internationalen Forschern sowohl im Bereich Küsteningenieurwesen als auch zutreffender weiterer Forschungsgebiete wie Ozeanographie bzw. der Geowissenschaften allgemein aktuelle Veröffentlichungen verfolgt, Konferenzen besucht sowie weiterer Informationsrecherchen durchgeführt.

Es sind keine Hinweise bekannt, die einzelne Bearbeitungsschritte und Ziele des Forschungsprojektes obsolet machen.

## 2.9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Für die fachlichen Schlussberichte (in gekürzter Form) (s. Anlage) wird eine Veröffentlichung in *Die Küste*, eine Schriftenreihe herausgegeben durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI), angestrebt. Hierzu werden die Manuskripte nach Übersendung des Schlussberichts eingereicht und durchlaufen dann einen Begutachtungsprozess. Darüber hinaus wurden Teilergebnisse des ALADYN-Projekts bereits zahlreich in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt. Eine Übersicht hierzu findet sich im Folgenden.

### 2017

ARNS, A., DANGENDORF, S., JENSEN, J., TALKE, S., BENDER, J. & PATTIARATCHI, C.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Nature Scientific Reports* 7.

JENSEN, J.; ARNS, A.; VOLLMER, D.: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight. ALADYN. KüNO Jahrestagung 2017. Rostock, 10.11.2017.

VOLLMER, D. E.; ARNS, A.; JENSEN, J.: Analyse der beobachteten Tidedynamik. ALADYN-Projektteil A. KüNO Jahrestagung 2017. Rostock, 10.11.2017.

YI, X., MEYER, E., WEISSE, R.: North Sea response to the impact of large-scale tidal dynamics. 1st International Workshop on Waves, Storm Surges and Coastal Hazards. Liverpool, UK, 10-15 Sep. 2017. Poster presentation.

### 2018

ARNS, A., DANGENDORF, S.; EBENER, A. & JÄNICKE, L.: Analyse Der Beobachteten Tidedynamik in der Nordsee (ALADYN), Überblick über den Stand des Projektes und die Ergebnisse des internationalen ALADYN-Workshops; 23. KfKI Seminar 2018; Hamburg; Dezember 2018.

EBENER, A.; ARNS, A.; HIRT, M. & JENSEN, J.: Changes of mean tidal range in the south-eastern North Sea. ALADYN-Workshop 2018. Hamburg, 17.10.2018.

HUBERT, K.: Der Gezeitendynamik auf der Spur – das Forschungsvorhaben ALADYN. In: Nachrichten des Marschenrates zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee. Heft 55/2018. Marschenrat zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee e.V., Wilhelmshaven 2018. ISSN 0931-5373.

HUBERT, K.: Influence of estuarine and coastal morphology on tidal characteristics of adjacent coastal waters (ALADYN-C). 17th International workshop on Multi-scale (un)-structured mesh numerical Modeling for coastal, shelf, and global ocean dynamics, 11-14 September 2018, Hamburg.

HUBERT, K.: Influence of estuarine and coastal morphology on tidal characteristics of adjacent coastal waters. ALADYN workshop, Hamburg, 17-19 Oktober 2018, Hamburg.

JÄNICKE, L.; DANGENDORF, S.; ARNS, A. & JENSEN, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea. ALADYN-Workshop 2018. Hamburg, 17.10.2018.

- JÄNICKE, L.; DANGENDORF, S. & JENSEN, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea. CoastDoc 2018. TU Braunschweig, Germany, 27.09.2018
- WURPTS, A.: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight. KüNO Jahrestagung, 28 August 2018, Hannover.
- YI, X., MEYER, E. & WEISSE, R.: Assessing changes in large-scale factors potentially influencing tidal ranges in the German Bight. ALADYN workshop, Hamburg, 17-19 Oct. 2018.

## 2019

- ARNS, A.; EBENER, A.; JÄNICKE, J.; DANGENDORF, S. & JENSEN, J.: Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee. ALADYN-A. KFKI-Seminar. Hamburg, 2019.
- ARNS, A.; JÄNICKE, L.; EBENER, A.; DANGENDORF, S. & JENSEN, J.: Veränderungen der Tidedynamik in der Nordsee und deren Ursachen. KüNO Jahrestagung 2019. Hamburg 2019.
- EBENER, A.; JÄNICKE, L.; ARNS, A.; DANGENDORF, S. & JENSEN, J.: Analyzing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight. An approach to identify and quantify changes caused by local system changes. CoastDoc 2019. Aachen, 2019.
- EBENER, A.; JÄNICKE, L.; ARNS, A.; DANGENDORF, S. & JENSEN, J.: Analyzing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight. European Geoscience Union General Assembly 2019. Wien, Österreich, 07.04.2019.
- HUBERT, K.: Der Einfluss morphologischer Veränderungen auf die Gezeitendynamik. In: Nachrichten des Marschenrates zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee. Heft 56/2019. Marschenrat zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee e.V., Wilhelmshaven 2019. ISSN 0931-5373.
- HUBERT, K.; WURPTS, A. & BERKENBRINK, C.: Modelling the Impact of Estuarine and Coastal Morphological Changes on Tidal Dynamics in the German Bight. E-proceedings of the 38th IAHR World Congress September 1-6, 2019, Panama City, Panama.
- JÄNICKE, L.; DANGENDORF, S.; ARNS, A.; HAIGH, I. D.; WOODWORTH, P. L. & JENSEN, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea and the North Atlantik. European Geosciences Union General Assembly 2019. Wien, 2019.
- WURPTS, A.: ALADYN-C: Wechselwirkungen zwischen den Ästuaren und der Nordsee. 24. KFKI-Seminar, 21. November 2019, Hamburg.
- YI, X., GASLIKOVA, L., MEYER, E. & WEISSE, R.: Assessing potential factors influencing tidal ranges in the German Bight. 27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8-18 Jul. 2019, poster presentation.

**2020**

ARNS, A.; BERKENBRINK, C.; DANGENDORF, S.; EBENER, A.; HUBERT, K.; JÄNICKE, L.; JENSEN, J.; WEISSE, R.; WURPTS, A. & YI, X.: Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee (ALADYN). Ein Übersichtsartikel der Teilprojekte ALADYN-A bis ALADYN-C. In: Die Küste. In Bearbeitung.

EBENER, A.; ARNS, A.; JÄNICKE, L.; DANGENDORF, S. & JENSEN, J.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste - Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen (ALADYN-A). In: Die Küste; eingereicht.

GASLIKOVA, L.; HUBERT, K.; GRABEMANN, I.; WURPTS, A.; WEISSE, R.: Influence of bathymetry on German Bight tidal dynamics. In Bearbeitung.

HUBERT, K.: Wie lokale Baumaßnahmen großräumige Veränderungen der Hydrodynamik hervorrufen können. In: Nachrichten des Marschenrates zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee. Heft 57/2020. Marschenrat zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee e.V., Wilhelmshaven 2020. ISSN 0931-5373

HUBERT, K.; WURPTS, A. & BERKENBRINK, C.: Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics (ALADYN-C). In: Die Küste, in Begutachtung.

JÄNICKE, L.; EBENER, A.; DANGENDORF, S.; ARNS, A.; NIEHÜSER, S.; HAIGH, I.; WOODWORTH, P. & JENSEN, J.: Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea. In Bearbeitung.

YI, X.; GASLIKOVA, L.; WEISSE, R.: German Bight tidal dynamics in response to large-scale effects. In Bearbeitung.

(Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen)

(Dr.-Ing. Arne Arns)

(Andra Ebener, M.Sc.)

## Literaturverzeichnis

- Albrecht, F. & Weisse, R. (2012): Wind and pressure effects on past regional sea level trends and variability in the German Bight. *Ocean Dynamics* 2012.
- Arns, A., Wahl, T. & Jensen, J. (2015): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight, *Coastal Engineering*.
- Dangendorf, S. & Jensen, J. (2011): Untersuchungen zur Detektion von Instationaritäten in küstenhydrologischen Zeitreihen, Proc. des 1. Doktorandenseminars CoastDoc, In: Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt, Heft 2.
- Elsebach, J.; Kaiser, R. & Niemeyer, H. D. (2007): Identifikation von erheblich veränderten Gewässerbereichen in der Tideweser. Untersuchungsbericht der NLWKN Forschungsstelle Küste 05/2007, Norderney (unveröffentlicht).
- Herrling, G. & Niemeyer, H. D. (2007): 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. (2010). Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste, Berichte der Forschungsstelle Küste, Band 43/2010, Norderney.
- Jensen, J., Mügge, H. E. & Schönfeld, W. (1992): Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht, *Die Küste*, 52.
- Jensen, J. & Mudersbach, C. (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten, in: Glaser, R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H., Wardenga, U. (Hrsg.): Berichte zur Landeskunde. Themenheft: Küstenszenarien, Band 81, Heft 2, 99-112, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig.
- Lehmann, C. (2018): 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. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system; *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (6), pp. 1786-1793; <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>.
- Weisse, R. & Plüß, A. (2006): Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958-2002. *Ocean Dynamics*, 56(1).
- Zhang, Y.; Ye, F.; Stanev, E.V. & Grashorn, S. (2016): Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*, 102, 64-81, 2016.

---

## ANHANG

### FACHBERICHTE

(ungekürzte Fachberichte, wurden in gekürzter Form zur Veröffentlichung  
in der Schriftenreihe *Die Küste* eingereicht



# ALADYN-A: Analyses of observed tidal dynamics

## Fachlicher Abschlussbericht

Gefördert durch:

Bundesministerium für Bildung  
und Forschung (BMBF)



Förderkennzeichen:

03F0756A

Projektlaufzeit:

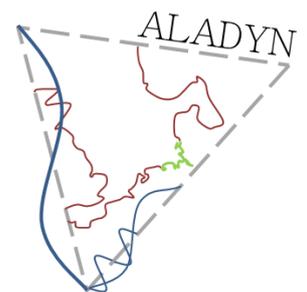
10/2016 – 09/2019

Projektnummer des AN:

WBL 293D

Aufgestellt von:

Andra Ebener, M.Sc.  
Dr.-Ing. Arne Arns  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen  
Leon Jänicke, M.Sc.



Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)  
der Universität Siegen

Siegen, den 31.03.2020



Kontakt:

Universität Siegen  
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)  
Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Paul-Bonatz-Straße 9-11

57076 Siegen

Fon: +49 (0)271 740 2172

Fax: +49 (0)271 740 2722

E-Mail: [juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)

Web: [www.fwu.uni-siegen.de](http://www.fwu.uni-siegen.de)



Prof. Dr.-Ing. J. Jensen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen

# Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste

Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen

*Andra Ebener, Arne Arns, Leon Jänicke, Sönke Dangendorf und Jürgen Jensen*

## Zusammenfassung

Die Tidedynamik und die -wasserstände an der Deutschen Nordseeküste haben sich seit der Mitte des 20. Jahrhunderts verändert. Sowohl großräumige Einwirkungen (z. B. Klimaänderungen und Meeresspiegelanstieg) als auch kleinräumige Effekte (z. B. natürliche morphologische Prozesse und anthropogene Einflüsse) haben zu diesen Entwicklungen beigetragen. Um die Ursachen und deren Beitrag zu den beobachteten Änderungen besser verstehen zu können, wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, gemeinsame Anteile in den Zeitreihen aufgrund von großräumigen Einflüssen aus den Beobachtungsdaten zu separieren. Durch die Kombination verschiedener statistischer Verfahren werden aus den Aufzeichnungen der Tidekennwerte MT<sub>nw</sub>, MTh<sub>w</sub> und MTh<sub>b</sub> Zeitreihen generiert, die ausschließlich Änderungen aufgrund von lokalen Einwirkungen enthalten. Die detaillierte Analyse dieser lokalen Signale hinsichtlich unsteuiger Veränderungen (Bruchpunkte) ermöglicht es anschließend, kleinräumige anthropogene Maßnahmen einzelnen festgestellten Veränderungen zuzuordnen und deren Einfluss abzuschätzen. Zur Beurteilung des Einflusses werden die Veränderungen vor und nach einem festgestellten Bruchpunkt untersucht. Für diese Untersuchung wurden Tidewasserstandzeitreihen von insgesamt 21 Tidepegelstandorten mit Schwerpunkt im Bereich der Deutschen Bucht, der niederländischen und der dänischen Küste verwendet. In diesem Bericht wird die kombinierte Anwendung von Trend-, Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalysen für die Separierung von gemeinsamen Entwicklungen und die Abschätzung des Beitrags von lokalen Systemänderungen ausführlich erläutert. Anhand der detaillierten Auswertung aller verwendeter Pegelstandorte werden Möglichkeiten, Grenzen und Deutung der Ergebnisse erläutert.

## Schlagwörter

Bruchpunktanalyse, Deutsche Bucht, Hauptkomponentenanalyse, lokale Effekte, Nordsee, Scheitelwasserstände, Tidedynamik, Tidehub, Tideregime, Tidewasserstände, Zeitreihenanalyse

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	9
2	Grundlagen und Datenbasis .....	11
2.1	Untersuchungsgebiet und verwendete Pegel .....	11
2.2	Verfügbare Datensätze und Datenaufbereitung .....	12
3	Einflussfaktoren von Tideänderungen .....	13
3.1	Antreibende Faktoren lokaler Veränderungen .....	13
3.2	Antreibende Faktoren großräumiger (gemeinsamer) Veränderungen .....	14
4	Methodik .....	15
4.1	Trendanalysen .....	16
4.1.1	Lineare Trendanalyse .....	17
4.1.2	Nichtlineare Trendanalyse .....	17
4.2	Interpolation zur Schließung von Datenlücken .....	18
4.3	Hauptkomponentenanalyse .....	19
4.4	Extraktion des gemeinsamen Signals (Differenzenbildung) .....	20
4.5	Bruchpunktanalyse .....	21
5	Beobachtete Änderungen der Tidedynamik .....	22
5.1	Lineare Langzeittrends .....	22
5.2	Nichtlineare Trends .....	25
6	Hauptkomponentenanalyse .....	28
7	Standortspezifische Veränderungen und potentielle Ursachen .....	32
7.1	Eemshaven .....	32
7.2	Delfzijl .....	33
7.3	Borkum Südstrand .....	35
7.4	Borkum Fischerbalje .....	36
7.5	Emden Neue Seeschleuse .....	38
7.6	Norderney Riffgat und Hafen .....	39
7.7	Helgoland Binnenhafen .....	41
7.8	Mellumplate .....	43
7.9	Leuchtturm Alte Weser-Roter Sand .....	44
7.10	Wilhelmshaven Alter Vorhafen .....	45
7.11	Bremerhaven .....	47
7.12	Cuxhaven Steubenhöft .....	48
7.13	Büsum .....	50
7.14	Husum .....	51
7.15	Wittdün .....	52
7.16	Wyk auf Föhr .....	53

7.17 Schlüttsiel.....	54
7.18 Dagebüll .....	56
7.19 Hörnum.....	57
7.20 List.....	58
7.21 Esbjerg Havn .....	59
8 Untersuchung von räumlichen Mustern.....	61
9 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf .....	64
10 Danksagung .....	67
11 Schriftenverzeichnis.....	68
Anhang .....	72
A.1 Lineare Trenduntersuchung.....	72
A.2 Nichtlineare Trenduntersuchung .....	75

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pegelstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes. ....	12
Abbildung 2: Datenverfügbarkeit der jährlichen mittleren Tidekennwerte im Untersuchungsgebiet; in grau Hinterlegt: Zeitraum mit hoher Datenverfügbarkeit, im weiteren Verlauf verwendet als Untersuchungszeitraum der Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalyse. ....	13
Abbildung 3: Schematische Darstellung der entwickelten Methodik zur Separierung von gemeinsamen und lokalen Veränderungen und der detaillierten Untersuchung von lokalen Effekte. ....	16
Abbildung 4: Zeitreihen der ersten beiden Hauptkomponenten, die aus den MThb-Zeitserien der für diese Studien verwendeten Daten (schwarze Linien) und dem Datensatz (blaue Linien) von Jänicke et al. (in prep.) innerhalb der gemeinsamen Datenverfügbarkeit von 1958 bis 2014 errechnet wurden, sowie die Korrelation der jeweiligen ersten beiden Hauptkomponenten.....	20
Abbildung 5: Darstellung der Bruchpunktanalyse mit vorausgegangener Hauptkomponentenanalyse am Beispiel des MThb am Pegel Dagebüll. a) Schwarze Linie: Beobachtungszeitreihe MThb, blaue Linie: Rekonstruktion auf Grundlage der ersten PC. b) Dunkelrote Linie repräsentiert die Differenzen-zeitreihe, die schwarz gestrichelte Linie entspricht dem zugrundeliegenden Regressionsmodell. Die Höhe der (roten) „Spitze“ zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass zu diesem Zeitpunkt ein Bruchpunkt vorhanden ist.....	22
Abbildung 6: Anpassung des MThb an die sich ändernden Wasserstände: exemplarische Entwicklung der mittleren Wasserstände (MThw und MTnw) und des mittleren Tidehubs (MThb) an den Tidepegel Büsum, Dagebüll und Wilhelmshaven Alter Vorhafen in der Deutschen Bucht. Lineare Trends in [mm/a]. Rote Linien: signifikante Trends; grüne gestrichelte Linien: keine signifikante Veränderung.....	23

Abbildung 7: Nichtlineare Trends der MThb-Zeitreihen an ausgewählten Pegelstandorten; links: Darstellung der Zeitreihen mit nichtlinearen Trends; rechts: Darstellung der Trendraten in [mm/a]. .....	27
Abbildung 8: Linke Reihe: Die ersten beiden Hauptkomponenten (PC) für die MTnw-, MThw, und MThb-Zeitreihe aller betrachteten Tidepegel; Rechte Reihe: Koeffizienten der ersten beiden PCs aller betrachteten Tidepegel, schwarze Balken: Koeffizienten PC1 und blaue Balken: Koeffizienten PC2. ....	28
Abbildung 9: Räumliche Verteilung der erklärten Varianz der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb entlang der Nordseeküste (a) Erklärte Varianz in [%] der PC1 an den untersuchten Pegelstandorten (b) Erklärte Varianz in [%] der PC2 an den untersuchten Pegelstandorten. ....	31
Abbildung 10: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Eemshaven (NL). ....	33
Abbildung 11: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Delfzijl (NL). ....	34
Abbildung 12: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Borkum Südstrand. ....	36
Abbildung 13: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Borkum Fischerbalje. ....	37
Abbildung 14: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Emden Neue Seeschleuse. ....	38
Abbildung 15: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Norderney Riffgat und Hafen. ....	41
Abbildung 16: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Helgoland Binnenhafen. ....	42
Abbildung 17: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Mellumplate. ....	44
Abbildung 18: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Leuchtturm Alte Weser-Roter Sand. ....	45
Abbildung 19: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen. ....	46
Abbildung 20: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Bremerhaven. ....	47

Abbildung 21: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft. ....	49
Abbildung 22: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Büsum. ....	50
Abbildung 23: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Husum. ....	52
Abbildung 24: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Wittdün. ....	53
Abbildung 25: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Wyk auf Föhr. ....	54
Abbildung 26: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Schlüttsiel. ....	55
Abbildung 27: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Dagebüll. ....	56
Abbildung 28: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Hörnum. ....	58
Abbildung 29: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel List. ....	59
Abbildung 30: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Esbjerg Havn (DK). ....	60
Abbildung 31: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MThb. ....	61
Abbildung 32: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MTnw. ....	63
Abbildung 33: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MThw. ....	63
Abbildung 34: Nichtlineare Trend der MTnw-Zeitreihen an ausgewählten Pegelstandorten; links: Darstellung der Zeitreihen mit nichtlinearen Trends, rechts: Darstellung der Trendraten in [mm/a]. ....	75
Abbildung 35: Nichtlineare Trends der MThw-Zeitreihen an ausgewählten Pegeln; links: Darstellung der Zeitreihen mit nichtlinearen Trends, rechts: Darstellung der Trendraten in [mm/a]. ....	76

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lineare Trends und 2- $\sigma$ Standardfehler der Tideparameter im Untersuchungsgebiet innerhalb des gemeinsamen Zeitraums 1940 bis 2013 in [mm/a]; rot: negative lineare Trends, grau: nicht signifikante mittlere Veränderungen.....	24
Tabelle 2: Mittelwerte der linearen Trends in [mm/a] von MThw und MThb an der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küste mit und ohne die Tidepegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum (1940–2013). .....	25
Tabelle 3: Qualitative Veränderung der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb im Untersuchungsgebiet; o: kein signifikanter linearer Trend; +: signifikanter positiver linearer Trend. ....	29
Tabelle 4: Lineare Trends des MThw mit 2- $\sigma$ Standardfehler in [mm/a] der untersuchten Tidepegel innerhalb der verschiedenen Zeiträume; in fett markiert: signifikante lineare Trends, NL: niederländische Pegel, DK: Dänischer Pegel. ....	72
Tabelle 5: Lineare Trends des MTnw mit 2- $\sigma$ Standardfehler in [mm/a] der untersuchten Tidepegel innerhalb der verschiedenen Zeiträume; in fett markiert: signifikante lineare Trends, NL: niederländische Pegel, DK: Dänischer Pegel. ....	73
Tabelle 6: Lineare Trends des MThb mit 2- $\sigma$ Standardfehler in [mm/a] der untersuchten Tidepegel innerhalb der verschiedenen Zeiträume; in fett markiert: signifikante lineare Trends, NL: niederländische Pegel, DK: Dänischer Pegel. ....	74

## 1 Einleitung

Entlang der deutschen Nordseeküste wurden im 20. Jahrhundert Veränderungen des Wasserstandes 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, engl. *Mean Tidal Range, MTR*) entlang der deutschen Nordseeküste aufgrund von ansteigenden mittleren Hochwasserständen (MThw, engl. *Mean High Water, MHW*) feststellen, während die Niedrigwasserstände (MTnw, engl. *Mean Low Water, MLW*) 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 (Jensen und Führböter, 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 gegensätzliche Entwicklung der Scheitelwasserstände hatte somit nach 1950 eine Zunahme des MThb zur Folge. Neben den Untersuchungen von Scheitelwasserständen konnte die Veränderungen der Tidedynamik aber auch anhand der Parameter Ebbe- und Flutdauer sowie den Eintrittszeiten festgestellt werden (vgl. 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 Trennung der beteiligten Prozesse ist jedoch noch immer eine wesentliche Herausforderung und eine umfassende Antwort auf die Frage, inwieweit die baulichen Veränderungen an der Küste zum Wandel der Tidendynamik beigetragen haben, ist noch nicht gefunden.

Bereits in den 1980er Jahren wurden Veränderungen der Tidedynamik innerhalb der Deutschen Bucht untersucht. Diese Veränderungen wurden aus langjährigen Aufzeichnungen des Wasserstandes an verschiedenen Pegelstandorten abgeleitet und spiegeln sich insbesondere in einer Erhöhung des Tidehubs, als Differenz der Tidehoch- (Thw) und -niedrigwasserstände (Tnw), wieder. Es wurden Aufzeichnungen von 10 Pegeln untersucht, die auch Teil der Untersuchungen dieses Projekts sind. Von den 1940er bis 1970er Jahren wurden ansteigende MThw festgestellt. Mit zunehmender Differenz der Scheitelwasserstände wurden zudem steigende MThb mit einem maximalen Anstieg zu Beginn der 1980er Jahre beobachtet. Meeresspiegeländerungen, anthropogene Einflüsse wie lokale Baumaßnahmen, Klimaänderungen, aber auch meteorologische Schwankungen wurden als mögliche Ursachen für die beobachteten Entwicklungen aufgeführt (Jensen, 1984). Weitere detaillierte Untersuchungen des MThb entlang der südöstlichen Nordseeküste wurden von Hollebrandse (2005) durchgeführt. Hollebrandse (2005) konnte feststellen, dass das MThb bis etwa 1955 nahezu konstant blieb und sich zwischen 1955 und 1980 aufgrund des abnehmenden Trends der MTnw allmählich erhöht hat. Ähnliche Entwicklungen gibt es auch an der niederländischen und deutschen Küste. Hollebrandse (2005) gibt auch mögliche Erklärungen für die beobachteten Veränderungen. Insbesondere die Erweiterung der Ästuar- und Flussdeltas haben zu Veränderungen im Gezeitenregime geführt. Darüber hinaus hat der globale Klimawandel zu den Tideentwicklungen in der Nordsee beigetragen. Dennoch bleibt die Frage

nach den genauen Ursachen und ihrem Beitrag zu den beobachteten Entwicklungen un-  
beantwortet.

Die Tidewasserstände und der Tidehub, als der mittlere vertikale Unterschied zwi-  
schen Tidehochwasser und dem vorangegangenen und folgenden -niedrigwasserstän-  
den (DIN 4049-3), angetrieben durch astronomische Variationen und die relativen Po-  
sitionen von Sonne, Mond und Erde, variieren sowohl auf regelmäßigen als auch un-  
regelmäßigen Zeitskalen (Pugh und Woodworth, 2014). Obwohl der astronomische An-  
trieb der Tide gut untersucht, für die Zukunft vorhersehbar und periodisch im Laufe der  
Zeit ist, haben mehrere Wissenschaftler und Ingenieure beobachtet, dass sich die Tide-  
wasserstände an verschiedenen Orten aufgrund nicht-astronomischer Faktoren auf ver-  
schiedenen Zeitskalen erheblich verändern. Es wurden weit verbreitete positive und ne-  
gative Trends der Tidewasserstände vom 19. bis Anfang des 21. Jahrhunderts auf über-  
wiegend lokaler und regionaler Ebene identifiziert. Viele Ursachen können zu Verän-  
derungen in der Tidendynamik führen. Auf größeren Skalen führen Schwankungen in  
Beckengröße, -tiefe und -größe über lange geologische Zeiträume zu Veränderungen  
der Resonanzeigenschaften (z. B. Green, 2010; Pickering et al., 2012). Darüber hinaus  
haben zahlreiche Studien auf regionaler und globaler Ebene bestätigt, dass veränderte  
Randbedingungen wie die Bathymetrie oder der mittlere Meeresspiegel (*engl. Mean Sea  
Level, MSL*) die Tidendynamik beeinflussen (z. B. Arns et al, 2015; Haigh et al., 2020).  
Neben diesen größeren Effekten wurde festgestellt, dass Wehranlagen im Bereich von  
tidebeeinflussten Gewässern die Gezeiten durch eine Zunahme von Reflexionen und  
Resonanzen verstärken (Keller, 1901). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich die  
Tidendynamik aufgrund von Hafenumbauten und Baggerarbeiten am stärksten verändern  
(z. B. Marmer, 1935). Folglich sind viele verschiedene nicht-astronomische Prozesse  
beteiligt und verursachen Veränderungen des Tideregimes, die je nach regionalen Ge-  
gebenheiten zu unterschiedlichen Anteilen an der Entwicklung von u. a. Wasserständen  
und Tidehuben beitragen. Zudem können Veränderungen auf verschiedenen Zeit- und  
Längenskalen auftreten, die sich überlagern und gegenseitig verstärken oder dämpfen  
(z. B. Devlin et al., 2018). Daher ist die Trennung und das Verständnis aller zugrunde-  
liegenden Mechanismen nicht-astronomischer Effekte eine relevante und schwierige  
Herausforderung.

Angesichts der Frage, welche groß- und kleinskaligen Prozesse in welchem Maße  
zu den festgestellten Veränderungen beigetragen haben, wurde im Teilprojekt  
ALADYN-A ein Ansatz entwickelt, der eine separate Untersuchung von großräumiger  
und lokaler Entwicklung ermöglicht. In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Tren-  
nung von gemeinsamen Anteilen der Entwicklungen und lokalen Veränderungen der  
Tidendynamik, insbesondere des MThb als Differenz von MTnw und MThw, mithilfe  
verschiedener statistischer Verfahren vorgestellt. Zunächst wurden dazu die Änderun-  
gen der Tidewasserstände- und des MThb in der Deutschen Bucht und an Pegelstand-  
orten an der niederländischen und dänischen Küste analysiert. Aus den Wasser-  
standsaufzeichnungen von insgesamt 21 Tidepegeln in einem Zeitraum von 1940 bis  
2013 wurden Zeitreihen des MThb abgeleitet. Veränderungen der mittleren Tidekenn-  
werte wurden mittels linearer Trendschätzung, Hauptkomponenten- und Bruchpunk-  
tanalysen untersucht. Darüber hinaus wird die Hauptkomponentenanalyse verwendet,  
um gemeinsame Entwicklungen der untersuchten Pegelstandorte von lokalen Signalen

zu trennen. Bereits Schönfeld und Jensen (1991) wendeten die Hauptkomponentenanalyse zur Auswertung von Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln an. Diese Methodik wurde im Teilprojekt ALADYN-A (03F0756A) weiterentwickelt und anstelle der Untersuchung von ausschließlich gemeinsamen Veränderungen, verwendet, um lokale Entwicklungen detailliert analysieren zu können. Dazu wurden die ersten Hauptkomponenten, die beim MThw und MThb bereits mehr als 90 % und beim MTnw über 70 % der Gesamtvarianz beschreibt, als gemeinsames Signal aus den Beobachtungszeitreihen entfernt. Die folglich um die gemeinsamen Anteile der Entwicklungen bereinigten Zeitreihen wurden wiederum auf un stetige Veränderungen untersucht und diese Ergebnisse bekannten Baumaßnahmen und deren Auswirkungen gegenübergestellt.

## 2 Grundlagen und Datenbasis

Im Folgenden wird das dem Vorhaben ALADYN zugrundeliegende Untersuchungsgebiet inklusive der für die Analysen berücksichtigten Nordseepegel vorgestellt.

### 2.1 Untersuchungsgebiet und verwendete Pegel

Für die Untersuchungen der Veränderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht stehen Zeitreihen der Tidewasserstände sowie des Tidehubs (Thb) von einer Vielzahl an Pegelstandorten zur Verfügung. In Abbildung 1 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. Tidepegel im Bereich von Ästuaren wurden nicht in die Untersuchung miteinbezogen, da hier vielfältige Wechselwirkungen auftreten, die zwar die Tidedynamik im Ästuar, jedoch nicht bzw. kaum das Gesamtsystem der Küstenpegel beeinflussen. Neben den Pegelstandorten in den Ästuaren wurden zudem die Zeitreihen an den beiden Sperrwerken Eider und Friedrichskoog von den Analysen ausgenommen, da deren Zeitreihenlängen nicht mindestens einem Nodaltidezyklus (18,61 Jahre, vgl. Kap. 4.1.1) umfasst und daher nur eingeschränkt nutzbar für Trenduntersuchungen sind.

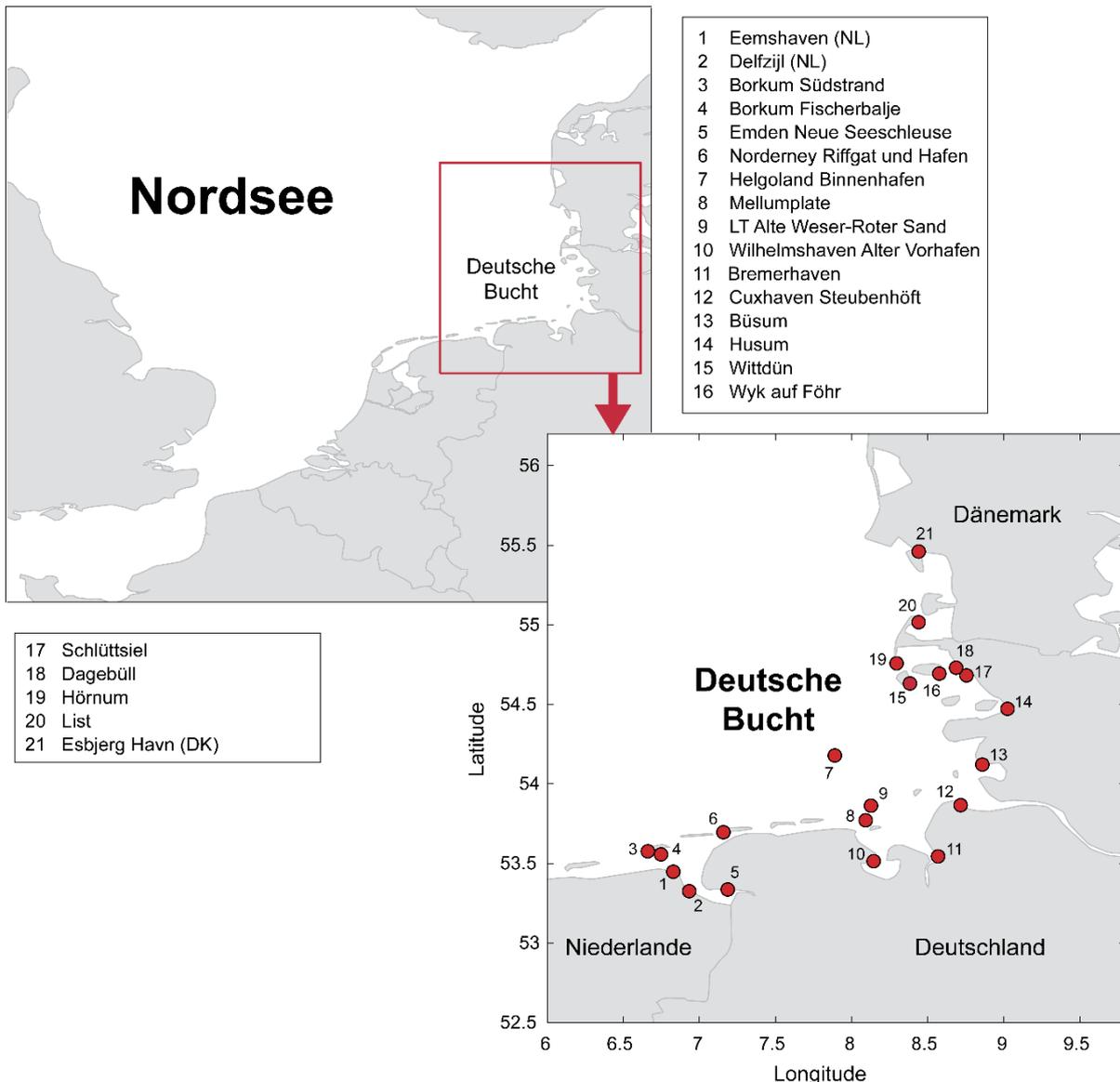


Abbildung 1: Pegelstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes.

## 2.2 Verfügbare Datensätze und Datenaufbereitung

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

Aus den zur Verfügung stehenden Zeitreihen der amtlichen Scheitelwasserstände wurden die jährlichen Mittelwerte MThw und MTnw gebildet. Zusätzlich wurden Einzelwerte der Tidehubzeitreihen nach der Definition der DIN 4049-3 ermittelt. Daraus wiederum wurden Monatsmittel generiert und die MThb-Zeitreihen gebildet. Abbildung 2 stellt die insgesamt zur Verfügung stehende Datengrundlage der Scheitelwasserstände, bzw. der daraus ermittelten Jahreszeitreihen, dar. Es ist zu erkennen, dass die

Zeitreihen der Tideparameter unterschiedliche Zeiträume der Datenverfügbarkeit aufweisen. Aufgrund dieser variierenden Zeitreihenlängen wurde für die weiteren Untersuchungen ein gemeinsamer Untersuchungszeitraum mit möglichst hoher Datenverfügbarkeit gewählt. Unter Berücksichtigung der Nodaltide mit einer Periodendauer von 18,61 Jahren und der verfügbaren Zeitreihenlänge wurde zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit ein Untersuchungszeitraum von 1940 bis 2013 (entspricht 74 Jahre, bzw. 4-mal Nodaltidezyklus) gewählt. Innerhalb dieses Zeitraums werden die eingetretenen Veränderungen analysiert.

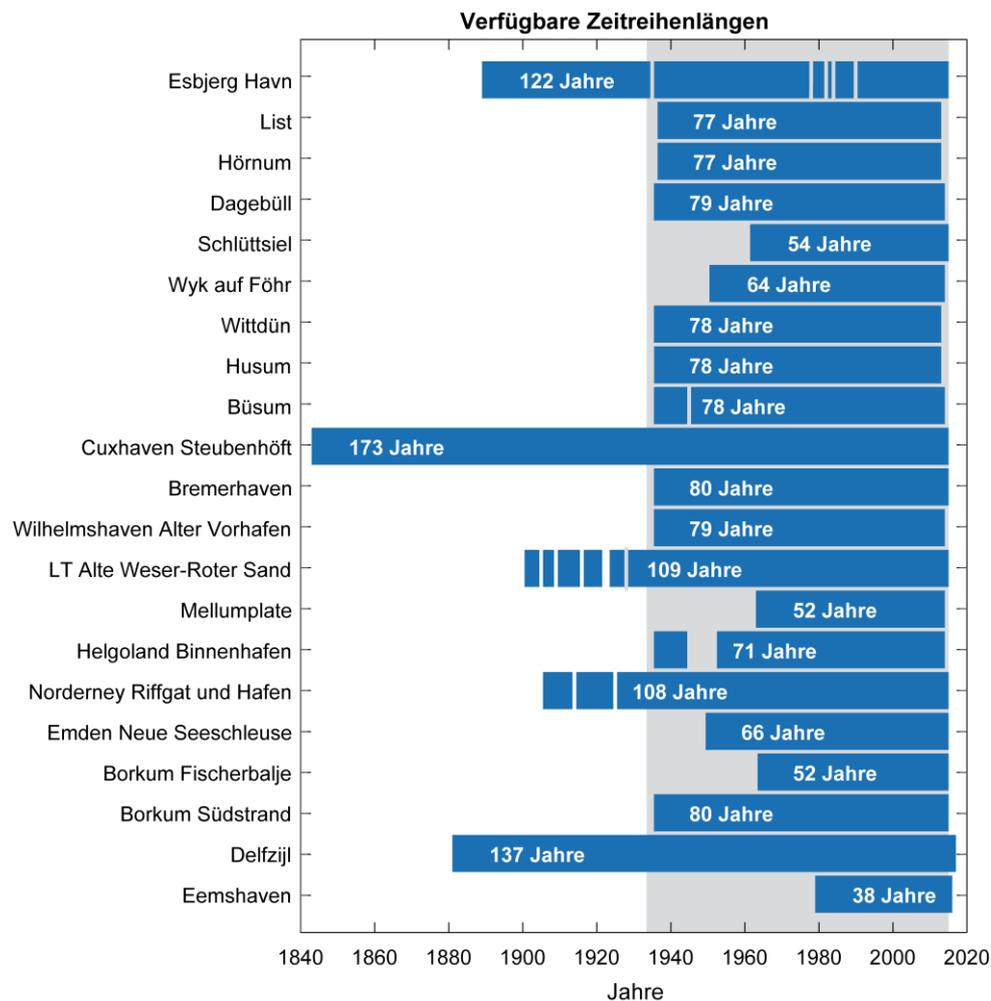


Abbildung 2: Datenverfügbarkeit der jährlichen mittleren Tidekennwerte im Untersuchungsgebiet; in grau Hinterlegt: Zeitraum mit hoher Datenverfügbarkeit, im weiteren Verlauf verwendet als Untersuchungszeitraum der Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalyse.

### 3 Einflussfaktoren von Tideänderungen

#### 3.1 Antreibende Faktoren lokaler Veränderungen

Die signifikantesten Veränderungen der Tidendynamik wurden besonders in Ästuaren und küstennahen Gebieten weltweit beobachtet. So hat sich beispielsweise das MThb in der Emsmündung an der deutschen Nordseeküste seit Ende des 19. Jahrhunderts mehr

als verdoppelt (Talke und Jay, 2017). Haigh et al. (2020) weisen auf sechs hauptsächliche antreibende Faktoren für die Tideänderungen auf regionaler Ebene hin. Diese lauten wie folgt: Dissipations- und Turbulenzeffekte, Variationen der Fahrwasser- und Flachwassertiefe, Veränderungen der Sohlbeschaffenheiten, Resonanz- und Reflexionseigenschaften, Frischwassereintrag und Änderungen der Messinstrumente zur Wasserstandserfassung. Die räumliche Variation der beobachteten Entwicklung lässt sich jedoch nicht allein durch die genannten lokalen Einflussfaktoren und deren Veränderungen erklären. Im Bereich des regionalen Tidenregimes forcieren weitere Prozesse Veränderungen der Tidedynamik. So nimmt die Gestaltung und Lage der Küstenlinie einen wesentlichen Einfluss auf die Tidedynamik. Die Küstenlinie beeinflusst die Resonanzeigenschaften eines Beckens und variiert mit der Wassertiefe, durch anthropogene Effekte wie bspw. Veränderungen der Küstenschutzstrukturen (z. B. Keller, 1901; Haigh et al., 2020). Ein weiterer Faktor, der mit der Gezeitendynamik interagiert, ist die Rauheit des Meeresbodens, die durch natürliche und anthropogene Prozesse wie Wellen, Strömungen und Schleppnetzfisherei einem ständigen Wandel unterliegen (Aldridge et al., 2015).

### 3.2 Antreibende Faktoren großräumiger (gemeinsamer) Veränderungen

An der deutschen Nordseeküste werden die Wasserstände von vielzähligen äußeren Faktoren beeinflusst. So kommt es zu Überlagerungen der astronomischen Gezeitenanteile sowie meteorologischer und klimatischer Einflussfaktoren. Zu letzteren beiden zählt der direkte Einfluss des Luftdrucks auf den Meeresspiegel und den durch Wind verursachten Seegang und den an der Küste hervorgerufenen Windstau. Auf großräumiger Skala können auch kurzfristige Wind- und Luftdruckänderungen über dem Atlantik Fernwellen auslösen, die in die Nordsee eindringen und den Wasserstand entlang der Deutschen Bucht beeinflussen. Weiterführend kommt es zu stetigen Interaktionen der einzelnen Komponenten wie z. B. von Gezeiten und Windstau, insbesondere in Flachwasserbereichen wie der deutschen Nordseeküste (Brasseur et al., 2017).

Die durch lokale Systemänderungen hervorgerufenen Tideänderungen weisen ständige (nichtlineare) Wechselwirkungen mit den genannten großskaligen Einflussfaktoren auf, die zu verstärkten Änderungen führen können. Zu diesen verschärfenden Effekten zählen z. B. der langsam ansteigende MSL, Änderungen der Sturmaktivität und andere klimatische Auswirkungen (Arns et al., 2017). Insbesondere wird als Ursache von Veränderung der Tidedynamik häufig der MSL genannt, wobei Müller et al. (2011) eine weltweite Änderung des MThb von 1 bis 2% mit einer eintretenden Erhöhung des MSL von einem Meter errechnet haben.

Weitere Verursacher langfristiger Veränderungen auf regionaler und globaler Ebene werden im Folgenden kurz erläutert. Eine der Hauptauswirkungen sind die Beckeneigenschaften (u. a. Länge und Tiefe eines Beckens), die durch tektonische Konstellationen bestimmt werden und die die Resonanzeigenschaften eines Ozeanbeckens weiter beeinflussen (Green et al., 2018). Der zweite Antriebsmechanismus ist die Wassertiefe. Flutwellen im Bereich von Küstenvorfeldern verhalten sich wie Flachwasserwellen und werden daher stark von der Wassertiefe beeinflusst (Haigh et al., 2020). Ursachen für die Veränderung der Wassertiefe können der Meeresspiegelanstieg oder geologische Prozesse (z. B. Glacial Isostatic Adjustment, GIA) sein (Arns et al., 2015).

Die starken Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht sind zwar sichtbar aber bislang nur unzureichend erklärbar. In vielen Untersuchungen wird die Änderung des mittleren Meeresspiegels als potentielle Ursache diskutiert (z. B. Mudersbach et al., 2013). Auch wurden numerische Modellierungen herangezogen, um die Änderungen der Tidedynamik infolge des ansteigenden Meeresspiegels zu beschreiben, jedoch lassen sich die beobachteten Änderungen nicht über den MSL vollständig beschreiben. So kommen weitere Ursachen wie z. B. der Einfluss des atlantischen Gezeitenregimes und des Nodaltidezyklus von 18,6 Jahren für die Veränderungen der Tidedynamik infrage (Brasseur et al., 2017). Woodworth (2010) und Müller (2011) zeigen weitere großräumige potentielle Ursachen der Änderungen in der Nordsee auf.

Darüber hinaus können Veränderungen in der Ozeanschichtung unterschiedliche Auswirkungen auf die Gezeiten haben. Die Stratifikation des Meeres kann das Verhalten einer Tidewelle beeinflussen. Darüber hinaus könnten signifikante Schwankungen der Gezeiten durch nichtlineare Wechselwirkungen zwischen den Gezeitenkomponenten oder zwischen astronomischen und nicht-astronomischen Gezeitenanteilen verursacht werden. Zu diesen nichtlinearen Prozessen zwischen Gezeiten und nicht-astronomischen Prozessen gehören z. B. Sturmereignisse, die sich auf interannuelle und dekadische Zeitskalen wie Sturmflutereignisse oder saisonale Schwankungen der Mittelströme auswirken (Haigh et al., 2020). Zwischen den Gezeiten, dem Wasserstand, dem Wind, dem Luftdruck, den Flachwasser- und Reibungseffekten bestehen ständige Wechselwirkungen (z. B. Flather, 2001; Haigh et al., 2010).

Alle Antriebsfaktoren der beobachteten Tideänderung können auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen schwanken oder sich langfristig und systematisch verändern. Im Rahmen dieses Projekts werden diese großräumigen Einflussfaktoren nicht weiter diskutiert und das Augenmerk liegt hier auf der Separierung von eben diesen Veränderungen und den lokalen Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 4.3).

## 4 Methodik

Im Folgenden wird die im Rahmen des Teilprojektes ALADYN-A genutzte und weiterentwickelte Methodik vorgestellt. Es wurden die Veränderungen der Tidedynamik mithilfe verschiedener statistischer Analysen untersucht. Zudem wurde ein Verfahren verwendet, um lokale Effekte und kleinräumige Veränderungen zu detektieren und von gemeinsamen Signalen zu trennen. In Abbildung 3 sind die Bausteine der entwickelten Methodik schematisch dargestellt. Folgende einzelne Analyseschritte wurden dazu durchgeführt:

1. Untersuchung der Veränderungen der mittleren Tidenparameter mit Schätzung linearer Trends anhand der beobachteten Zeitreihen (Untersuchung von räumlichen Mustern)
2. Schließung von Datenlücken mit dem Interpolationsverfahren *Ordinary Kriging*
3. Hauptkomponentenanalyse zur Extraktion der gemeinsamen Signale aus den beobachteten Daten
4. Berechnung der Zeitreihen mit ausschließlich kleinräumigen und lokalen Veränderungen

5. Anwendung des sogenannten probabilistischen *Bayesian change point algorithm* nach Ruggieri (2012) auf die verbleibende Zeitreihe, um un stetige Änderungen der Tidedynamik zu erkennen (im Folgenden auch als Bruchpunkte bezeichnet)
6. Vergleich und Diskussion der erfassten un stetigen Änderungen z. B. mit historischen Baumaßnahmen
7. Beschreibung der Auswirkungen von den potentiellen Ursachen der festgestellten un stetigen Änderungen (Charakteristika der Zeitreihen vor und nach den festgestellten Bruchpunkten)

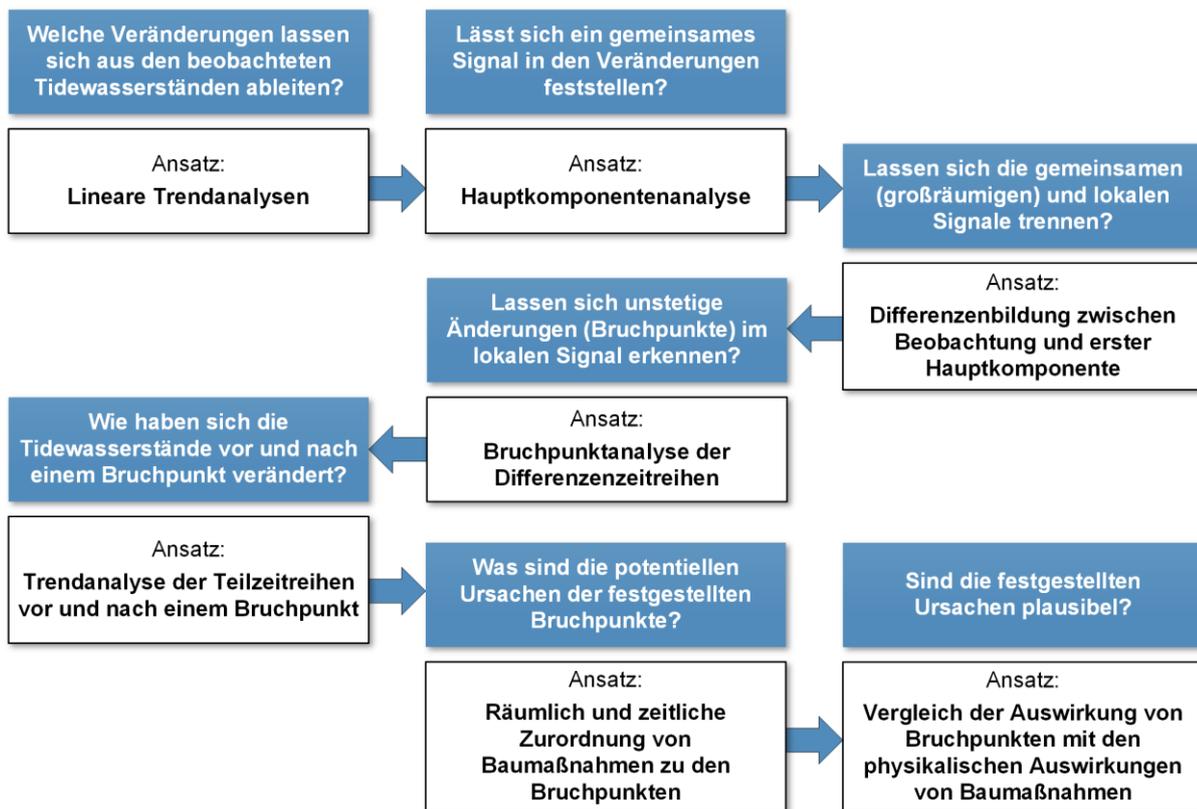


Abbildung 3: Schematische Darstellung der entwickelten Methodik zur Separierung von gemeinsamen und lokalen Veränderungen und der detaillierten Untersuchung von lokalen Effekte.

Alle durchgeführten Analysen werden im Folgenden näher erläutert.

## 4.1 Trendanalysen

Um die Änderungen der MTnw -, MThw- und MThb-Zeitreihen beschreiben zu können, wurden lineare Trendanalysen durchgeführt. Erst nachdem bekannt ist, wie sich die Tidedynamik insgesamt verändert hat, ist es möglich die Auswirkungen lokaler Effekte zu beschreiben. Zudem werden die Trendanalysen verwendet, um gemeinsame Entwicklungen und räumliche Muster zu detektieren.

### 4.1.1 Lineare Trendanalyse

Um die mittleren Veränderungen (stetige Änderungen) der MTnw -, MThw- und MThb-Zeitreihen beschreiben zu können, wurden zunächst lineare Trends der Zeitreihen errechnet, die dazu dienen, die Langzeitentwicklung im Untersuchungsgebiet zu quantifizieren. Bei Analysen des MTnw, des MThw oder des MThb in der Nordsee erfolgen Trendanalysen i. d. R. über Zeiträume, die ein Vielfaches der Nodaltide darstellen. Bei einer Amplitude in der Größenordnung von ca. 3–4 cm (z. B. Jensen et al., 1988; Wahl et al., 2008) können die Ergebnisse von Trendanalysen, besonders bei relativ kurzen Zeitreihen (z. B. < Nodaltidezyklus), andernfalls verfälscht werden. Aus dieser Bedingung und der variierenden Datenverfügbarkeit ergeben sich folgende Zeiträume, die für die lineare Trendanalyse herangezogen wurden: 1940 bis 2013, 1958 bis 2013, 1977 bis 2013 und 1995 bis 2013, was jeweils dem Vierfachen bis zum einfachen Nodalzyklus entspricht. Betrachtet man die gewählten Zeiträume hinsichtlich ihrer Länge, so zeigt sich, dass es sich in allen Fällen um etwa ein Vielfaches der Nodaltide-Periode von 18,61 Jahren handelt, bzw. um ein Vielfaches von 19 Jahren, da die Analysen ausschließlich Jahresmittelwerte adressieren. Dies stellt sicher, dass Anteile der Nodaltide nicht fälschlicherweise als langfristige Trends interpretiert werden (vgl. z. B. Bartels, 1952; Jensen et al. 1992). Die Ergebnisse der Trendanalyse für alle genannten Zeiträume im Anhang A.1 zu entnehmen (MThw: Tabelle 4, MTnw: Tabelle 5 und MThb: Tabelle 6).

Für die lineare Trendanalyse wird also für jede Aufzeichnungszeitreihe eine lineare Trendfunktion der folgenden Form berechnet:

$$y = a_1 \cdot x + a_0 \quad (1)$$

Dabei entspricht der Koeffizient  $a_1$  der Steigung der Geraden  $y$  und bildet den linearen Trend der betrachteten Zeitreihe  $x$  ab (Şanal, 2015). Zusätzlich zu den ermittelten Trends (in [mm/a]) sind jeweils die 2- $\sigma$  Standardfehler, ebenfalls in [mm/a], zur Darstellung der Unsicherheiten angegeben. Die linearen Trends, die zugehörigen Standardfehler bzw. das Signifikanzniveau wurden über einem Algorithmus nach Mawdsley und Haigh (2016) ermittelt. Die Standardfehler wurden dabei mit einer Lag-1-Autokorrelationsfunktion geschätzt, um die serielle Autokorrelation einer Zeitreihe zu berücksichtigen. Folglich wird ein linearer Trend als signifikant bezeichnet, wenn dieser mit einem 95%tigen Konfidenzintervall von Null abweicht.

### 4.1.2 Nichtlineare Trendanalyse

Ein wesentlicher Nachteil der oben beschriebenen linearen Trendanalyse besteht darin, dass die zu beobachteten Zeitreihen häufig nicht sehr gut durch eine lineare Funktion beschrieben werden können und lineare Trends folglich die Entwicklung innerhalb einzelner Zeiträume deutlich über- oder unterschätzen können (Jensen et al., 2011). Um nichtlineare Änderungen der mittleren Tidewasserstands- und Tidehubzeitreihen zu beschreiben, wird eine nichtlineare Glättungstechnik (*engl. Singular System Analysis, SSA*) mit einem Glättungsfenster von  $D = 19$  Jahre) auf die Beobachtungszeitreihen angewendet. In Kombination mit dem sogenannten *Monte-Carlo autoregressive padding* (MCAP) ist ein Ansatz zur Beurteilung der Unsicherheiten der Glättung am Anfang und

gegen Ende der verfügbaren Zeitreihen gegeben. Die Identifizierung der SSA-Rekonstruktion, die den kleinsten mittleren quadratischen Fehler (MSE) gegenüber den Beobachtungen liefert, führt zu einer sehr datenadaptiven Glättung der verfügbaren Zeitreihen. Die Änderungsraten der Tideparameter werden als die ersten Unterschiede der SSA-Rekonstruktionen geschätzt, die die beste Anpassung bieten. Diese Methodik ermöglicht die Erkennung von Wendepunkten und Perioden mit stark ausgeprägten oder sogar negativen Raten (Wahl et al., 2011).

## 4.2 Interpolation zur Schließung von Datenlücken

Um die unvollständigen Zeitreihen für die durchzuführenden Analysen zu komplementieren, wird das Verfahren des *Ordinary Kriging* (auch bekannt als *Gaußprozess-Regression*) zur Schließung der Datenlücken angewendet. Das Kriging ist ein geostatistisches Verfahren zur Interpolation von fehlenden Werten in einem Datenkollektiv basierend auf vorhandenen benachbarten Werten. Das Kriging wurde ursprünglich von Daniel Krige in den 1950er Jahren für den Bergbau entwickelt (Krige, 1951), seit einigen Jahren wird das Verfahren aber auch in vielen anderen Bereichen angewendet. So haben beispielsweise Rigor et al. (2000) und Rhode et al. (2013) das Kriging erfolgreich zur Lückenschließung von Temperaturdaten angewendet. Im Allgemeinen handelt es sich beim Kriging um ein lineares Interpolationsverfahren. Dabei werden die fehlenden Werte gemäß einer gegebenen Kovarianzstruktur bestimmt, die wiederum aus den vorhandenen Beobachtungswerten errechnet wird (Cressie, 1990). Ein wesentlicher Vorteil des Krigings ist, dass sich die interpolierten Werte stufenlos ändern und die beobachteten Werte durch das Kriging unverändert bleiben. Zur Interpolation der fehlenden Werte berücksichtigt das Kriging die Abstände zwischen den vorhandenen Beobachtungen, um die räumliche Varianz abbilden zu können. Ist innerhalb einer Region eine Bündelung beobachteter Werte festzustellen, so wird die Gewichtung der Punkte dieser Region reduziert. Das bedeutet, dass innerhalb einer Gruppierung von Beobachtungswerten die Dichte berücksichtigt wird, während in Regionen mit spärlicher Datenabdeckung nur die Entfernung berücksichtigt wird (Cowtan und Way, 2014). Mit der folgenden Formel lässt sich die Vorgehensweise vereinfacht zusammenfassen:

$$\hat{Z}_{(x_0)} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{n-1} \ w_n] \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{n-1} \\ z_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n w_i(x_0) \times Z(x_i) \quad (2)$$

Dabei entspricht  $\hat{Z}$  dem Wert, der an der unbeobachteten Stelle  $x_0$  zu bestimmen ist, während die Werte von  $i = 1$  bis  $n$  die Anzahl der beobachteten Stellen darstellen.  $\hat{Z}$  wird aus einer linearen Kombination aller beobachteten Werte  $z_i = Z(x_i)$  berechnet, die durch den Parameter  $w$  nach Abstand und Dichte gewichtet werden. Die entsprechenden Parameter bezüglich des Einflusses von Dichte und Abstand auf die Gewichtung müssen daher sorgfältig ausgewählt werden. Eine besondere Eigenschaft dieses Verfahrens ist die Konvergenz von interpolierten Werten zum Mittelwert ihrer Region mit zunehmendem Abstand zum nächsten Messpunkt. Deshalb sind die Ergebnisse in der Regel nicht extrem und eher konservativ (Cowtan und Way, 2014).

Die Anwendung dieses Verfahrens basiert auf dem Vorgehen von Jänicke et al. (in prep.) und wird im Rahmen dieses Projekts zur Schließung von zeitlichen Lücken unseres Datensatzes innerhalb des Untersuchungszeitraums 1935 bis 2015 verwendet.

### 4.3 Hauptkomponentenanalyse

Um die Ursachen der beobachteten Veränderungen zu analysieren, wurde eine Hauptkomponentenanalyse (*engl. principal component analysis, PCA*) durchgeführt. Die PCA ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Datensätzen, mithilfe dessen Beobachtungen durch mehrere abhängige Variablen beschrieben werden. Ziel der PCA ist es, die wichtigsten Informationen aus den Daten zu extrahieren und sie als eine Reihe neuer Variablen darzustellen, die auch als Hauptkomponenten (*engl. principal components, PC*) bezeichnet werden. Das Muster der Ähnlichkeit der Beobachtungen kann somit dargestellt werden (Abdi und Williams, 2010).

Die PCA gehört zu den Methoden der multivariaten Statistik. Sie dient der Strukturierung und Vereinfachung umfangreicher Datensätze durch die Approximation einer großen Anzahl statistischer Variablen mit einer geringeren Anzahl signifikanter, nicht-korrelativer Linearkombinationen. Sei  $x$  ein Vektor mit  $n$  Zufallsvariablen, so wird zunächst eine lineare Funktion  $f_1(x)$  mit den konstanten Koeffizienten  $a_{1i}$  bestimmt, indem der Eigenvektor aus der räumlich gewichteten Kovarianzmatrix von  $x$  berechnet wird. Dann stellt  $f_1(x)$  die größtmögliche Gesamtvarianz aller Variablen in  $x$  dar:

$$f_1(x) = a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n = \sum_{i=1}^n a_{1i} \cdot x_{1i} \quad (3)$$

Als nächstes wird dieser Vorgang für eine Funktion  $f_2(x)$  wiederholt, die mit  $f_1(x)$  unkorreliert ist und den größtmöglichen Betrag der verbleibenden Varianz beschreibt. Es ist möglich,  $n$  solcher Funktionen zu finden, wobei es i. d. R. das Ziel ist, mit deutlich weniger Funktionen möglichst viel der Varianz zu erklären. Diese Funktionen  $f_i(x)$  werden als Hauptkomponenten (PCs) bezeichnet (Jolliffe, 2002).

Großräumige Entwicklungen im Untersuchungsgebiet lassen sich durch die Bestimmung der ersten Hauptkomponente (PC) beschreiben, wenn diese einen hohen Anteil an der Gesamtvarianz erklären kann. Dies basiert auf der Annahme, dass alle von der ersten PC abgebildeten Änderungen den gemeinsamen Entwicklungen aller untersuchten Pegelstandorten entsprechen. Weitere in unteren PCs sichtbare Änderungen spiegeln räumlich begrenzte und lokale Effekte wieder. Mit der PCA ist es somit möglich, groß- und kleinräumige Entwicklungen der Tideparameter voneinander zu trennen. Wird, wie im folgenden Schritt, eine Beobachtungszeitreihe über die erste PC rekonstruiert, erhält man ein Signal am betrachteten Pegelstandort, das ausschließlich durch großflächige Veränderungen gekennzeichnet ist. Wird diese Rekonstruktion von der Beobachtungsreihe subtrahiert, beschreiben die Residuen die primär durch lokale Effekte verursachten Veränderungen. Beispiele für großräumig induzierte Effekte sind der Anstieg des mittleren Meeresspiegels oder klimatisch induzierte Veränderungen. Lokale Effekte dagegen sind Baumaßnahmen wie der Bau von Staustufen oder Sandvorspülungen als Beitrag zum Küstenschutz. Hinsichtlich der Frage, inwieweit die Tideparameter durch Baumaßnahmen beeinflusst werden, dient die PCA als Grundlage für die Unterscheidung zwischen nordseeweiten (gemeinsamen) Entwicklungen und lokalen Effekten.

Zur Validierung der aufgestellten Hypothese wurden die Ergebnisse von Jänicke et al. (in prep.) einbezogen. Jänicke et al. (in prep.) stellen fest, dass die erste Hauptkomponente aus einem nordseeweiten Pegelkollektiv das Verhalten des Tidenhubs in der Deutschen Bucht beschreibt, während die zweite Hauptkomponente die Entwicklung des Tidenhubs an der britischen Küste widerspiegelt. Für den Zeitraum von 1958 bis 2014 wurden die erste und zweite Hauptkomponente der beiden Datensätze verglichen und die Korrelationen ( $R^2$ ) untersucht. Wie in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt, wurde eine hohes Bestimmtheitsmaß (hohe quadrierte Korrelation) der ersten Hauptkomponenten mit  $R^2$  [PC1, PC1<sub>Jänicke et al.</sub>] = 0,90 [-] ermittelt. Im Gegensatz dazu wurde für die zweite Hauptkomponente ein niedriges  $R^2$  von 0,20 [-] beobachtet. Für unsere Untersuchungen bedeutet dies, dass das von Jänicke et al. (in prep.) bestimmte zweite großräumige Signal, repräsentiert durch die PC2, keinem großräumig gemeinsamen Signal des Tidenhubs in der Deutschen Bucht entspricht. Dies entspricht unsere Annahme, dass ab der zweiten PC lokale Entwicklungen abgebildet werden und die Deutsche Bucht als ein eigenständiges System betrachtet werden kann.

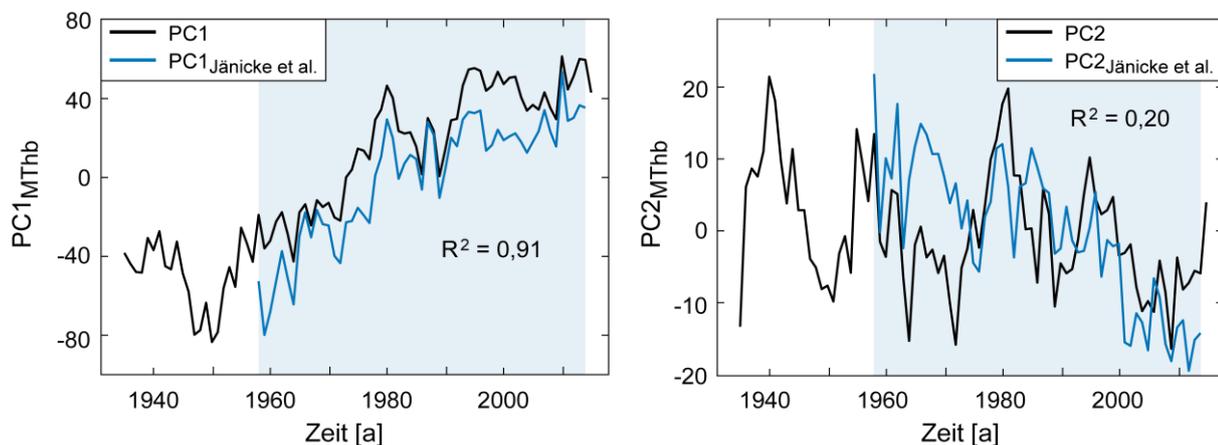


Abbildung 4: Zeitreihen der ersten beiden Hauptkomponenten, die aus den MThb-Zeitreihen der für diese Studien verwendeten Daten (schwarze Linien) und dem Datensatz (blaue Linien) von Jänicke et al. (in prep.) innerhalb des gemeinsamen Untersuchungszeitraums von 1958 bis 2014 errechnet wurden, sowie die Korrelation der jeweiligen ersten beiden Hauptkomponenten.

#### 4.4 Extraktion des gemeinsamen Signals (Differenzenbildung)

Um die Auswirkungen lokaler Effekte, wie z. B. historischer Baumaßnahmen, auf die Tideparameter an den untersuchten Standorten abschließend beschreiben zu können, wurde eine Bruchpunktanalyse durchgeführt. Die Bruchpunktanalyse wurde jedoch nicht unmittelbar auf die Beobachtungszeitreihen angewendet, sondern auf die um die erste PC bereinigten Zeitreihen. Die These hinter diesem Verfahren ist, dass unstetige Veränderungen ein Hinweis auf Baumaßnahmen sein können. Die reduzierten Zeitreihen (im Folgenden: Differenzenzeitreihen, engl. *residual time series*) als Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion (gemeinsames Signal) enthalten alle nicht über das gemeinsame Signal ab-bildbare Veränderungen. Demnach wird davon ausgegangen, dass lokale unstetige Änderungen in den Differenzenzeitreihen sichtbar werden. Die Differenzenzeitreihen des MThb werden für die einzelnen Tidepegelstandorte nach der folgenden Gleichung berechnet. Analog dazu werden die Differenzenzeitreihen von MTnw ( $MTnw_{res}$ ) und MThw ( $MThw_{res}$ ) gebildet:

$$\text{MThb}_{\text{residual},i} = \text{MThb}_{\text{observed},i} - \text{PC1}_{\text{MThb},i} \quad (4)$$

mit:

i:	Pegelnummer
$\text{MThb}_{\text{residual},i}$ :	Differenzenzeitreihe des MThb in [cm]
$\text{MThb}_{\text{observed},i}$ :	Beobachtungszeitreihe des MThb ( <i>engl. observed</i> ) in [cm]
$\text{PC1}_{\text{MThb},i}$ :	Rekonstruktion auf Basis der PC1 in [cm]

## 4.5 Bruchpunktanalyse

Weist eine Zeitreihe Inhomogenitäten, insbesondere eine sprungartige Entwicklung auf, so kann durch die Bruchpunktanalyse der Zeitpunkt (Bruchpunkt, kurz: BP) bestimmt werden, zu dem sich das Abflussverhalten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit verändert hat. Meist ist dies ein Indiz für eine kurzfristige Änderung des Abflussgeschehens des untersuchten Gewässers oder strukturelle Wandlungen im Einzugsgebiet (Straub, 2004). Mithilfe einer Bruchpunktanalyse können die Zeitpunkte der Veränderung einer gemessenen Ganglinie detektiert werden, um anschließend deren Ursachen und Auswirkungen zu diskutieren. Abrupte Entwicklungen innerhalb einer gemessenen Zeitreihe werden häufig durch anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet verursacht, können bspw. aber auch durch Setzungen am Pegel oder Baumaßnahmen hervorgerufen werden (Dangendorf und Jensen, 2011).

Durch die Anwendung eines *Bayesian change point algorithm* von Ruggieri (2012) auf ein mehrfaches Änderungspunktproblem können Unsicherheiten sowohl für die Anzahl als auch für die Lage der Änderungspunkte mit einem probabilistischen Ansatz geschätzt werden. Der Algorithmus ist in der Lage, Änderungen des Mittelwerts, des Trends und/oder der Varianz der untersuchten Parameter zu erkennen. Darüber hinaus ist es unwahrscheinlich, dass der *Bayesian change point algorithm* einen Bruchpunkt erkennt, auch wenn die Zeitreihe eigentlich keinen enthält (Ruggieri, 2012). Wie bereits erwähnt, ist der untersuchte Parameter der verbleibende MThb. Die Bruchpunktanalyse wird dabei nur auf Zeitreihen innerhalb des Zeitraums und im Bereich der Datenverfügbarkeit angewendet.

Untersucht wurden die Differenzenzeitreihen der drei relevanten Tideparameter MTnw, MThw und MThb. Für jede der Zeitreihen liegt folglich nach den Untersuchungen jeweils eine Wahrscheinlichkeitsberechnung der Anzahl enthaltener BP und eine Ganglinie der Wahrscheinlichkeit für die Lage der potentiellen BP im Untersuchungszeitraum vor. In Abbildung 5 ist beispielhaft die Bruchpunktanalyse des MThb am Pegel Dagebüll dargestellt. Dabei sind im oberen Teil der Abbildung die Beobachtungszeitreihe und die Rekonstruktion der ersten Hauptkomponente für diesen Pegel abgebildet. Eine erste visuelle Prüfung der beiden Zeitreihen zeigt, dass die beobachteten Werte des MThb teilweise deutlich niedrigere oder höhere Werte als die Rekonstruktion aufweisen. Abgesehen von dem scheinbaren „Einknicken“ der Kurven um 1950, lässt die visuelle Prüfung keinen Rückschluss auf eindeutige un stetige Änderungen zu. Betrachtet man hingegen die Differenzenzeitreihe (vgl. Abbildung 5.b), lässt sich eine un stetige Änderung in der Mitte der 1970er Jahre vermuten. Zudem wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,6 % errechnet, dass die Differenzenzeitreihe einen Bruchpunkt enthält.

Dabei liegt dieser Bruchpunkt mit einer Wahrscheinlichkeit von 43,8 % im Jahr 1972 und ist mit einem 95 %-Vertrauensbereich im Zeitraum von 1971 bis 1976 aufgetreten.

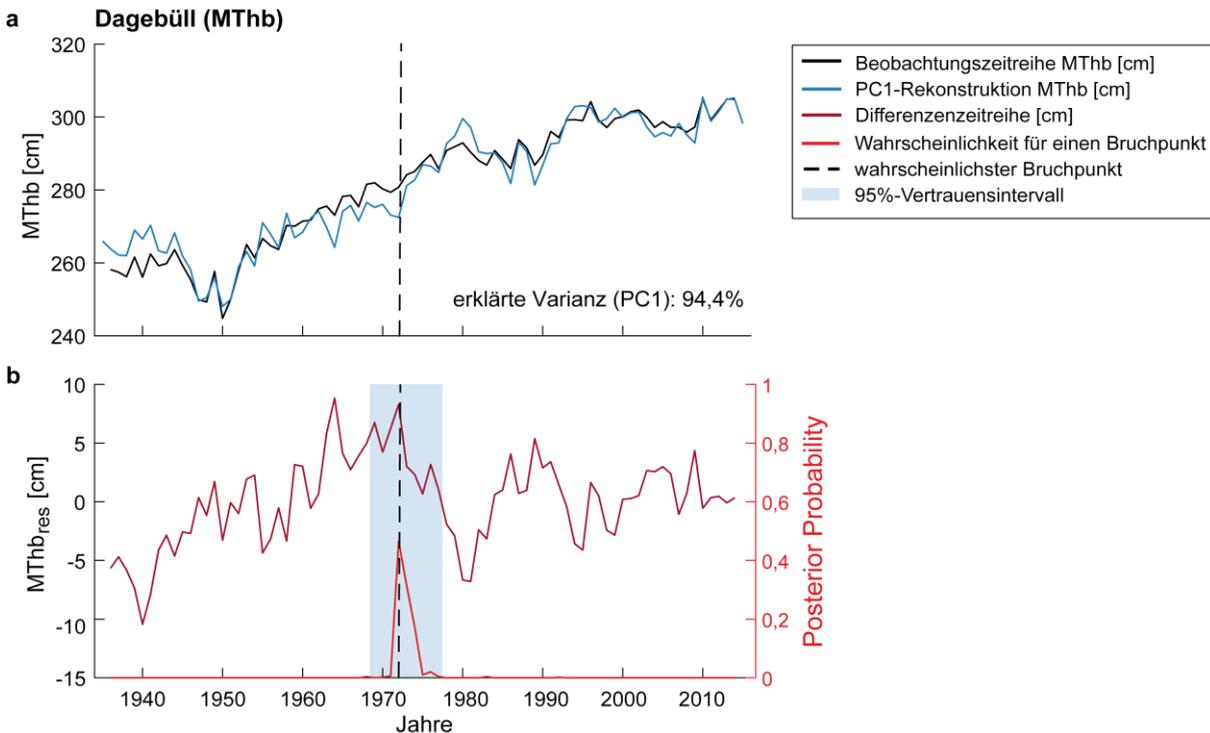


Abbildung 5: Darstellung der Bruchpunktanalyse mit vorausgegangener Hauptkomponentenanalyse am Beispiel des MThb am Pegel Dagebüll. a) Die schwarze Linie entspricht der Beobachtungszeitreihe des MThb, die blaue Linie der Rekonstruktion auf Grundlage der ersten PC. b) Die dunkelrote Linie repräsentiert die Differenzzeitreihe, die schwarz gestrichelte Linie entspricht dem zugrundeliegenden Regressionsmodell. Die Höhe der (roten) „Spitze“ zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass zu diesem Zeitpunkt ein Bruchpunkt vorhanden ist.

## 5 Beobachtete Änderungen der Tidedynamik

### 5.1 Lineare Langzeittrends

Um die Änderungen zu beschreiben, wurden zunächst die linearen Trends der Beobachtungszeitreihen berechnet. Um die Bedeutung und die Unsicherheiten der berechneten Mittelwertänderungen zu bestimmen, wurden auch die zugehörigen Standardfehler (SE) der Trends ermittelt. Die Entwicklung des Tidehubs ist immer abhängig von der Veränderung der mittleren Wasserstände MThw und MTnw. Abbildung 6 zeigt die drei beobachteten Fälle von Tidehubänderungen durch fallende oder steigende MThw und MTnw an drei exemplarischen Pegeln in der Deutschen Bucht.

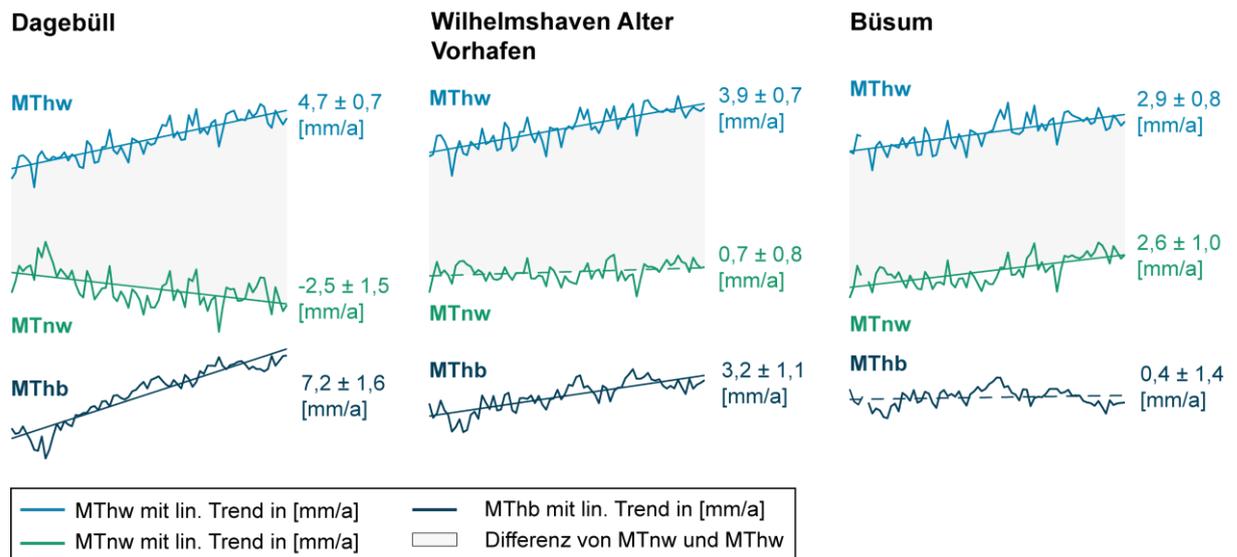


Abbildung 6: Exemplarische Entwicklung von MThw (hellblau) und MTnw (grün), sowie des MThb (dunkelblau) an den Tidepegel Büsum, Dagebüll und Wilhelmshaven Alter Vorhafen in der Deutschen Bucht. Lineare Trends im Zeitraum von 1940 bis 2013 in [mm/a]. Durchgängige Linien: signifikante Trends; gestrichelte Linien: keine signifikante Veränderung.

Die Vergleichbarkeit der linearen Trends und den zugehörigen Unsicherheiten ist durch die unterschiedliche Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Aus diesem Grund beschränkt sich die Auflistung der linearen Trends in Tabelle 1 auf den gemeinsamen Zeitraum 1940 bis 2013. Zeitreihen mit einer kürzeren Aufzeichnungsdauer wurden hier nicht aufgeführt und sind mit Angabe der verfügbaren Zeiträume der Tabelle 4 (MThw), Tabelle 5 (MTnw) und der Tabelle 6 (MThb) im Anhang A.1 zu entnehmen. Bei Betrachtung der drei genannten Tabellen ist zu erkennen, dass die linearen Trends für die meisten der untersuchten Pegelzeitreihen innerhalb der verschiedenen Zeitperioden teilweise stark unterscheiden. So können im MThw im kürzesten Zeitraum (1995–2013) ausschließlich nicht signifikante Trends beobachtet werden. Dies kann zum einen durch die geringe Zeitreihenlänge (19 Jahre), aber auch durch die hohe Variabilität zu großen Unsicherheiten und folglich zu nicht signifikante linearen Trends führen oder aber es haben tatsächlich in dem Zeitraum keine signifikanten Veränderungen der MThw mehr stattgefunden. Betrachtet man die signifikanten linearen Trends der längeren Zeitreihenabschnitte, so lassen sich ausschließlich ansteigende MThw feststellen, deren Trend lediglich variierende Ausprägungen aufweisen. Im gesamten Untersuchungszeitraum von 1940 bis 2013 konnte an den Pegel Esbjerg ( $4,9 \pm 1,1$  mm/a) und Dagebüll ( $4,7 \pm 0,7$  mm/a) die deutlichste Zunahme detektiert werden. Im nächst kürzerem Zeitraum unter Berücksichtigung des Nodaltidezyklus (1958–2013) steigt das MThw an diesen beiden Pegeln am gravierendsten an. Zudem konnte an den Pegeln Delfzijl, Mellumplate, Cuxhaven Steubenhöft und Büsum ab 1977 keine signifikante Änderung ermittelt werden.

Wesentlich inhomogener haben sich die MTnw an den untersuchten Tidepegeln und innerhalb der verschiedenen Zeiträume entwickelt. So weisen die Pegel Eemshaven, Norderney Riffgat und Hafen, Husum, Wittdün, Wyk auf Föhr, Schlüttsiel und Hörnum keine signifikanten Veränderungen in keinem der betrachteten Zeiträume auf. Betrachtet man den kürzesten Zeitraum von 1995 bis 2013, so sind es lediglich die Pegel LT Alte Weser-Roter Sand ( $7,1 \pm 5,8$  mm/a), Büsum ( $6,4 \pm 5,9$  mm/a) und Wilhelmshaven

( $5,2 \pm 4,9$  mm/a) die einem starken Anstieg des MTnw aufweisen. Wiederum konnten an den Pegeln Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Bremerhaven und Dagebüll innerhalb der längeren Zeitperioden 1940 bis 2013 und/oder 1958 bis 2013 deutliche Trends des MTnw von  $-2,0$  bis  $-2,5$  [mm/a] festgestellt werden.

Abhängig von den mittleren Tidewasserständen und insbesondere durch die teilweise starke Veränderung des MTnw verursacht, konnten auch für das MThb gravierende Veränderungen innerhalb der einzelnen Zeiträume festgestellt werden. Die stärksten Entwicklungen innerhalb der langjährigen Zeitabschnitte ab 1940 bzw. 1958 bis 2013 lassen sich an den Pegeln Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Bremerhaven und Dagebüll mit einem Anstieg  $5,9$  bis zu  $7,2$  [mm/a] feststellen. Eine deutliche Abnahme des MThb hingegen wurde an den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft ( $-2,5 \pm 2,2$  mm/a) und Büsum ( $-6,0 \pm 2,4$  mm/a) seit 1977 bzw. 1955 beobachtet.

Während sich das MThw über den gemeinsamen Untersuchungszeitraum von 1940 bis 2013 signifikant von  $2,2$  auf  $4,7$  mm pro Jahr erhöht hat, konnten steigende sowie abnehmende und stagnierende MTnw während des Untersuchungszeitraums beobachtet werden (vgl. Tabelle 1). Ähnlich wie bei der Entwicklung des MThw sind auch die MThb zwischen  $1,3$  und  $6,0$  mm pro Jahr gestiegen. Die einzige Ausnahme bildet der Pegel Büsum, an dem aufgrund des gleichzeitigen Anstiegs von MTnw und MThw kein signifikanter linearer Trend des MThb festgestellt werden kann.

Tabelle 1: Lineare Trends und  $2\text{-}\sigma$  Standardfehler der Tideparameter im Untersuchungsgebiet innerhalb des gemeinsamen Zeitraums 1940 bis 2013 in [mm/a]; rot: negative lineare Trends, grau: nicht signifikante mittlere Veränderungen.

1940 bis 2013		MThw	MTnw	MThb	
Pegel		Trend [mm/a]	Trend [mm/a]	Trend [mm/a]	
NL	Delfzijl	$4,0 \pm 0,9$	$-2,0 \pm 0,8$	$6,0 \pm 2,0$	
Deutsche Bucht	Niedersachsen	Borkum Südstrands	$2,3 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,9$
		Norderney Riffgat und Hafen	$2,2 \pm 0,6$	$0,3 \pm 0,8$	$1,9 \pm 1,2$
		Helgoland Binnenhafen	$2,5 \pm 0,8$	$1,1 \pm 1,1$	$1,4 \pm 1,0$
		LT Alte Weser-Roter Sand	$2,5 \pm 0,7$	$1,0 \pm 0,9$	$1,5 \pm 1,0$
		Wilhelmshaven Alter Vorhafen	$3,9 \pm 0,7$	$0,7 \pm 0,8$	$3,2 \pm 1,1$
		Bremerhaven	$3,7 \pm 0,8$	$-2,2 \pm 0,9$	$5,9 \pm 1,2$
		Cuxhaven Steubenhöft	$2,9 \pm 0,7$	$0,8 \pm 1,1$	$2,1 \pm 1,8$
	Schleswig-Holstein	Büsum	$2,9 \pm 0,8$	$2,6 \pm 1,0$	$0,4 \pm 1,4$
		Husum	$4,0 \pm 0,8$	$-0,4 \pm 1,2$	$4,3 \pm 1,1$
		Wittdün	$4,1 \pm 0,7$	$-0,4 \pm 1,1$	$4,4 \pm 1,2$
Dagebüll		$4,7 \pm 0,7$	$-2,5 \pm 1,5$	$7,2 \pm 1,6$	
Hörnum		$4,0 \pm 0,7$	$0,1 \pm 1,0$	$3,9 \pm 0,9$	
List	$3,1 \pm 0,6$	$0,5 \pm 0,9$	$2,6 \pm 0,7$		
DK	Esbjerg	$4,9 \pm 1,1$	$1,7 \pm 1,4$	$3,2 \pm 0,8$	

Um mögliche räumliche Muster bei der Veränderung der MThw- und MThb-Zeitreihen zu erkennen, wurden Mittelwerte der linearen Trends separat für die Küste Niedersachsens (Pegel Borkum Südstrand bis Cuxhaven Steubenhöft) und Schleswig-Holsteins (Pegel Büsum bis List) berechnet. Dabei wurden an der Küste Schleswig-Holsteins

deutlich stärkere Anstiege im MThw und MThb festgestellt (vgl. Tabelle 2). Die räumlich differenzierte Entwicklung im Untersuchungsgebiet wird noch deutlicher, wenn die Pegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum im Übergangsbereich der beiden Küstenabschnitte von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Folglich gibt es an der niedersächsischen Küste einen durchschnittlichen Anstieg des MThw von  $2,9 \pm 0,6$  und des MThb von  $2,6 \pm 1,1$  [mm/a] und an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste einen größeren mittleren Anstieg des MThw von  $4,0 \pm 0,7$  und des MThb von  $4,5 \pm 1,1$  [mm/a]. Ein ähnliches Muster kann für die MTnw im Untersuchungsgebiet nicht abgeleitet werden, da eine große Anzahl der Pegelstandorte keine signifikanten Trends aufweisen. Der Trend der MTnw variiert zwischen  $-2,5$  und  $2,6$  [mm/a] über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Tabelle 2: Mittelwerte der linearen Trends in [mm/a] von MThw und MThb an der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küste mit und ohne die Tidepegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum (1940–2013).

Küstenabschnitt	MThw Ø Trend [mm/a]	MThb Ø Trend [mm/a]
Niedersachsen (Borkum Südstrand bis Cuxhaven Steubenhöft)	$2,9 \pm 0,6$	$2,5 \pm 1,1$
Niedersachsen (Borkum Südstrand bis Bremerhaven)	$2,9 \pm 0,6$	$2,6 \pm 1,0$
Schleswig-Holstein (Büsum bis List)	$3,8 \pm 0,7$	$3,8 \pm 1,2$
Schleswig-Holstein (Husum bis List)	$4,0 \pm 0,7$	$4,5 \pm 1,1$

## 5.2 Nichtlineare Trends

Aufgrund der unterschiedlichen linearen Trends für verschiedene Zeitperioden (vgl. Abschnitt 5.1) wird zusätzlich die nichtlineare Entwicklung der Zeitreihen untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der nichtlinearen Trendanalysen vorgestellt. Ein Augenmerk der Analyse liegt auf der Untersuchung der nichtlinearen Trendraten (in [mm/a]) in Hinblick auf eine potentielle Beschleunigung dieser.

Verfahrensbedingt benötigt die Berechnung der nichtlinearen Trends lückenlos Zeitreihen mit äquidistanten Beobachtungswerten. Unsere Datengrundlage weist allerdings an einigen der Pegel Lücken in den Aufzeichnungszeitreihen auf (vgl. Abbildung 2 2). Um aufgrund vereinzelter fehlender Werte in bspw. der Mitte einer vorhandenen Zeitreihe nicht auf die Hälfte unserer Informationen verzichten zu müssen, wurden einzelne Datenlücken auch hier durch das Kriging geschlossen. Interpoliert wurden hier einzelne Jahreswerte, wenn ein Aufzeichnungswert im Vor- und Nachfolgejahr vorhanden ist. Es ist davon auszugehen, dass vereinzelt interpolierte Jahreswerte die Ergebnisse der Analyse nicht signifikant beeinflussen. Ergänzt wurden somit die folgenden Jahreswerte an den angegebenen Pegelstandorten:

- Büsum (MTnw, MThw und MThb): 1945
- Esbjerg (MTnw, MThw und MThb): 1935, 1978, 1982, 1984 und 1990

Zeitreihen, die eine mehrjährige Datenlücke aufweisen, werden erst ab dem Jahr nach einer solchen Lücke in der nichtlinearen Trendanalyse berücksichtigt.

Die Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse, die sich bei der Glättung der MThb Zeitreihen mit einer gewählten Fensterlänge von 18 Jahren im Untersuchungsgebiet ergeben. Zusätzlich sind die zugehörigen Trendraten nach Bildung der ersten Ableitung dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Trendraten immer wieder Phasen von höheren und niedrigeren Raten durchlaufen. An allen Pegeln mit einer ausreichenden Zeitreihenlänge ist jedoch eine deutliche Beschleunigung ab den 1940er Jahren zu erkennen. Ab den 1940er bis 1950er Jahren liegen an allen Pegeln ausschließlich positive Trendraten vor, die an einigen Pegeln zuvor noch negativ waren. Die Beschleunigung der positiven Trendraten ab 1940 hält bis etwa 1970 an und flacht danach an den untersuchten Pegeln ab. Besonders an der Küste Schleswig-Holsteins lassen sich vermehrt ab den 2000er Jahren negative Raten feststellen und eine gleichzeitig eher abflachende Kurve. An den Pegeln Büsum und Cuxhaven verläuft die Trendrate bereits ab Anfang / Mitte der 1980er Jahre negativ.

Die Ergebnisse der nichtlinearen Trendanalyse der MTnw-Zeitserien sind der Abbildung 34 (im Anhang A.2) zu entnehmen. Auch hier kann eine starke Variation sowohl mit der Zeit als auch über das Untersuchungsgebiet festgestellt werden. So kommt es an vielen Pegelstandorten zu einem ständigen Wechsel zwischen positiven und negativen Beschleunigungen des Trends, aber es lassen sich auch Abschnitte mit nahezu keinen Änderungen erkennen. Trotz der hohen Variation lassen sich leichte Unterschiede zwischen den Küstenabschnitten Niedersachsen und Schleswig-Holstein ableiten. Während die nichtlinearen Trends an der Küste Schleswig-Holsteins in etwa zwischen 1940 und 1960 negativ verlaufen, lassen sich negative Trends an der Küste Niedersachsens etwas später zwischen 1960 und 1980 feststellen. Über das gesamte Untersuchungsgebiet hingegen verlaufen die nichtlinearen Trends gegen Ende des Untersuchungszeitraums eher gedämpft und ohne wesentliche Änderungen. Nahezu stagnierende Niedrigwasserstände lassen sich erkennen. Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass verfahrensbedingt die Unsicherheiten am Anfang und am Ende der Zeitreihen größer sind und eine Aussage über stagnierende MTnw-Zeitserien ab etwa 2000 bis 2010 mit hohen Unsicherheiten behaftet ist.

Die Ergebnisse der nichtlinearen Trendanalyse der MThw-Zeitserien sind der Abbildung 35 (im Anhang A.2) zu entnehmen. Zu erkennen ist, dass Zeitserien mit langjährigen Aufzeichnungen bis Mitte/Ende 19. Jhd. (Delfzijl, Cuxhaven Steubenhöft und Esbjerg Havn) bis zu den 1940er Jahren keine große Schwankung der Trendrate aufweisen und diese nahezu durchgängig im positiven Bereich verlaufen. Ab den 1940er bis 1960er Jahren stellt sich an den meisten der untersuchten Pegel plötzlich eine Beschleunigung des Anstiegs ein. Dieser beschleunigte Anstieg des MThw hält überwiegend rund 20 Jahre an und besonders an den Pegeln Delfzijl und Esbjerg Havn darüber hinaus. Auf den beschleunigten Anstieg folgt an einer Vielzahl der Pegel ein rasches Abfallen der Trendraten des MThw bis um die 2000er Jahre, jedoch weiterhin im positiven Bereich. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums scheint die Entwicklung des MThw zu stagnieren und die Trendraten verändern sich kaum.

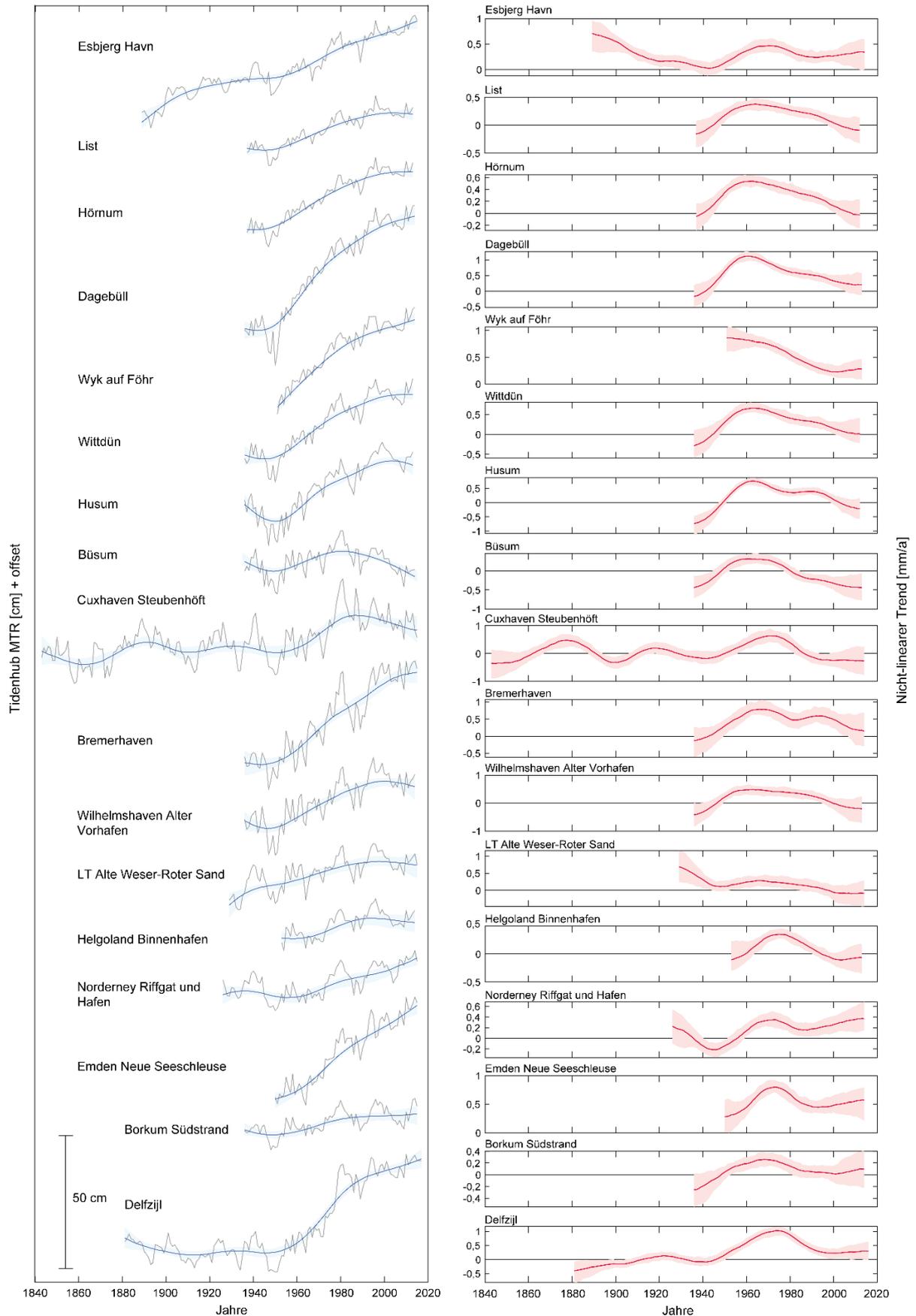


Abbildung 7: Nichtlineare Trends der MThb-Zeitreihen an ausgewählten Pegelstandorten; links: Darstellung der Zeitreihen mit nichtlinearen Trends; rechts: Darstellung der Trendraten in [mm/a].

## 6 Hauptkomponentenanalyse

Mit Hilfe der PCA wird die erste gemeinsame Hauptkomponente der Tidenkennwerte aller zur Verfügung stehenden Pegelzeitreihen bestimmt. Untersucht wurden die jährlichen Mittelwerte MTnw, MThw und MThb. Abbildung 8 zeigt die errechneten ersten beiden Hauptkomponenten der untersuchten Tideparameter mit den zugehörigen Koeffizienten der einzelnen Tidepegelstandorte. Zur Rekonstruktion werden die ermittelten Hauptkomponenten mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert. Zusätzlich wird der Mittelwert der Ausgangszeitreihe zur Rekonstruktion addiert, um die Rekonstruktion auf das entsprechende Höhenniveau der Ausgangszeitreihe zu setzen. Dies ist notwendig, weil die PCA den Mittelwert im Verfahren nicht abbilden kann. Da die Koeffizienten nicht einheitlich über das Untersuchungsgebiet positiv oder negativ ausfallen, müssen diese bei der Auswertung der Hauptkomponenten und deren Effekt auf den Gesamtwasserstand mitberücksichtigt werden.

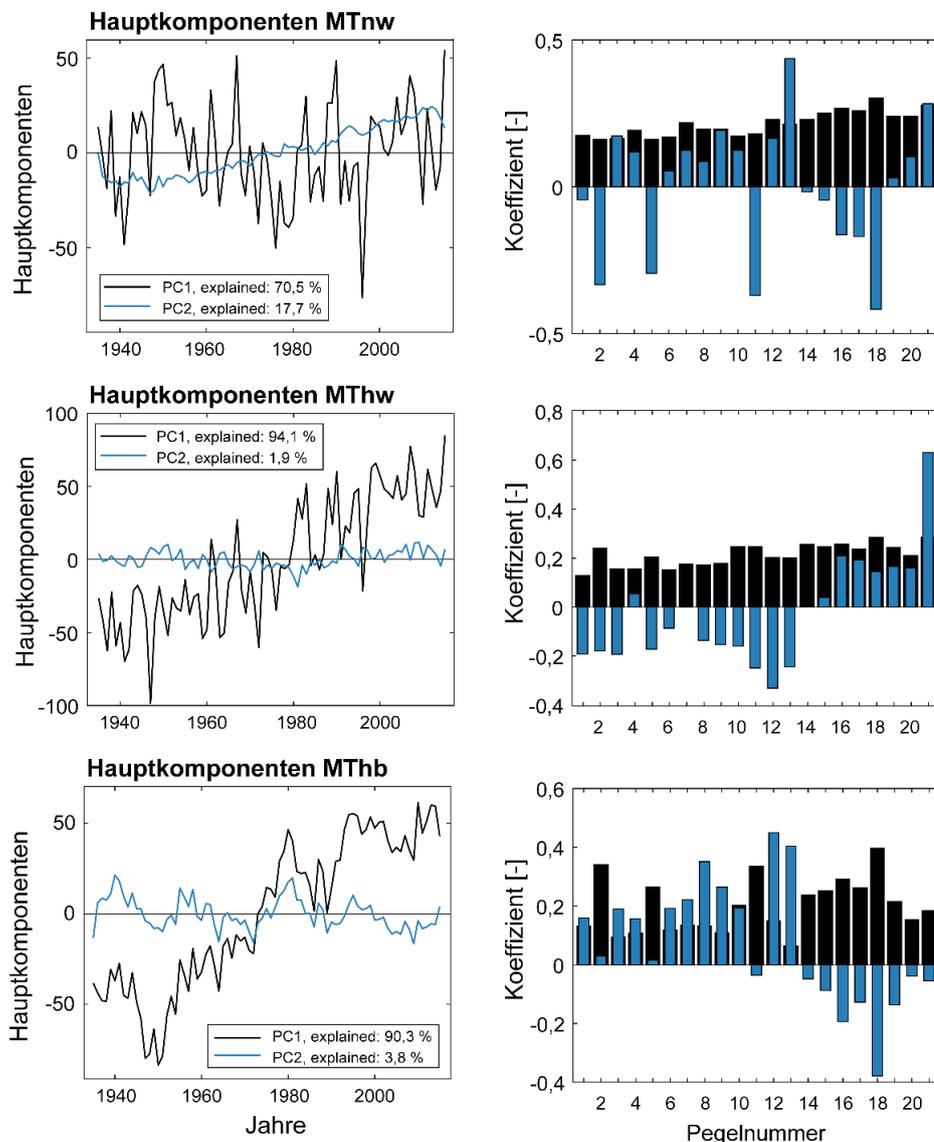


Abbildung 8: Linke Spalte: Die ersten beiden Hauptkomponenten (PC) für die MTnw-, MThw-, und MThb-Zeitreihe aller betrachteten Tidepegel; Rechte Spalte: Koeffizienten der ersten beiden PCs aller betrachteten Tidepegel, schwarze Balken: Koeffizienten PC1 und blaue Balken: Koeffizienten PC2.

Die Koeffizienten der PC1 des MTnw fallen ausnahmslos positiv aus und weisen lediglich eine leicht variierende Ausprägung auf (vgl. Abbildung 8). Zudem schwankt die erste Hauptkomponente stark um null und wie Tabelle 3 zu entnehmen ist, enthält sie keinen signifikanten linearen Trend. Daraus lässt sich ableiten, dass PC1 die hohe gemeinsame Variabilität des MTnw im Untersuchungsgebiet abbildet und gleichzeitig keine mittlere Veränderung (nicht signifikanter linearer Trend) beschreibt, wie sie auch in den Beobachtungszeitreihen nicht zu vorhanden ist. Im Gegensatz dazu enthält die zweite Hauptkomponente eine signifikante lineare Zunahme. Durch die positiven Koeffizienten an einer Vielzahl der untersuchten Tidepegel ist der Anteil der 2. PC an diesen Pegeln positiv bzw. trägt zu einer Erhöhung des Gesamtsignals bei. An den Pegeln mit negativen Koeffizienten führt dies hingegen zu einer Reduzierung des MTnw. Bereits die deutlich variierende Ausprägung der Koeffizienten der PC2 ist ein Hinweis darauf, dass die PC2 lokale Effekte abbildet. Die PC2 trägt somit an den Pegeln Büsum und Esbjerg zu einer Verstärkung des Anstiegs, an den Pegeln Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Bremerhaven und Dagebüll wiederum zu einer Dämpfung bzw. einer Reduzierung des MTnw bei.

Tabelle 3: Qualitative Veränderung der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb im Untersuchungsgebiet; o: kein signifikanter linearer Trend; +: signifikanter positiver linearer Trend.

	Qualitative Veränderung der Hauptkomponenten PC1 & PC2		
	MLW	MHW	MTR
PC1	o	+	+
PC2	+	o	o

Die erste Hauptkomponente des MThw weist einen positiven signifikanten linearen Trend auf und beschreibt mit ausschließlich positiven Koeffizienten eine gemeinsame Zunahme des MThw. Zudem wird über die PC1 bereits 94,1 % der Variabilität durch dieses gemeinsame Signal abgebildet. Die PC2 hingegen weist stark variierende Koeffizienten und gleichzeitig keine signifikante mittlere Veränderung (linearer Trend) auf. Auch ist augenscheinlich keine so ausgeprägte Variabilität in der zweiten Hauptkomponente zu entdecken. Die niedrigeren PCs scheinen somit die lokal variierenden Abweichungen der Entwicklung des MThw vom Gesamtsignal abzubilden, wobei der PC2 hier der größte Anteil zugeordnet werden kann. Betrachtet man die Koeffizienten und die ermittelten erklärten Varianzen, so weist die zweite Hauptkomponenten mit Ausnahme an den Pegeln Esbjerg, Bremerhaven, Cuxhaven Steubenhöft und Büsum eher einen geringen Anteil an der Variabilität des Gesamtsignals auf.

Das MThb weist ebenfalls im gemeinsamen Signal (PC1) einen signifikanten linearen Anstieg auf. Die PC2 hingegen verläuft augenscheinlich leicht negativ, allerdings lässt sich hier kein signifikanter Trend ermitteln. Durch die ausschließlich positiven Koeffizienten und dem großen Anteil erklärter Varianz (90,3 %) im Untersuchungsgebiet führt die erste Hauptkomponente zu einem nahezu einheitlichen Anstieg des MThb. Die positiven Koeffizienten der PC2 insbesondere an der Küste Niedersachsens verursacht hingegen eine Dämpfung dieses Anstiegs. An der Küste Schleswig-Holsteins wie-

derrum wird der gesamtheitliche Anstieg zusätzlich durch das lokale Signal (PC2) verstärkt. Eine Ausnahme bildet lediglich der Pegel Büsum (Nr. 13), an dem die Überlagerung beider Hauptkomponenten keine Änderung hervorruft.

In Abbildung 9 ist weiterführend die räumliche Verteilung der erklärten Varianz durch die ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb abgebildet. Deutlich zu erkennen ist, dass die Verteilung der erklärten Varianz der PC1 im Fall des MThw sehr einheitlich über das Untersuchungs-gebiet verläuft. Während über 90 % der Variabilität bereits durch die erste Hauptkomponente abgebildet wird, werden nur noch bis zu etwa 10 % durch die zweite Hauptkomponente beschrieben. Bereits hier lässt sich die These ableiten, dass das MThw durch ein gemeinsames Signal geprägt ist und weniger sensibel auf lokale Effekte reagiert. Wesentlich inhomogener fällt die räumliche Verteilung der erklärten Varianz der beiden Hauptkomponenten des MThb und besonders des MTnw aus. Während an einer Vielzahl der Pegel ebenfalls eine hohe erklärte Varianz der PC1 festzustellen ist, sind es vereinzelte Pegel, an denen diese wesentlich geringer ausfällt. Hier sind besonders die Tidepegel Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Cuxhaven, Büsum und Dagebüll zu nennen. Dies liefert einen Hinweis darauf, dass lokale Effekte eine größere Wirkung auf das MTnw besitzen und diese Abweichungen vom gemeinsamen Signal eher lokal beschränkt sind.

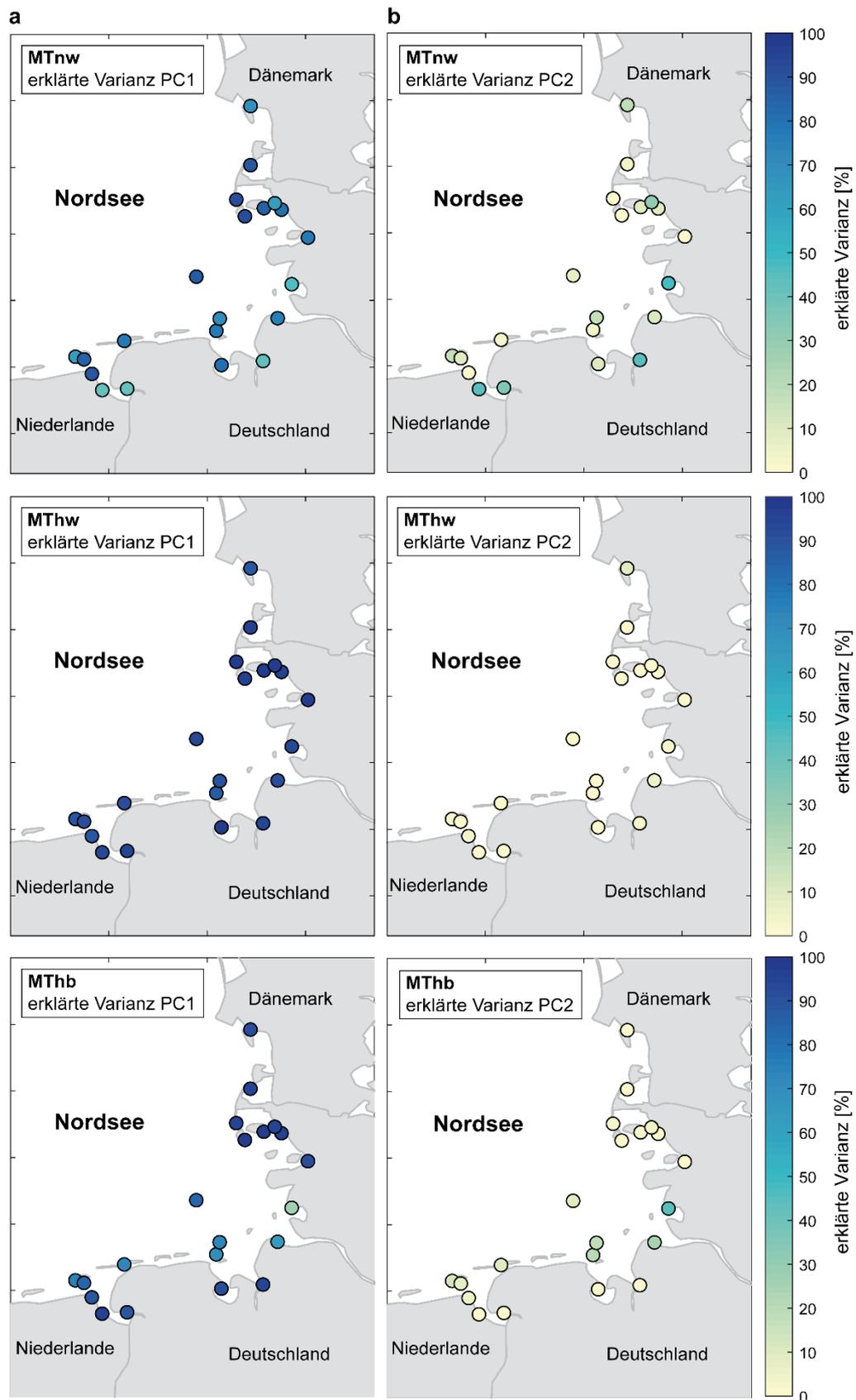


Abbildung 9: Räumliche Verteilung der erklärten Varianz der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb entlang der Nordseeküste (a) Erklärte Varianz in [%] der PC1 an den untersuchten Pegelstandorten (b) Erklärte Varianz in [%] der PC2 an den untersuchten Pegelstandorten.

## 7 Standortspezifische Veränderungen und potentielle Ursachen

Änderungen im MThb lassen sich durch die Entwicklung der Tidewasserstände erklären. Aufgrund dessen werden für jeden Pegel die Veränderungen und Bruchpunkte aller drei untersuchten Parameter (MTnw, MThw und MThb) und deren Differenzzeitreihen gemeinsam betrachtet. Zusätzlich werden Trenduntersuchungen der durch signifikante Bruchpunkte entstandene Teilzeitreihen durchgeführt, um Aussagen abzuleiten, wie ein potentieller lokaler Effekt die Tideparameter beeinflusst hat. Zudem werden potentielle Ursachen der Bruchpunkte diskutiert und physikalische Begründungen herausgearbeitet.

### 7.1 Eemshaven

Am Pegel Eemshaven im Mündungsbereich der Ems konnten weder in den Zeitreihen der Tidewasserstände noch im MThb im Zeitraum von 1995 bis 2013 ein signifikanter linearer Trend festgestellt werden (vgl. Abbildung 10). Zudem lassen sich durch die Bruchpunktanalyse auch keine un stetigen Veränderungen detektieren. Die Tatsache, dass weder stetige noch un stetige signifikante Veränderungen festgestellt werden können, kann zweierlei Ursachen haben. Einerseits kann es sein, dass sich die Tidedynamik am Pegel Eemshaven tatsächlich nicht verändert hat. Andererseits sind die Zeitreihen relativ kurz und umfassen lediglich einen gesamten Nodaltidezyklus von 19 Jahren, wodurch eine sichere Aussage zu längerfristigen Entwicklungen und das detektieren von Bruchpunkten eingeschränkt ist.

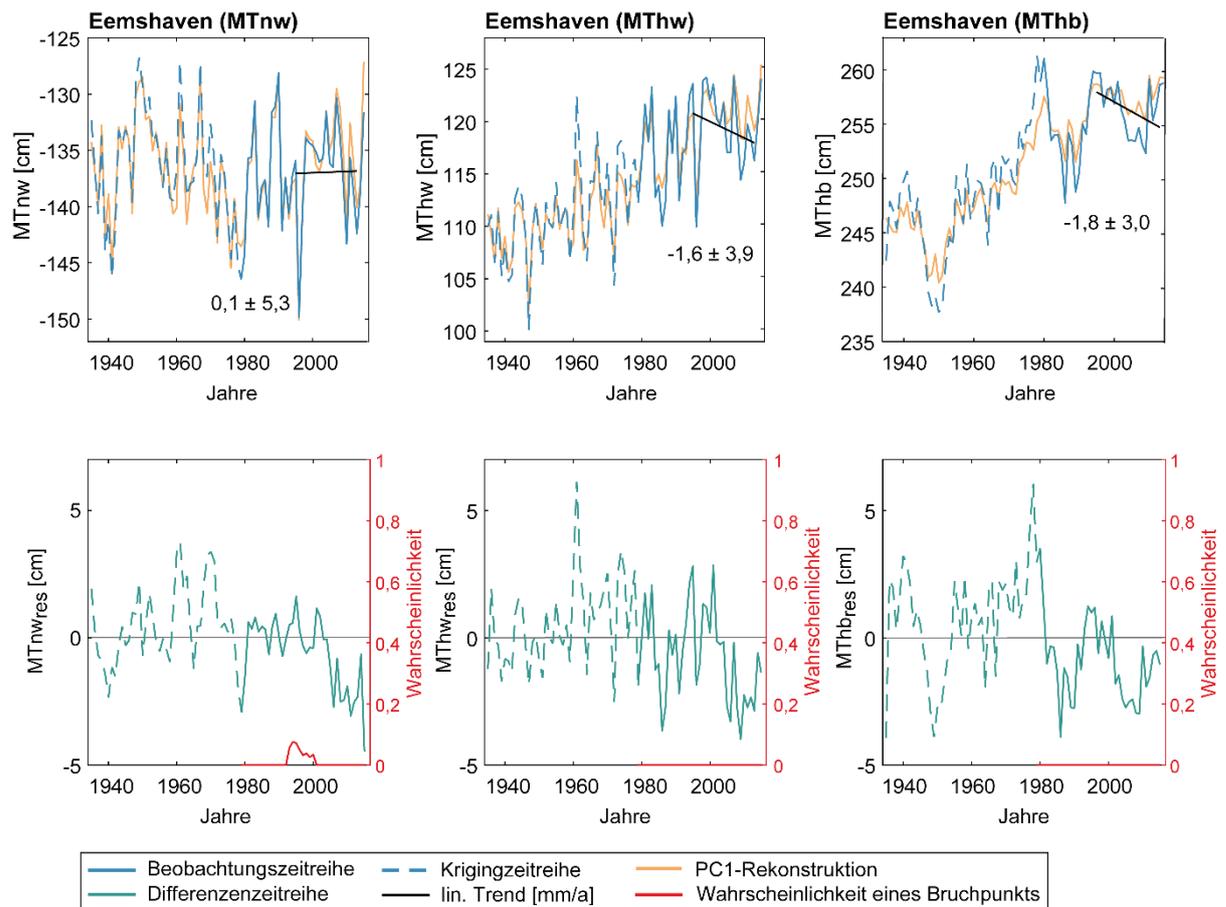


Abbildung 10: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Eemshaven (NL).

## 7.2 Delfzijl

Am Pegel Delfzijl an der Emsmündung ist das MTnw zwischen 1940 und 2013 um  $-2,0 \pm 0,8$  [mm/a] gesunken, während das MThw um  $4,0 \pm 0,9$  [mm/a] angestiegen ist. Demzufolge lässt sich hier ein Anstieg des MThb um  $6,0 \pm 1,9$  [mm/a] ermitteln (vgl. Abbildung 11). Zudem konnten in den Differenzzeitreihen des MTnw und des MThb jeweils ein signifikanter Bruchpunkt ermittelt werden. Die Differenzzeitreihe des MTnw weist einen Bruchpunkt im Jahr 1976 (95%-Vertrauensbereich: 1975–1978) und die des MThb im Jahr 1978 (98,2%) auf. Aber auch das MThw scheint nicht gänzlich unbeeinflusst, da auch hier im Jahr 1978 die Wahrscheinlichkeit auf einen Bruchpunkt auf 70,4% ansteigt, diese jedoch nicht als signifikant bewertet werden kann.

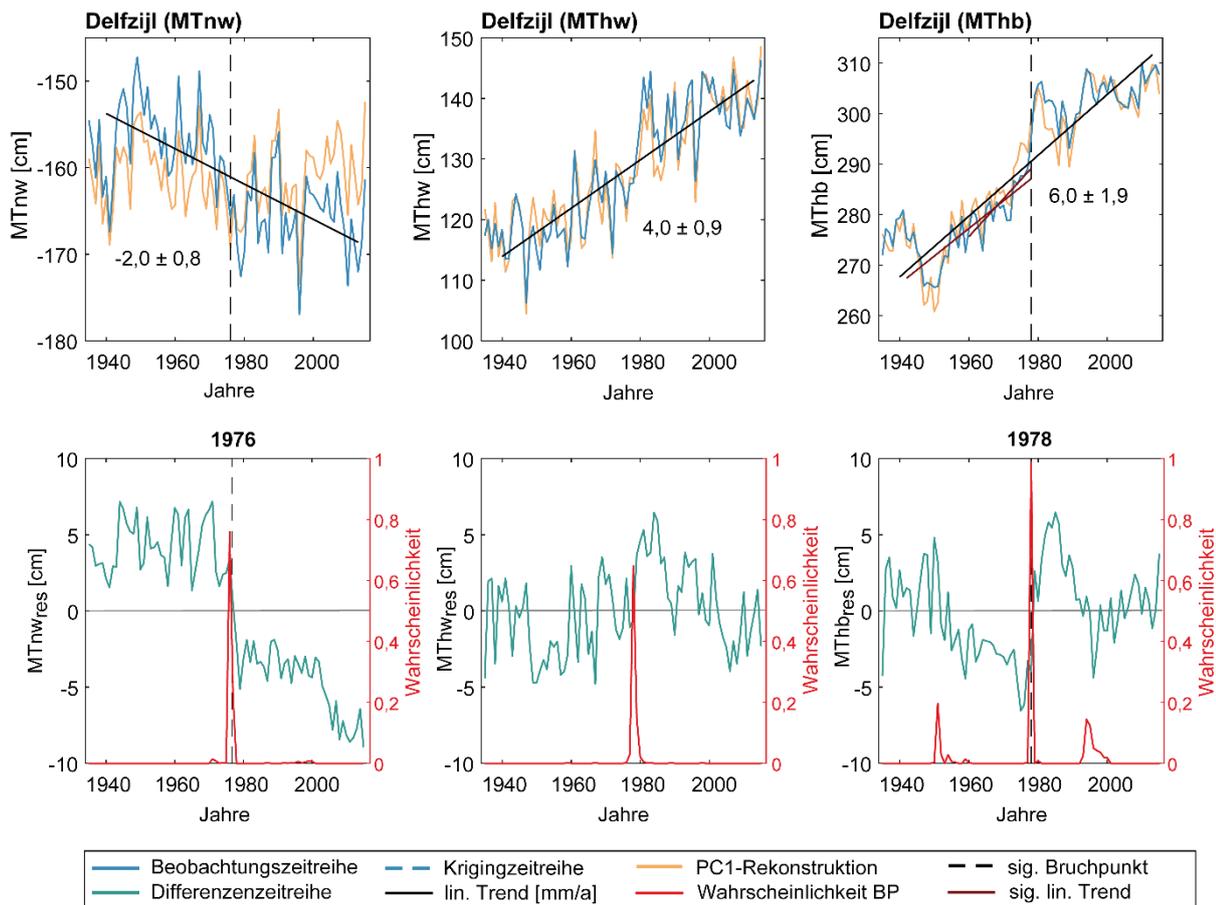


Abbildung 11: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Delfzijl (NL).

Bei der Ermittlung der Ursachen für die Bruchpunkte ist zunächst auf die Untersuchungen von Hollebrandse (2005) zu verweisen. Hier werden absinkende MTnw im Zeitraum zwischen 1970 bis 1980 aufgrund von Hafenumbauarbeiten geschildert. Auch die hier durchgeführten Analysen zeigen ein wesentlich geringeres MTnw nach dem Bruchpunkt in den 1970er Jahren. Des Weiteren beschreibt Rakhorst (2003), dass die Umbauarbeiten am Hafen Delfzijl den Tidehub beeinflusst haben. Auch dieses Phänomen kann durch den Bruchpunkt im Jahr 1978 bestätigt werden. Sowohl das plötzliche Absinken des MTnw als auch der gleichzeitige Anstieg des MThb lassen die Schlussfolgerung zu, dass die von Hollebrandse (2005) und Rakhorst (2003) beschriebene Maßnahme für die Veränderungen im MTnw und im MThb ursächlich ist und zu dem negativen linearen Trend im MTnw und dem starken Anstieg des MThb geführt hat. Um die Zuordnung von Ursache und Auswirkung plausibilisieren zu können, sind weitere Information bezüglich der Umbaumaßnahme notwendig. Das MThw scheint deutlich weniger von der Umbaumaßnahme beeinflusst und der positive lineare Trend vordergründig von den gemeinsamen Anteilen der Entwicklungen angetrieben.

### 7.3 Borkum Südstrand

Alle drei Tideparameter am Pegel Borkum Südstrand, auf der größten ostfriesischen Insel Borkum, weisen im Zeitraum von 1940 bis 2013 einen signifikanten linearen Trend auf. Dabei ist das MThw mit  $2,3 \pm 0,6$  mm pro Jahr am schnellsten angestiegen und das MTnw verzeichnet mit  $1,0 \pm 0,8$  [mm/a] eine geringst Zunahme (vgl. Abbildung 12). Zudem konnte für das MTnw im Jahr 1965 ein signifikanter Bruchpunkt (95%-Vertrauensbereich: 1958–1974) ermittelt werden und für das MThw ein Bruchpunkt im Jahr 1970 (95%-Vertrauensbereich: 1967–1983). Vor dem Bruchpunkt steigt die Differenz zwischen dem beobachteten MThw und dem gemeinsamen Signal stetig an und fällt wiederrum nach dem Bruchpunkt ab. Folglich scheint eine unstetige Veränderung eingetreten zu sein, die den Anstieg des MThw dämpft, doch ist dieser Effekt nicht groß genug, um das gemeinsame ansteigende Signal zu überlagern. Im MTnw reduziert sich die Differenz der Beobachtungszeitreihe zum gemeinsamen Signal bis zum Bruchpunkt im Jahr 1965 auf etwa Null, erhöht sich anschließend und verläuft bis zum Ende des Untersuchungszeitraums nahezu gleichbleibend. Vergleicht man dies mit der beobachteten Veränderung, so scheint der Bruchpunkt bzw. dessen Ursache Auslöser für das stagnierende Verhalten des MTnw ab den 1960er Jahren zu sein und der vorher stattgefundenen Anstieg wird überlagert.

Als potentielle Ursache für die unstetige Veränderung können hier die von 1952 bis 1972 stattgefundenen Vertiefungen der Außenems und des Emders Fahrwassers genannt werden (BAW, 2014), da sich die 95%-Vertrauensbereiche der beiden festgestellten Bruchpunkte mit den Ausbaumaßnahmen überschneiden. Allerdings lässt sich diese These nicht mit den grundsätzlichen physikalischen Auswirkungen von Vertiefungsmaßnahmen (vgl. u. a. Niemeyer, 1999) bestätigen. In der Regel führen Vertiefungen demnach zu stark absinken Niedrigwasserständen und leicht zunehmenden Hochwasserständen. Keines der beiden genannten Phänomene konnte am Pegel Borkum Südstrand festgestellt werden und stattdessen stagniert des MTnw nach dem Bruchpunkten und das MThw steigt nach dem Bruchpunkt in ähnlichem Maße wie zuvor. Für die festgestellte Änderung der mittleren Wasserstände konnte im Rahmen dieses Projekts keine physikalisch begründbare Ursache gefunden werden.

Für das MThb konnte ein leichter Anstieg von  $1,3 \pm 0,9$  [mm/a] festgestellt werden, der daraus resultiert, dass beide Tidewasserstände angestiegen sind, wobei das MThw jedoch in stärkerem Maße zugenommen hat. Ein lokaler Effekt mit Auswirkung auf das MThb am Pegel Borkum Südstrand konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, da weder Bruchpunkte noch signifikante mittlere Änderungen in der Differenzzeitreihe festzustellen sind.

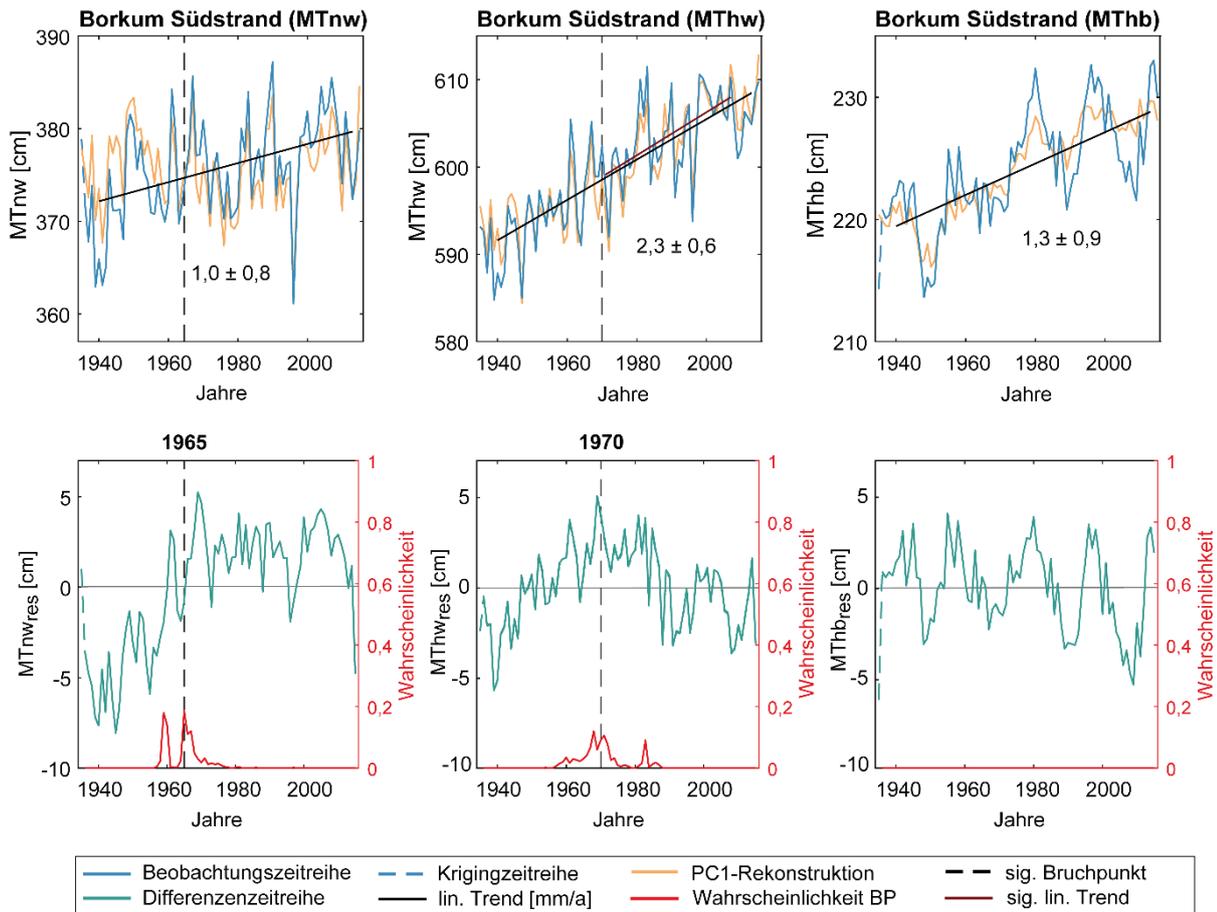


Abbildung 12: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Borkum Südstrand.

## 7.4 Borkum Fischerbalje

Der Pegel Borkum Fischerbalje, ebenfalls auf der Insel Borkum zwischen den beiden Mündungsarmen des Emsästuars, weist kürzere Beobachtungszeitreihen als der gemeinsame Untersuchungszeitraum auf. Die Bestimmung der linearen Trends sowie die Bruchpunktanalyse beschränken sich somit auf den Zeitraum ab Mitte der 1960er Jahre bis 2013. Seit Ende der 1970er Jahre konnte eine Zunahme der Tidewasserstände beobachtet werden (vgl. Abbildung 13). Während das MTnw mit  $2,4 \pm 2,0$  [mm/a] angestiegen ist, hat das MThw eine größere Zunahme von  $3,3 \pm 1,3$  [mm/a] erfahren. Da beide Tidewasserstände gleichzeitig in ähnlichem Maße angestiegen sind, hat sich auch deren Differenz kaum verändert und folglich kann kein signifikanter Trend im MThb bestimmt werden.

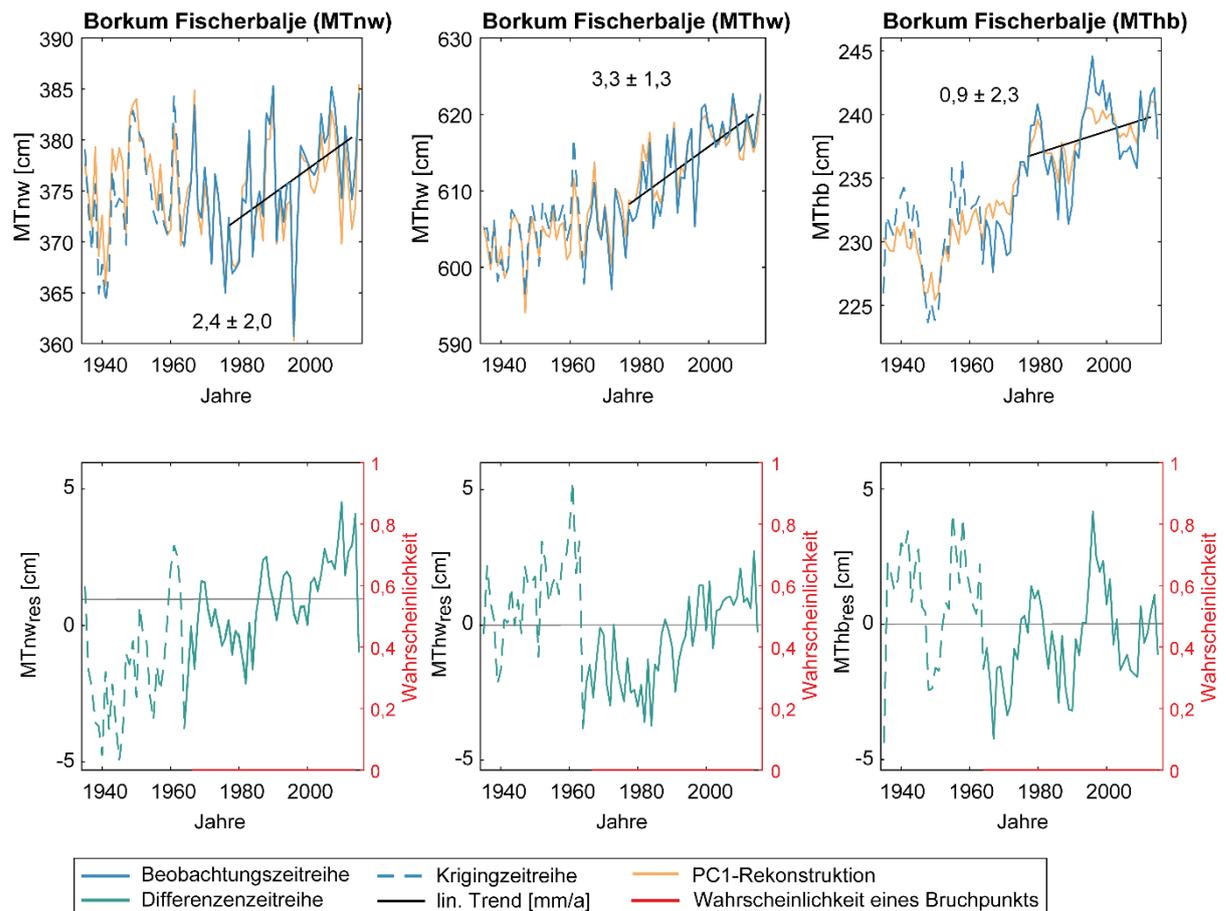


Abbildung 13: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Borkum Fischerbalje

Keine der drei Differenzzeitreihen weist zudem einen Bruchpunkt auf. Dies kann einerseits verfahrensbedingt an der relativ kurzen Aufzeichnungslänge liegen oder aber, die Zeitreihen weisen tatsächlich keine un stetige Veränderung auf. Die kontinuierlich ansteigende Differenz zwischen der Beobachtungszeitreihe und dem gemeinsamen Anteil des MTnw deutet jedoch darauf hin, dass längerfristige lokale Effekte zu dem Anstieg des MTnw beigetragen haben. Gleiches lässt sich auch im Fall des MThw feststellen und die Beobachtungszeitreihe steigt etwas schneller als der gemeinsame Anteil der Entwicklung. Da sich die Differenzzeitreihen der beiden Tidewasserstände ebenfalls ähnlich verhalten, kann wiederum auch weder im gemeinsamen noch im lokalen Anteil des MThb eine wesentliche Änderung festgestellt werden. Beide Wasserstände scheinen also durch einen lokalen Effekt eine Verstärkung des gemeinsamen Anstiegs erfahren zu haben. Durch die relativ kurze Zeitreihenlänge und keinem signifikanten Bruchpunkt kann der ansteigenden Entwicklung der Wasserstände kein eindeutiger Startpunkt zugeordnet werden. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, für diesen Tidepegel eine Aussage zu treffen, welche Ursache der lokalen Beeinflussung zugrunde liegt.

## 7.5 Emden Neue Seeschleuse

Der Pegel Emden Neue Seeschleuse liegt im Mündungsbereich der Ems, nördlich der Dollart Bucht und ist geprägt und von einer deutlichen Zunahme der Tidedynamik seit den 1950er Jahre, in denen die Wasserstandsaufzeichnungen des Pegels beginnen. So ist das MTnw um  $-2,4 \pm 1,0$  [mm/a] gesunken, während das MThw um  $3,6 \pm 1,1$  [mm/a] angestiegen ist (vgl. Abbildung 14). Neben den beobachteten Zeitreihen, konnten auch Veränderungen in der Differenzenzeitreihe des MTnw und des MThb festgestellt werden. So weisen die Differenzen zwischen der Beobachtung und des gemeinsamen Signals im MTnw und MThb jeweils einen signifikanten Bruchpunkt im Jahr 1965 auf. Auf den Bruchpunkt folgt ein rapider Anstieg der Differenz und während das gemeinsame Signal nahezu unverändert bleibt, sinkt das MTnw deutlich ab. Die Ursache des Bruchpunkts hat folglich dazu geführt, dass die stagnierende Entwicklung des gemeinsamen Signals mit einem sinkenden lokalen Anteil überlagert wurde und folglich zu sinkenden MTnw führte. Das Absinken im MTnw hat dazu beigetragen, dass der gemeinsame Anstieg im MThb durch einen lokalen Effekt verstärkt wurde und das beobachtete MThb um  $6,0 \pm 1,3$  [mm/a] schneller angestiegen ist als der gemeinsame Anteil an der Entwicklung.

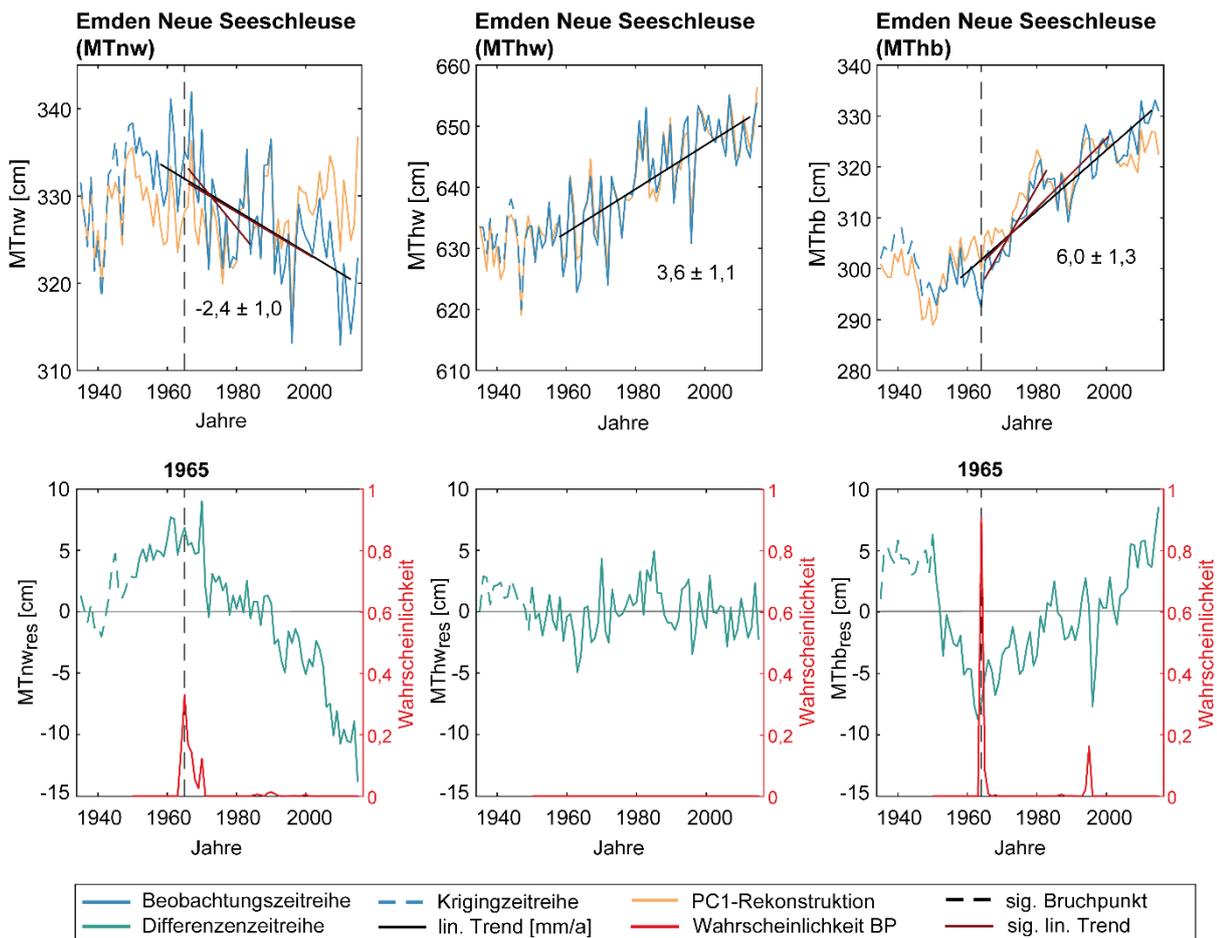


Abbildung 14: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Emden Neue Seeschleuse.

Den festgestellten unstetigen Veränderungen am Pegel Emden Neue Seeschleuse lässt sich eine potentielle Ursache zuordnen. Zwischen 1958 und 1972 wurde das Fahrwasser

der Außenems vertieft und das Emders Fahrwasser durch Vertiefungsmaßnahmen reguliert (BAW, 2014). Wie u. a. bereits Niemeyer (1999) und Malcherek (2010) beschreiben, führen reine Vertiefungsmaßnahmen in Ästuaren zu einer geringeren Dämpfung der in ein Ästuar einschwingenden Tidewelle und es wird mehr Energie in das Ästuar transportiert. Die Folge dessen ist eine Zunahme des Tidehubs, der insbesondere durch eine starke Absenkung des Niedrigwassers hervorgerufen wird. Aber auch ansteigende Hochwasserstände sind eine wesentliche Folge von Fahrrinnenvertiefungen. Dabei ist die ausbaubedingte relative Veränderung bei Tideniedrigwasser i. d. R. wesentlich größer als im Fall des Tidehochwassers (vgl. u. a. Niemeyer, 1999; Malcherek, 2010). Insbesondere das starke Absinken des MTnw und den Anstieg des MThb konnten in den Zeitreihen festgestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich, aufgrund der angewendeten Untersuchungen und den zugrunde gelegten Annahmen, der Pegel Emden Neue Seeschleuse als stark durch lokale Effekte beeinflusster Pegelstandort beschreiben. Obwohl die ansteigenden MThw nahezu den gemeinsamen großräumigen Veränderungen entsprechen, scheint die deutliche Reduzierung des MTnw und folglich der sehr starke Anstieg des MThb durch die Ausbaumaßnahmen des Emsästuars hervorgerufen zu sein.

## 7.6 Norderney Riffgat und Hafen

Am Pegel Norderney Riffgat und Hafen weist das MTnw innerhalb des Untersuchungszeitraums keinen signifikanten linearen Trend auf (vgl. Abbildung 15). Das MThw hingegen ist um  $2,2 \pm 0,6$  und das MThb um  $1,9 \pm 1,1$  [mm/a] angestiegen. Zudem weist sowohl die Differenzenzeitreihe des MTnw als auch die des MThb jeweils einen signifikanten Bruchpunkt am Pegel Norderney Riffgat und Hafen auf. Im Jahr 1965 wurde im MTnw eine un stetige Veränderung ermittelt, deren 95%-Vertrauensintervall sich über den Zeitraum von 1963 bis 1986 erstreckt. Dadurch ist die genaue Lage der plötzlichen Veränderung relativ ungenau, mit einer Wahrscheinlichkeit von 17,8 % befindet sich jedoch der wahrscheinlichste Bruchpunkt im Jahr 1965. Auch das 95%tige Vertrauensintervall des Bruchpunkts im MThb weist eine ähnlich große Zeitspanne von 1955 bis 1973 mit einer maximalen Wahrscheinlichkeit von 20,6 % im Jahr 1972 auf. Zusätzlich liegen erhöhte Wahrscheinlichkeiten für die Lage eines Bruchpunkts im MThb innerhalb der Jahre 1981 bis 1985 vor, die jedoch nicht als signifikant gewertet werden können.

Betrachtet man nun die sich durch die Bruchpunkte ergebenden Teilzeitreihen, so fällt auf, dass die Beobachtungszeitreihe und das gemeinsame Signal vor dem Bruchpunkt im MTnw sehr ähnlich verlaufen und die Differenz um Null schwankt. Mit dem Bruchpunkt steigt die Differenzenzeitreihe plötzlich an und verläuft anschließend gleichbleibend. Demzufolge hat der Bruchpunkt bzw. der Auslöser des Bruchpunkts im Jahr 1965 dazu geführt, dass die beobachteten MTnw höher ausfallen als das gemeinsame Signal. Vor dem Bruchpunkt im MThb, ab etwa den 1950er Jahren, verläuft das beobachtete MThb nahezu gleichbleibend, während das gemeinsame Signal ansteigt. Nach dem Bruchpunkt wiederum weisen die beiden Zeitreihen einen ähnlichen ansteigenden Verlauf auf. Die Ursache des Bruchpunkts scheint also für eine plötzliche Erhöhung des MThb verantwortlich zu sein.

Die Tideparameter am Pegel Norderney Riffgat und Hafen scheinen nicht nur durch einen einzigen lokalen Effekt beeinflusst, sondern es handelt sich um mehrere potentielle Ursachen, deren Auswirkungen sich überlagern. So könnten die ersten höheren Werte der Wahrscheinlichkeit im MThb in der Mitte der 1950er Jahre durch die Eindeichung der Leybucht und der gleichzeitigen Entstehung des Leybucht-polders im Jahr 1950 verursacht sein (Ohlig, 2005). Ein weiteres Ereignis mit potentiellen Auswirkungen auf den Tidepegel ist die Umstellung des Pegels von Hafen auf Riffgat zu Beginn der 1960er. Auf der Insel Norderney existieren Wasserstandsaufzeichnungen von zwei unterschiedlichen Pegelstandorten und der Pegel Norderney setzt sich aus dem Pegel Norderney Hafen (bis 1963) und aus dem Pegel Norderney Riffgat (seit 1963) zusammen (Wanninger et al., 2009). Vor der Zusammenführung der beiden Zeitreihen wurden Korrekturen der Wasserstandsbeobachtungen am Pegel Norderney-Riffgat durchgeführt, um die unterschiedlichen Höhenbezüge der jeweiligen Pegel auf einen gemeinsamen Pegelnullpunkt zu beziehen. Es hat sich entsprechend ein geometrisch bedingter Versatz in den Wasserstandzeitreihen von 1,5 cm ergeben (Weiß, 2013). Ein Versatz in dieser Größenordnung lässt sich auch augenscheinlich in der Differenzzeitreihe des MTnw in Bereich des Bruchpunktes vermuten, ist jedoch als solcher nicht in der Differenzzeitreihe des MThw zu erkennen. Bei der Änderung der Bezugshöhe eines Pegels, werden die Messwerte der Niedrig- als auch der Hochwasserstände um das gleiche Maß angehoben oder reduziert. Da ein Offset in dieser Untersuchung allerdings nicht für beide Tidewasserstände ersichtlich ist, kann die potentielle Ursache mithilfe des angewendeten Verfahrens nicht plausibilisiert werden.

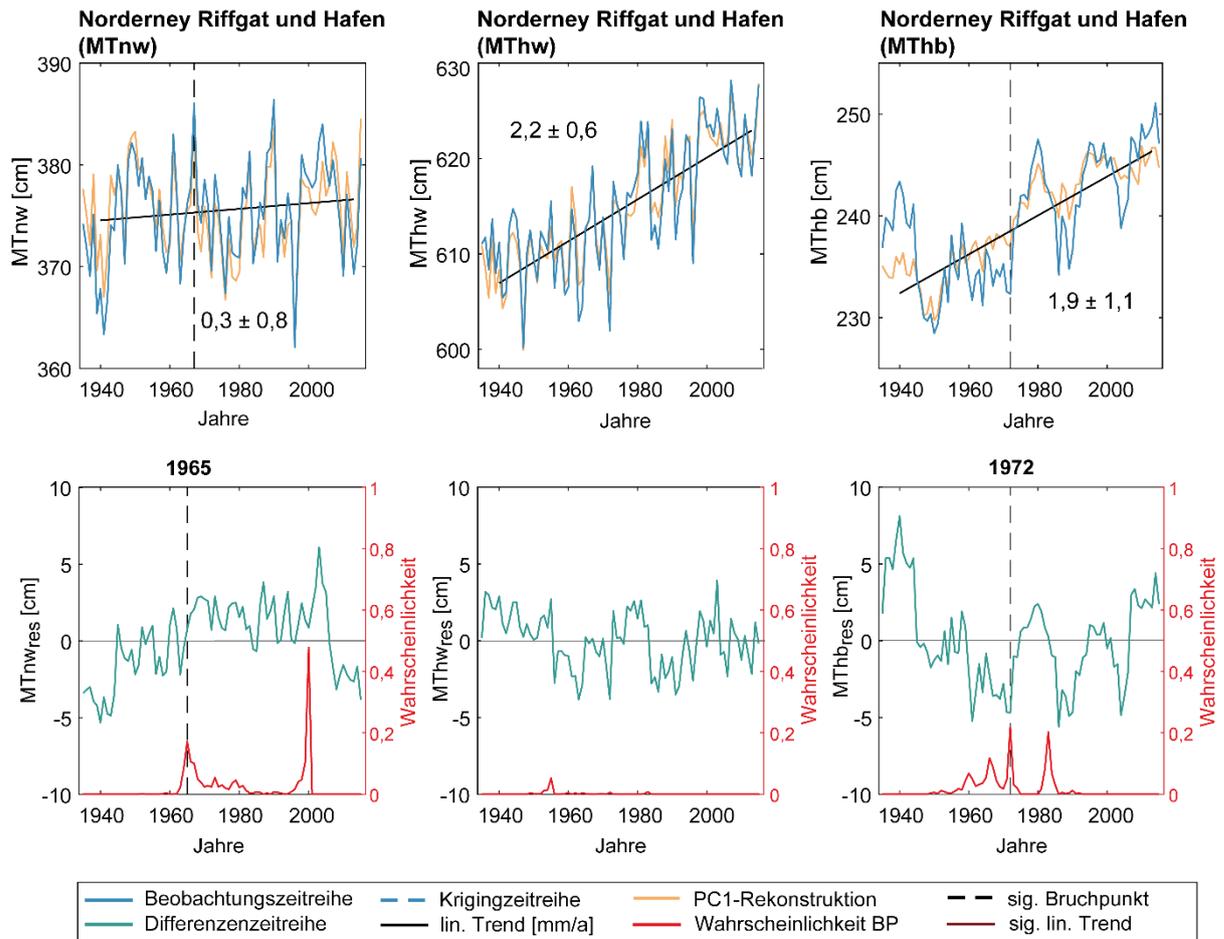


Abbildung 15: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Norderney Riffgat und Hafen.

Ob die Auswirkungen der Umstellung bzw. Zusammenführung des Pegels oder der Eindeichungsmaßnahme der Leybucht als Bruchpunkte sichtbar sind, kann nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Durch die sehr großen Vertrauensintervalle von rund 20 Jahren und mehrfachen Peaks der Wahrscheinlichkeit eines Bruchpunktes scheinen sich hier verschiedene Effekte zu überlagern, die nicht klar voneinander zu trennen sind bzw. nicht mithilfe der vorgestellten Methodik separiert werden können.

## 7.7 Helgoland Binnenhafen

Der Pegel Helgoland Binnenhafen auf der Nordseeinsel Helgoland im Zentrum der Deutschen Bucht ist der einzige Hochseepiegel im Untersuchungsgebiet und liegt damit in einem weniger flachen Bereich der Bucht. Auch an diesem Pegel konnte eine Zunahme der Tidedynamik ab Anfang der 1950er beobachtet werden. Zu berücksichtigen ist hier, dass am Pegel Helgoland Binnenhafen ausführliche Analysen erst ab 1950 möglich sind, da der Pegel zuvor immer wieder über große Zeitspannen ausgefallen ist (Gönert, 2003). Während das MTnw seit Ende der 1950er Jahre um  $1,5 \pm 1,4$  [mm/a] leicht angestiegen ist, hat das MThw einen stärkeren Anstieg um  $3,1 \pm 1,0$  [mm/a] erfahren (vgl. Abbildung 16). Im MThb konnte mit einem linearen Trend von  $1,6 \pm 1,6$  [mm/a] jedoch keine signifikante Änderung festgestellt werden, obwohl augenscheinlich der

Tidehub angestiegen ist. Die hohe Unsicherheit des berechneten Trends liegt vermutlich in der hohen Varianz des MThb begründet.

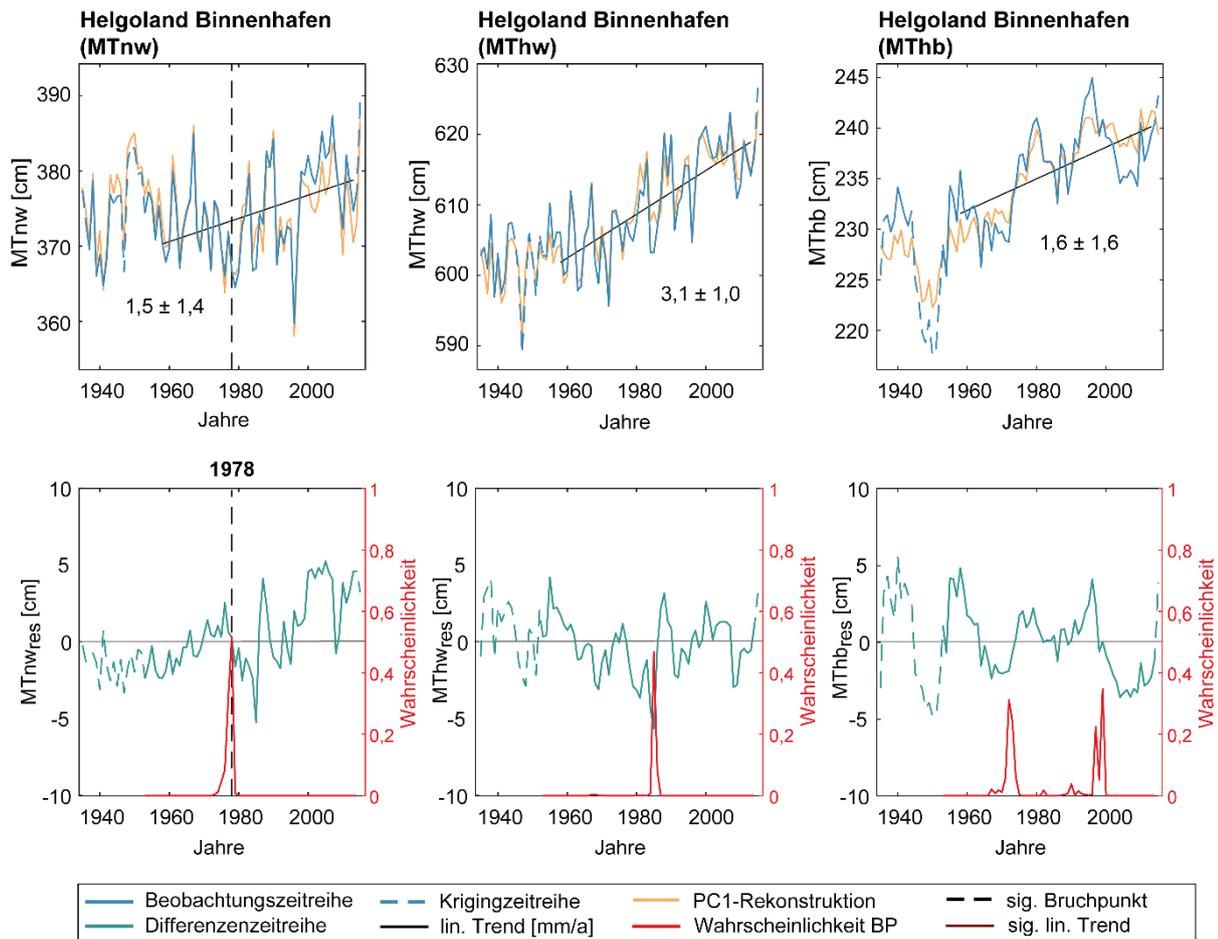


Abbildung 16: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Helgoland Binnenhafen.

Bei der Untersuchung der Differenzzeitreihen am Pegel Helgoland Binnenhafen konnte nur im MTnw ein Bruchpunkt im Jahr 1978 (95%-Vertrauensbereich: 1974–1978) ermittelt werden. Vor dem Bruchpunkt steigt die Differenzzeitreihe leicht an und fällt anschließend plötzlich ab, um daraufhin wieder deutlich zuzunehmen. Demzufolge hat die Ursache des Bruchpunktes eine kurzzeitige Reduzierung des MTnw ausgelöst, woraufhin ein schnellerer Anstieg des MTnw folgt, als im gemeinsamen Signal festzustellen ist. Im MThw und MThb hingegen konnten keine signifikanten un stetigen Veränderungen detektiert werden. Nach den zugrunde gelegten Annahmen sind die Parameter MThw und MThb somit nahezu unbeeinflusst von kleinräumigen Effekten. Ein solches Ergebnis, insbesondere die nicht nachweisbare Beeinflussung des MThw aufgrund von anthropogenen Maßnahmen, wurde erwartet, da grundsätzlich das Hochwasser weniger sensibel auf kleinräumige Änderungen reagiert (z. B. Niemyer, 1999) und der Pegel Helgoland Binnenhafen im Vergleich zu den übrigen Pegeln nicht direkt im Küstenvorfeld liegt. Unerwartet ist hingegen, dass obwohl der Pegel Helgoland Binnenhafen ein Hochseepiegel ist, dieser im Niedrigwasser einen Bruchpunkt aufweist und gleichzeitig häufiger als von anthropogenen Maßnahmen an der Küste weniger beeinflusst

beschrieben wird (Gönnert, 2003). Eine potentielle Ursache für die plötzliche Reduzierung des MTnw kann an dieser Stelle nicht gefunden werden. Auch die erhöhten, aber nicht statistisch signifikanten Werte der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt in den Differenzzeitreihen des MThw und MThb lassen keine weiteren Schlüsse auf potentielle Ursachen für die festgestellten Entwicklungen zu, da aktuell keine Informationen zu Baumaßnahmen in diesen Zeiträumen bekannt sind.

## 7.8 Mellumplate

Die Zeitreihen am Pegel Mellumplate, im Mündungsbereich des Weserästuars, umfassen nicht den gesamten Untersuchungszeitraum, sondern beginnen erst im Jahr 1963. In der Folge wurden linearer Trends unter Berücksichtigung des Nodaltidezyklus für den Zeitraum von 1977 bis 2013 berechnet (vgl. Abbildung 17). Innerhalb dieses Zeitraums konnte für keinen der untersuchten Tideparameter ein signifikanter Trend errechnet werden. In der Differenzzeitreihe des MTnw konnte hingegen ein Bruchpunkt im Jahr 1997 (95%-Vertrauensbereich: 1992–1998) festgestellt werden. Betrachtete man die sich durch den Bruchpunkt ergebenden Teilzeitreihen, so ist eine erneute Trendanalyse nur für den Zeitraum vor der un stetigen Veränderung möglich, da der Zeitraum nach dem Jahr 1997 zu kurz ( $< 19$  Jahre) ist. Vor dem Bruchpunkt lassen sich im MTnw keine wesentlichen Änderungen erkennen und die Differenzzeitreihe schwankt um Null. Mit Eintreten des Bruchpunktes hingegen nimmt die Differenz zwischen dem beobachteten MTnw und dem gemeinsamen Signal jedoch zu und das MTnw scheint etwas schneller anzusteigen als das gemeinsame Signal. Der Auslöser des Bruchpunktes hat folglich zu einem leicht beschleunigten Anstieg des MTnw geführt. Während im MThw weder stetige noch un stetige Veränderungen aufgetreten sind, lassen sich in der Differenzzeitreihe des MThb erhöhte Werte für die Wahrscheinlichkeit eines Bruchpunktes in den späten 1970er Jahren erkennen. Diese Peaks können hier jedoch nicht als signifikant gewertet werden und liefern lediglich einen Hinweis auf eine geringe lokale Beeinflussung.

Die festgestellte abrupte Änderung des MTnw im Jahr 1997 kann sowohl zeitlich als auch räumlich dem 14m-Ausbau der Außenweser im Zeitraum von 1998 bis 1999 zugeordnet werden, bei dem zusätzlich das Buhnensystem vervollständigt wurde (Schubert und Rahlf, 2003). Obwohl diese Zuordnung geografisch und zeitgleich plausibel erscheint, kann eine wesentliche Auswirkung von Vertiefungsmaßnahmen (absinkende Niedrigwasserstände) im Gesamtsignal weder statistisch noch durch visuelle Überprüfung bestätigt werden. Die vorläufige Zuordnung ist aus diesem Grund als nicht plausibel zu bewerten. Eine andere potentielle Ursache des festgestellten Bruchpunktes lässt sich im Rahmen der angewendeten statistischen Verfahren und mit der vorliegenden Informationsgrundlage nicht finden.

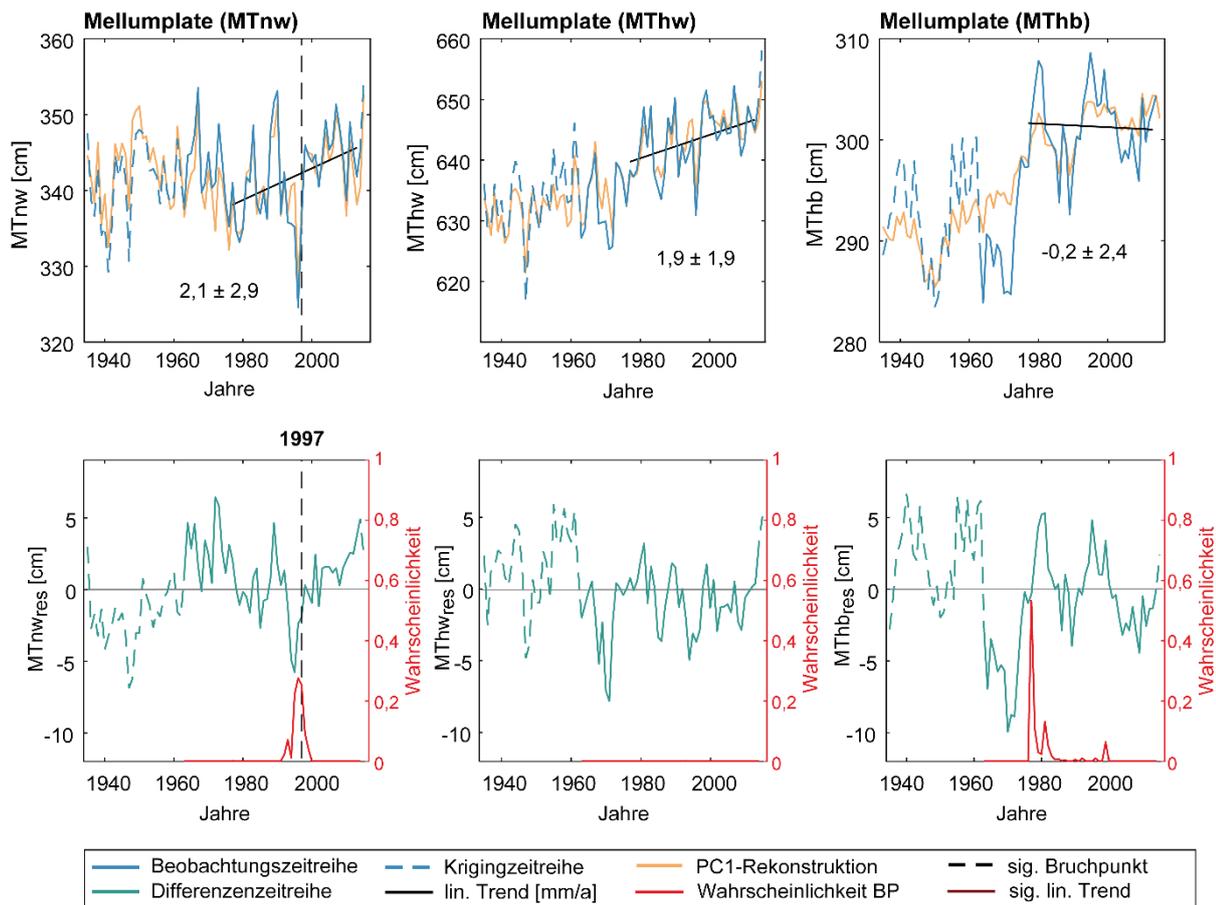


Abbildung 17: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Mellumplate.

## 7.9 Leuchtturm Alte Weser-Roter Sand

Am Pegel Leuchtturm Alte Weser-Roter Sand im äußeren Bereich der Wesermündung wird die Veränderung der Tidedynamik in allen drei untersuchten Tideparametern sichtbar. Während das MTnw um  $1,0 \pm 0,9$  [mm/a] leicht angestiegen ist, hat sich das MThw um  $2,5 \pm 0,7$  [mm/a] erhöht (vgl. Abbildung 18). Als Resultat der mit der Zeit größer werdenden Differenz der beiden Scheitelwasserstände, hat das MThb ebenfalls eine Erhöhung um  $1,5 \pm 1,0$  [mm/a] erfahren. Obwohl keine Bruchpunkte am Pegel Leuchtturm Alte Weser-Roter Sand festgestellt werden können, scheint das MTnw lokal beeinflusst. Über den gesamten Untersuchungszeitraum steigt die Differenz zwischen der Beobachtungszeitreihe von MTnw und dem gemeinsamen Signal stetig an. In der Folge lässt sich ein schnellerer Anstieg des MTnw beobachten als die Zunahme des gemeinsamen Signals. Demzufolge scheinen stetige lokale Prozesse die großräumige Entwicklung zu überlagern und zu intensivieren. Da es sich hier jedoch um eine stetige Entwicklung handelt und keine Bruchpunkt bzw. Zeitpunkt vorliegt, zu dem diese Entwicklung begonnen hat, ist es nicht möglich eine potentielle Ursache der Veränderung zuzuordnen.

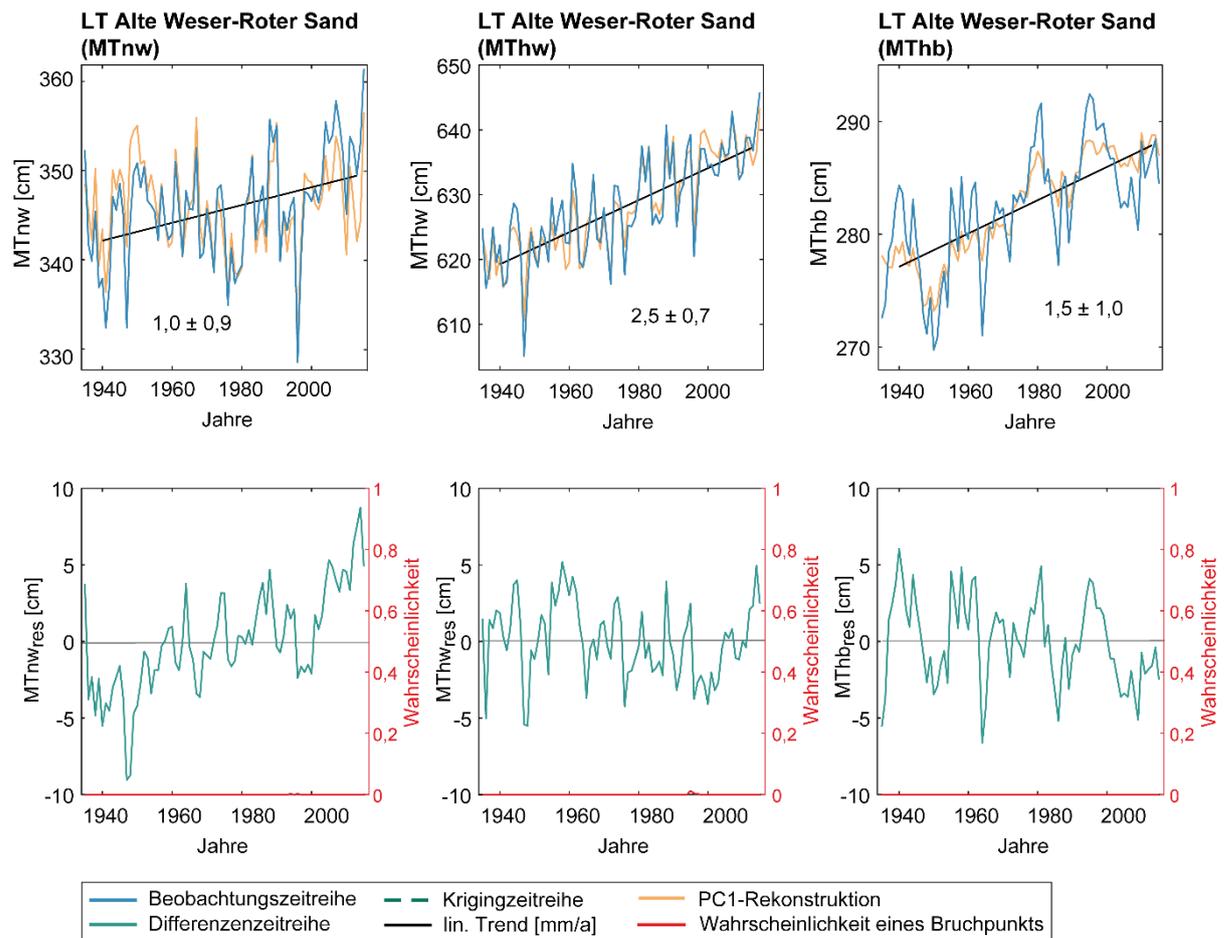


Abbildung 18: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Leuchtturm Alte Weser-Roter Sand.

## 7.10 Wilhelmshaven Alter Vorhafen

Am Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen an der Nordwestküste des Jadebusens prägt sich die Veränderung der Tidedynamik in einem Anstieg des MThb und insbesondere des MThw aus. Während keine eindeutige Änderung im MTnw beobachtet werden konnte, steigt das MThw um  $3,9 \pm 0,7$  und das MThb um  $3,2 \pm 1,1$  [mm/a] deutlich an (vgl. Abbildung 19). Im Gegensatz dazu lässt sich für das MTnw kein signifikanter linearer Trend ermitteln. Zusätzlich konnten durch die Bruchpunkte keine un stetigen Veränderungen am Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen festgestellt werden.

Bei der Untersuchung der Differenzenzeitreihen ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen MTnw und dem gemeinsamen Signal zu Beginn negativ war und über den Untersuchungszeitraum stetig angestiegen ist. Obwohl kein signifikanter Trend im MTnw berechnet werden konnte, liefert die steigende Differenz einen Hinweis darauf, dass das MTnw schneller gestiegen ist als das gemeinsame Signal. Hier scheinen folglich eine lokale Beeinflussung und Überlagerung mit dem gemeinsamen Anteil der Entwicklung vorzuliegen. Durch die zugrunde gelegten Annahmen ist davon auszugehen, dass ohne den beschriebenen lokalen Einfluss stagnierende MTnw erfolgt hätten, da das gemeinsame Signal keinen linearen Trend aufweist (vgl. Tabelle 3). Da sich die Untersuchungen der mittleren Änderungen lediglich bis zum Jahr 1940 möglich sind, kann

im Rahmen dieses Projekts nicht festgestellt werden, welche Ursache dem Anstieg zugeordnet werden kann und wann diese Entwicklung begonnen hat. Aber genau diese Informationen sind unabdingbar bei der Ursachenforschung für festgestellte Änderungen.

Im MThw weist die Differenzenzeitreihe einen kleinen Peak in der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt auf, jedoch handelt es sich hier nicht um einen signifikanten Bruchpunkt. Abgesehen von der kurzzeitig erhöhten Differenz zwischen MThw und dem gemeinsamen Signal, schwankt die Differenz um Null und das MThw und das gemeinsame Signal verlaufen nahezu gleich. Das MThw scheint folglich keiner wesentlichen lokalen Beeinflussung zu unterliegen. Ähnliches gilt auch für das MThb. Auch hier verändert sich die Differenz kaum und schwankt lediglich mit hoher Varianz um Null. Demzufolge beschreiben das MThb und der gemeinsame Anteil der Entwicklung einen ähnlichen Anstieg.

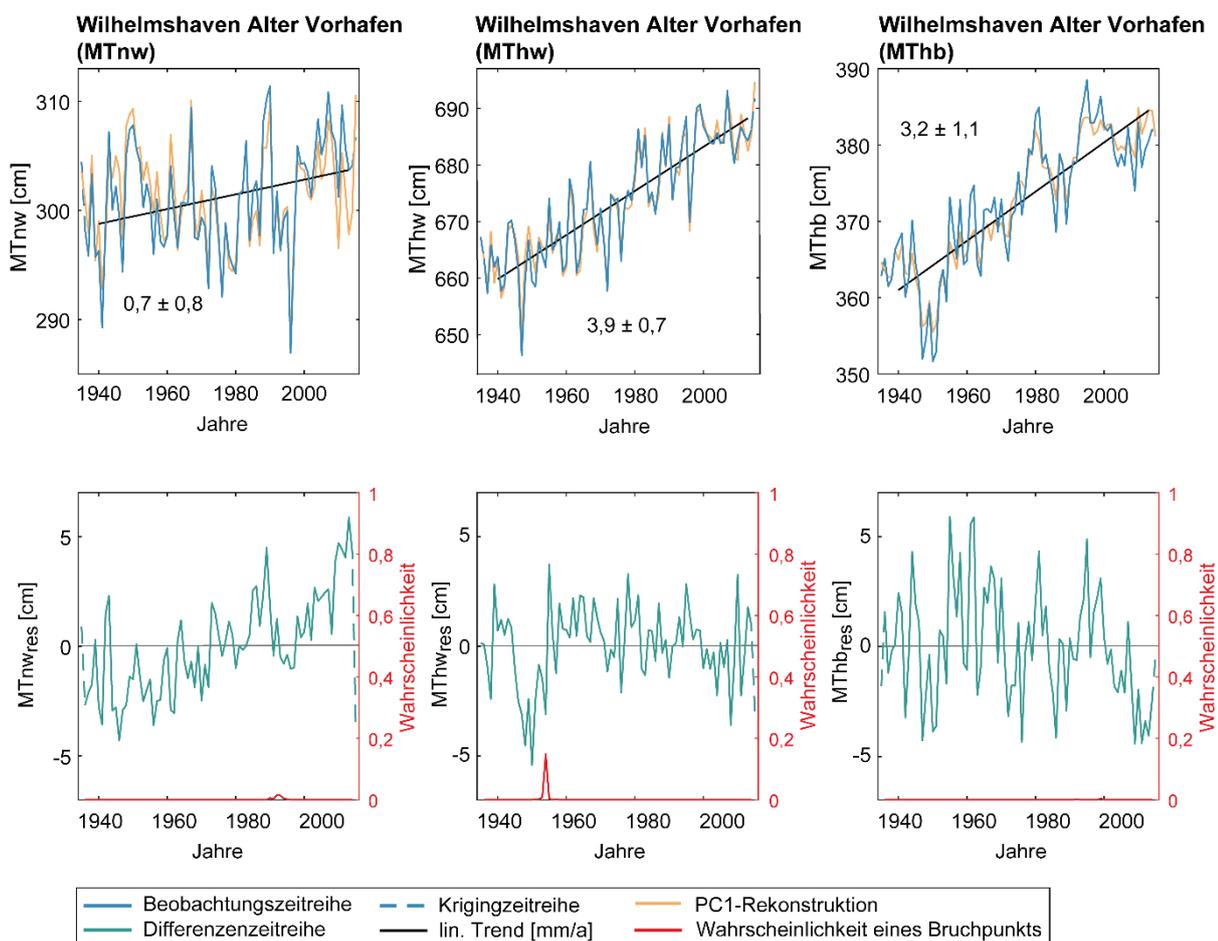


Abbildung 19: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen.

## 7.11 Bremerhaven

Am Pegel Bremerhaven im Mündungsbereich der Weser konnte für alle drei untersuchten Tideparameter ein signifikanter linearer Trend festgestellt werden. Während das beobachtete MTnw eine Reduzierung um  $2,2 \pm 0,9$  [mm/a] erfahren hat, ist das MThw um  $3,7 \pm 0,8$  [mm/a] angestiegen (vgl. Abbildung 20). Als Folge der gegenläufigen Entwicklung der Tidewasserstände hat auch das MThb um  $5,9 \pm 1,2$  [mm/a] deutlich zugenommen. Neben den Veränderungen in der Beobachtungszeitreihe, konnten auch Veränderungen und ein Bruchpunkt in der Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion für das MTnw festgestellt werden. Zudem weist die Differenzenzeitreihe des MTnw einen signifikanten Bruchpunkt im Jahr 1995 (95 %-Vertrauensintervall: 1991–2000) auf, mit dem zeitgleich eine abrupte Erhöhung der Differenz einhergeht und die Rekonstruktion wesentlich höhere MTnw beschreibt, als tatsächlich beobachtet wurden. Daraus lässt sich folglich ableiten, dass die Ursache des Bruchpunkts auch ein plötzliches Absinken des MTnw hervorgerufen hat.

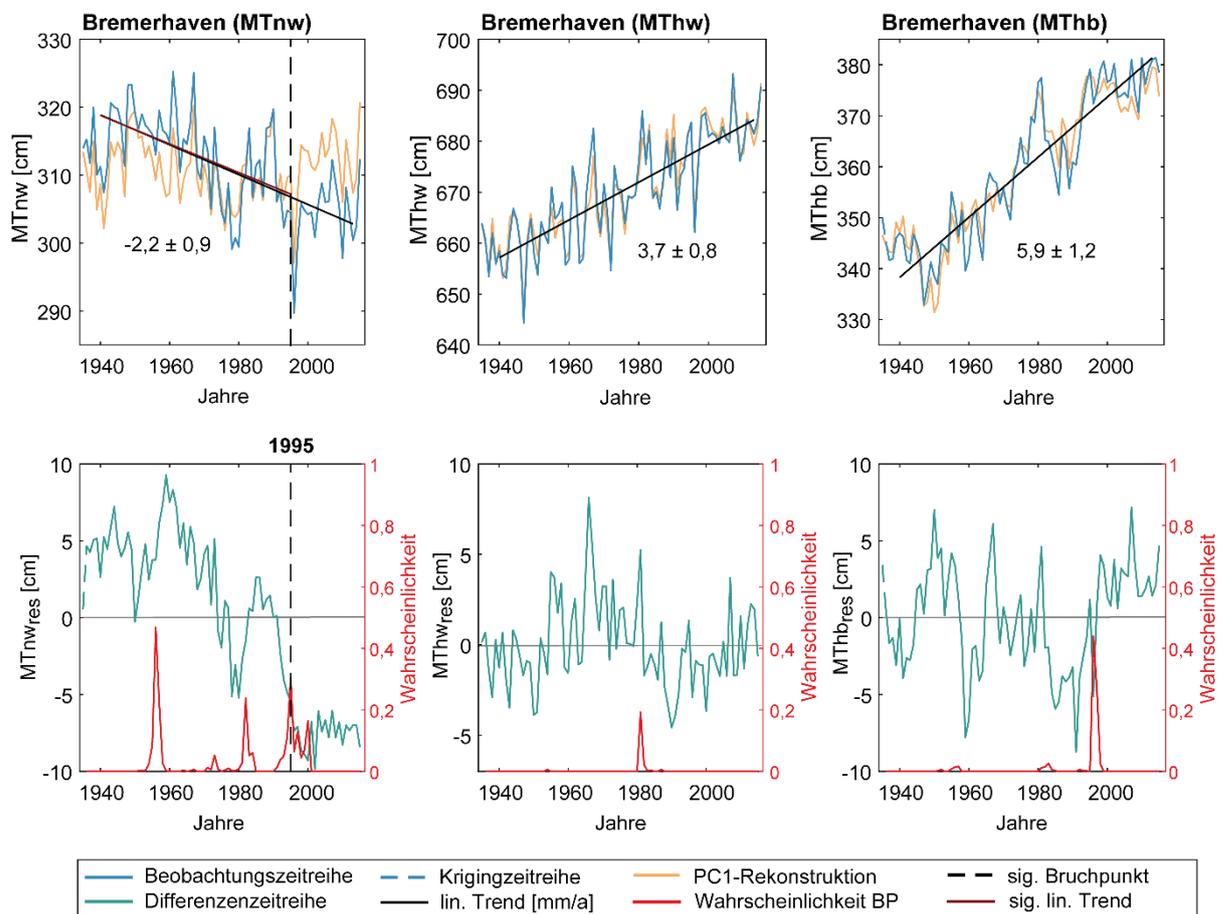


Abbildung 20: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Bremerhaven.

Betrachtet man die Entwicklung des groß- und des kleinräumigen Signals vor und nach dieser abrupten Veränderung, so scheint das MTnw insbesondere vor dem Bruchpunkt stetig zu sinken. Mit dem Bruchpunkt selbst tritt eine weitere, deutlichere Reduzierung auf, woraufhin ein stagnierender Verlauf folgt. Weitere erhöhte Wahrscheinlichkeiten auf abrupte Veränderungen sind in den Jahren 1956 und 1982 zu finden. Demzufolge

scheinen auch in diesen Jahren kleinräumige Änderungen eingetreten zu sein, deren Auswirkung jedoch mit einer 95%tigen Vertrauensgrenze nicht als signifikante Bruchpunkt betrachtet werden können. Dennoch kann aufgrund einer visuellen Auswertung der Differenzzeitreihe das MTnw bis Ende der 1950er Jahre näherungsweise als stagnierend beschrieben werden, woraufhin sich eine stetige Abnahme der Differenz im MTnw ereignet.

Der abrupten Änderung des MTnw im Jahr 1995 lässt sich zeitlich und räumlich der SKN-14m-Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998 bis 1999 zuordnen, bei dem die Außenweser sowohl vertieft als auch verbreitert wurde und das Buhnsystem vervollständigt wurde (Schubert und Rahlf, 2003). Auch dem Absinken des MTnw ab Beginn der 1960er Jahre konnte eine potentielle Ursache zugeordnet werden. Im Zeitraum von den 1950er bis in die 1970er Jahre wurden ebenfalls Vertiefungsmaßnahmen in der Außenweser zur Wiederherstellung des SKN-10 m durchgeführt (Vierfuß, 2003). Die hypothetische Zuordnung der Bruchpunkte zu den genannten Vertiefungsmaßnahmen lässt sich durch die grundsätzlichen physikalischen Auswirkungen von solchen Strombaumaßnahmen plausibilisieren. Wie bereits erläutert, führt die Vertiefung von Ästuaren zu einer Zunahme des Tidehubs, der durch eine starke Absenkung des Niedrigwassers hervorgerufen wird (vgl. Kapitel 7.5). Nach dem Bruchpunkt im Jahr 1995 sind deutlich reduzierte Niedrigwasserstände festzustellen, wodurch sich auch ein Peak der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt im lokalen Signal des MThb ausprägt, aber mit der gewählten 95%tigen Vertrauensgrenze keinem signifikanten Bruchpunkt entspricht. Ebenso lässt sich keine signifikante abrupte Veränderung im MThw feststellen, sodass die Vertiefungen wie erwartet weniger Einfluss auf die Hochwasserstände gehabt haben. Während also die lokalen Vertiefungsmaßnahmen der Außenweser das mittlere Niedrigwasser am Pegel Bremerhaven stark beeinflusst haben, scheinen die Hochwasserstände vordergründig durch gemeinsame Entwicklungen aufgrund von großräumigen Einflüssen geprägt zu sein.

## 7.12 Cuxhaven Steubenhöft

Während in der Gesamtzeitreihe kein signifikanter linearer Trend des MTnw beobachtet werden konnte, steigen sowohl das MThw, als auch das MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft im Mündungsbereich der Elbe um  $2,9 \pm 0,7$  bzw.  $2,1 \pm 1,8$  [mm/a] an. Wie in Abbildung 21 dargestellt, konnte jeweils in den Differenzzeitreihen von MTnw und MThb ein signifikanter Sprung im Jahr 1977 (95 %-Vertrauensbereich: 1975–1978) festgestellt werden. Betrachtet man die Zeitreihe separat vor und nach dem Bruchpunkt, so fällt auf, dass die Differenz zwischen der Beobachtungszeitreihe und der Rekonstruktion im MTnw zunächst ansteigt und mit dem Bruchpunkt abrupt absinkt und in den Folgejahren wieder deutlich zunimmt. Ab den 1990er Jahren steigt die Differenz wieder auf ein ähnliches Niveau wie vor dem Bruchpunkt. Das abrupte Absinken der Differenz hat offensichtlich dazu geführt, dass das großräumige ansteigende Signal überlagert wird und keine wesentliche mittlere Änderung im MTnw beobachtet werden konnte. Mit dem Bruchpunkt im MThb verändert sich auch hier die Differenz plötzlich. Vor dem Jahr 1977 verändert sich die Differenz zwischen der Beobachtungszeitreihe und der Rekonstruktion unwesentlich und steigt dann schlagartig mit dem Bruchpunkt an,

um ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Untersuchungszeitraums wieder stetig abzunehmen. Eine ähnliche Entwicklung lässt sich auch in den beobachteten MThb feststellen, indem mit dem Bruchpunkt das MThb sprunghaft ansteigt und bis zum Ende der Zeitreihe wieder leicht absinkt. Lediglich im MThw lassen sich für die Differenzen keine wesentlichen Änderungen feststellen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass lokale Effekte am Pegel Cuxhaven Steubenhöft keinen erkennbaren Einfluss auf die MThw aufweisen.

Als potentielle Ursache der abrupten Veränderung in den späten 1970er Jahren des MTnw und MThb ist der Ausbau der Unterelbe von 1974-1978 zu nennen (FGG Elbe, 2007), da die grundsätzlichen Effekte von Vertiefungsmaßnahmen in Ästuaren abfallende Niedrigwassers- und ansteigende Hochwasserstände und in Folge auch ein erhöhter Tidehub (vgl. Kapitel 7.5). Abbildung 21 zeigt, dass das Absinken des Niedrigwassers einen signifikanten Bruchpunkt zur Folge hat; im Hochwasser lässt sich dies jedoch nicht als statistisch relevante abrupte Änderung feststellen.

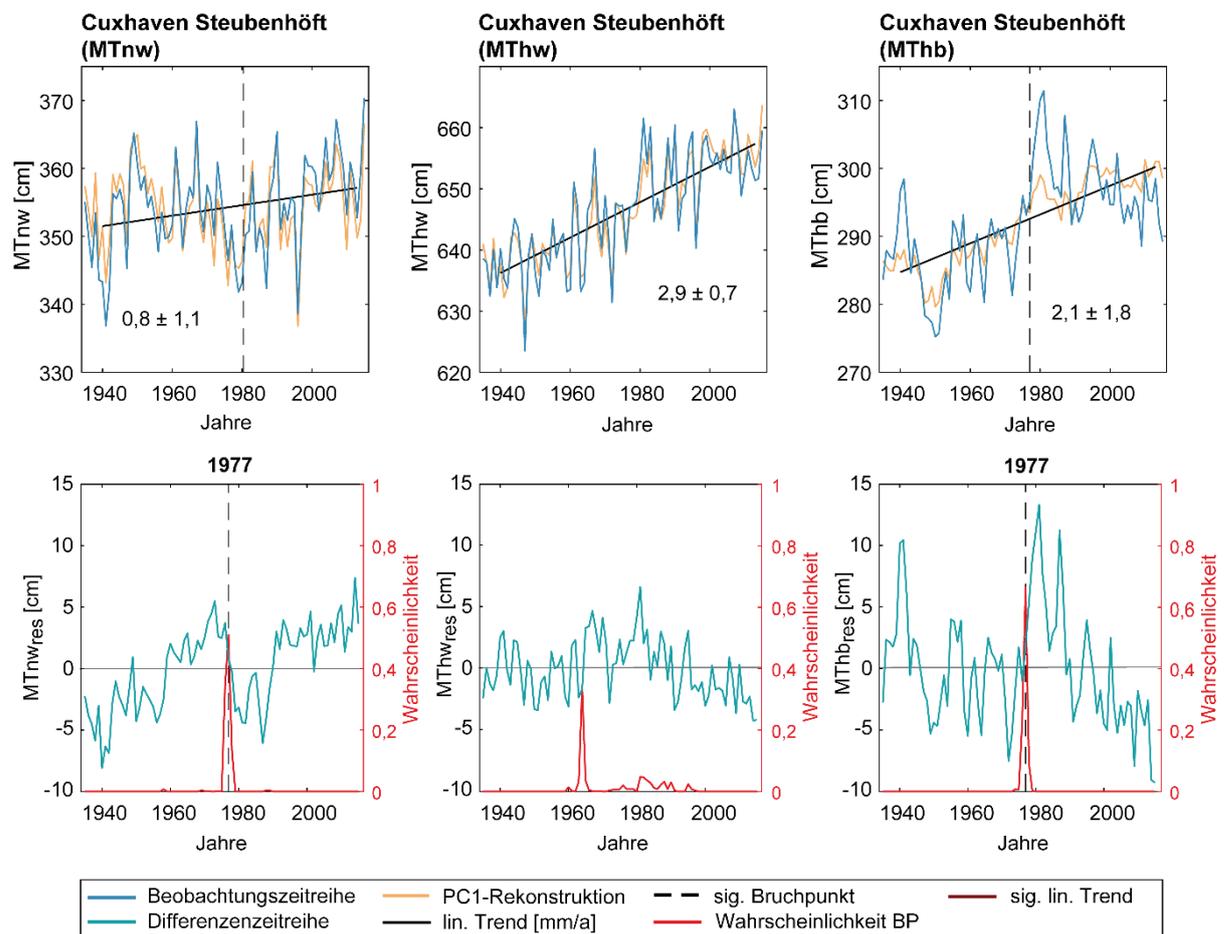


Abbildung 21: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft.

Bereits Siefert (1998) hat die Auswirkungen des 13,5m-Ausbaus auf die Wasserstände an den Tidepegeln der Elbe im Bereich von Cuxhaven bis St. Pauli untersucht. Durch das Einteilen der Zeitreihen in sogenannte Ruhezeiträume, in denen keine Baumaßnahmen an der Elbe stattgefunden haben, und die Untersuchung der Veränderungen zwischen den aufeinanderfolgenden Ruhezeiträumen konnte Siefert (1998) kaum langfristige hydrologische Nachwirkungen der Fahrrinnenvertiefung feststellen. Hingegen

stellte er fest, dass die Wasserstände, insbesondere das Niedrigwasser unmittelbar auf die Systemänderungen reagiert. Wie auch in Abbildung 21 zu erkennen, folgt auf den Bruchpunkt im 1977 ein rasches Absinken des MTnw ab 1978, wobei die Änderungen nur einige Jahre anhält und ab rund 1990 ist kaum eine Änderung vorhanden. Die mithilfe der angewendeten Methodik detektierten kleinräumigen Änderungen, die zugeordneten Ursache derer und der sich ergebenden hydrologischen Systemantworten decken sich mit früheren Arbeiten (vgl. u. a. Siefert und Jensen, 1993; Siefert, 1998) und stützen die hier aufgeführte These.

### 7.13 Büsum

Der Pegel Büsum im Norden der Meldorfer Bucht weißt als einziger Tidepegel im Untersuchungsgebiet keinen signifikanten Trend im MThb über den gesamten Untersuchungszeitraum auf (vgl. Abbildung 22). Ursache dessen ist, dass beide mittleren Tidewasserstände eine Zunahme in ähnlicher Größenordnung erfahren haben und sich die Differenz der beiden Größen folglich nicht wesentlich erhöht hat.

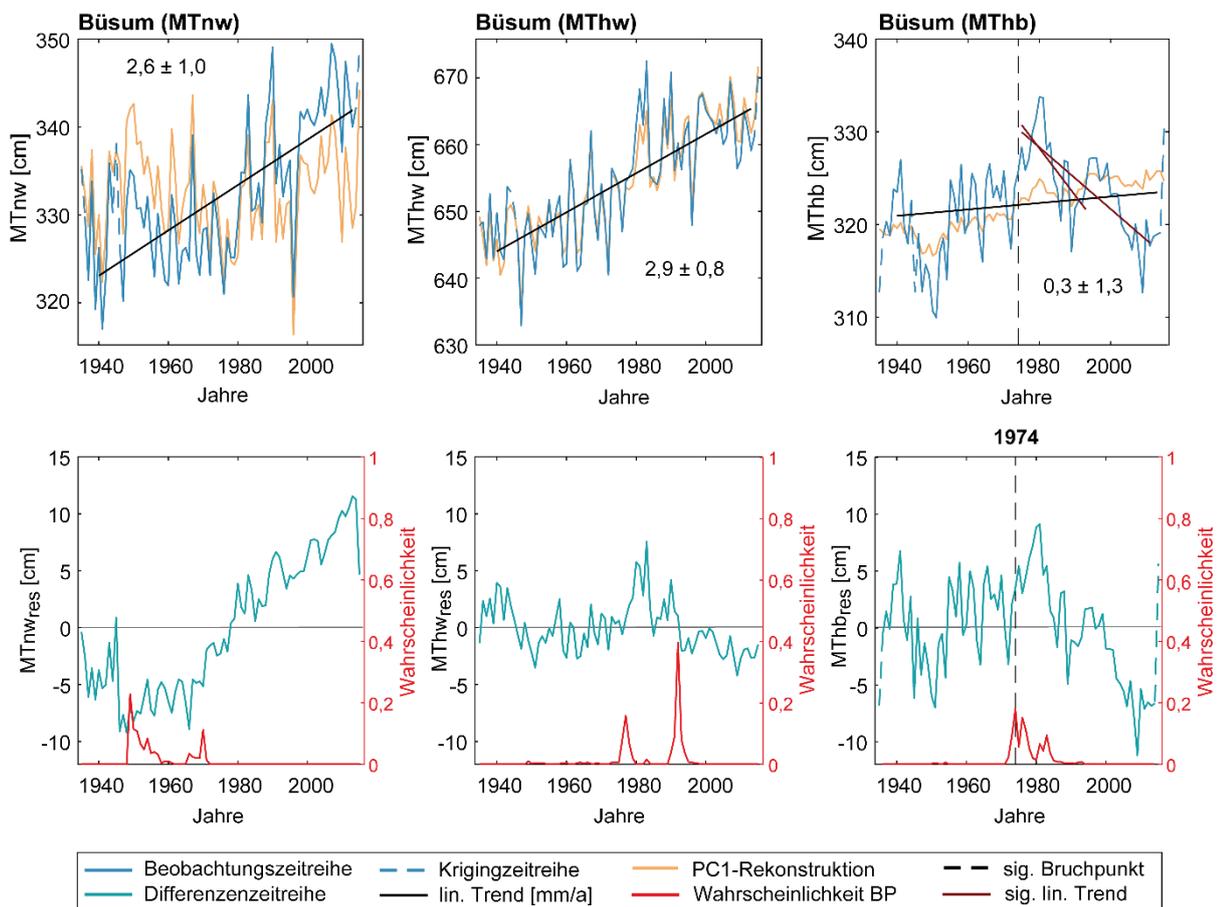


Abbildung 22: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Büsum.

Während sich die Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion im MThw nahezu nicht verändert hat, ist die Differenz zwischen Beobachtung und Rekonstruktion im MTnw drastisch angestiegen. Eine starke lokale Beeinflussung des MTnw scheint

somit stattgefunden zu haben. In der Differenzenzeitreihe des MThb konnte ein Bruchpunkt im Jahr 1974 (95 %-Vertrauensintervall: 1972–1988) festgestellt werden. Im Gegensatz zu dem nicht signifikanten Trend der Beobachtungszeitreihe über den gesamten Zeitraum, sinket das MThb in den Folgejahren des Bruchpunkts bis zum Ende des Untersuchungszeitraum deutlich ab. Die Ursache des Bruchpunkts führte somit auch dazu, dass die Differenz zum rekonstruierten gemeinsamen Signal ansteigt und die gesamte Zeitreihe keinen signifikanten Trend enthält. Der Anstieg im gemeinsamen Signal wurde also durch ein lokales Absinken überlagert. Auch wenn die Differenzenzeitreihen der beiden Wasserstände keine signifikanten Bruchpunkte aufweisen, so erkennt man deutliche erhöhte Werte der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt. Diese Peaks liegen im Zeitraum zwischen etwa 1970 und 1980 für das MThw und etwas früher um 1970 im MTnw. Im Fall beider mittlerer Wasserstände liegen die Peaks, wenn auch nur geringfügig, unterhalb der 95%tigen Vertrauensgrenze. Dennoch können diese Ausschläge ein Indiz auf eine lokale abrupte Beeinflussung sein und unterstreichen das Vorhandensein des Bruchpunkts im MThb im gleichen Zeitraum. Potentieller Auslöser dieser abrupten Entwicklung ist die Eindeichung der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978. Zugeordnet wird diese Baumaßnahme dem Bruchpunkt aufgrund der Überschneidung des Bruchpunktes mit der Bauzeit und aufgrund der Lage des Pegels innerhalb der Meldorfer Bucht. Zudem hat die Meldorfer Bucht durch den Bau der beiden Speicherkooge Nord und Süd (zusammengefasst: Eindeichung der Meldorfer Bucht) insgesamt mehr als 31 Mio. m<sup>3</sup> Tidevolumen verloren (Lehmann, 2018). Eine mögliche Folge ist, dass die in die Bucht einlaufende Tidewelle wesentlich früher am Deich reflektiert wird, somit einen kürzeren Weg zurücklegt und es zu veränderten Interferenzmustern und ggf. zusätzlichen Resonanzeffekten innerhalb der Bucht kommt.

## 7.14 Husum

Am Pegel Husum an der nordfriesischen Küste Schleswig-Holsteins hat sich die Tidedynamik seit 1940 wesentlich verändert. Durch den starken Anstieg des MThw um  $3,9 \pm 0,8$  [mm/a] und dem eher sinkenden MTnw, ist auch das MThb mit  $4,3 \pm 1,1$  [mm/a] deutlich angestiegen (vgl. Abbildung 23). Allerdings lässt sich keine wesentliche Beeinflussung der Tideparameter durch lokale Effekte feststellen. Keine der Differenzenzeitreihen weist eine Veränderung oder einen Bruchpunkt auf. Sowohl die Tidewasserstände (MTnw und MThw) als auch das MThb beschreiben im Wesentlichen dieselben Veränderungen wie die jeweiligen gemeinsamen Signale. Demzufolge kann die Tidedynamik am Pegel Husum als nahezu vollständig durch großräumige Entwicklungen angetrieben bezeichnet werden.

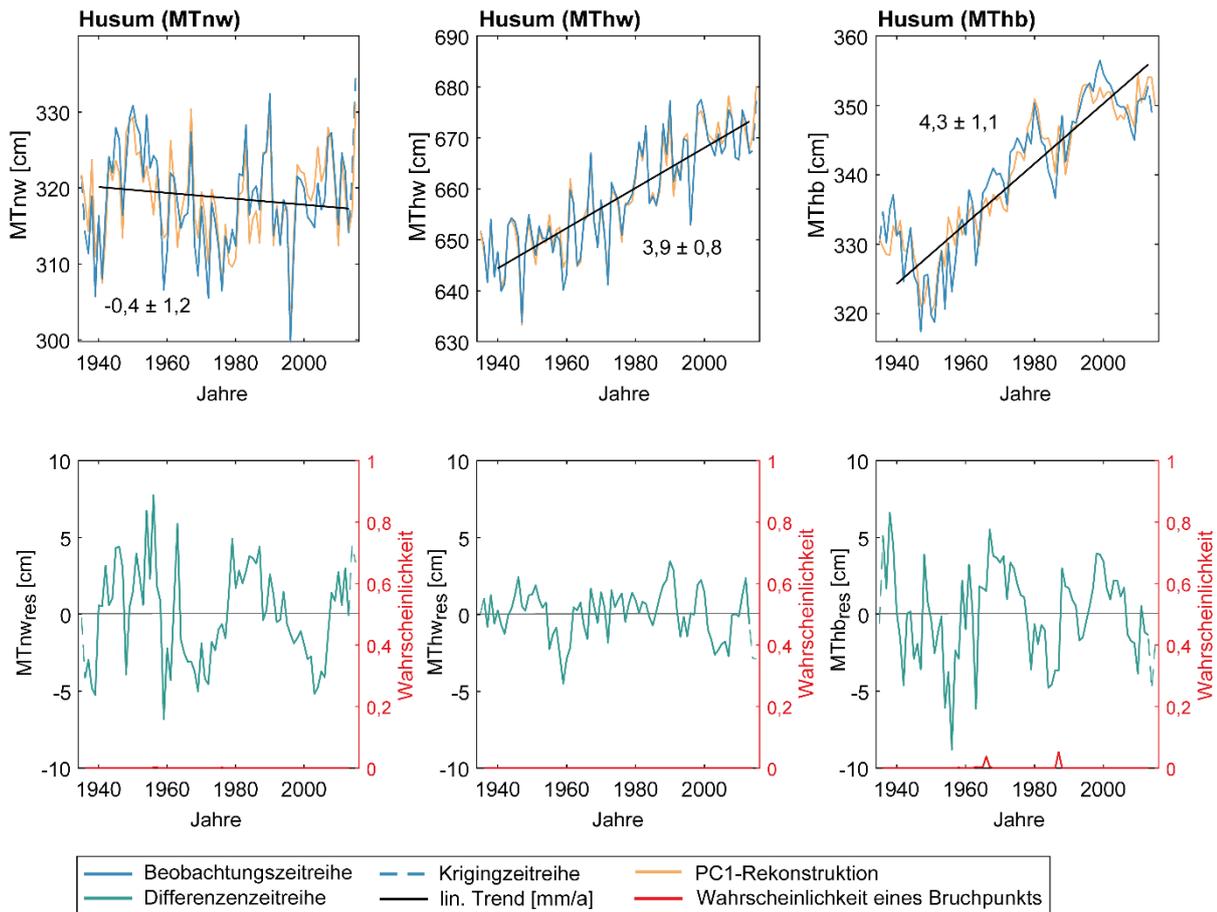


Abbildung 23: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Husum.

## 7.15 Wittdün

Wie auch an einigen anderen Pegelstandorten an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins kann auch am Pegel Wittdün auf der Insel Amrum eine deutliche Zunahme der Tidedynamik festgestellt werden. Diese wird insbesondere im Anstieg des MThw um  $4,1 \pm 0,7$  [mm/a] und des MThb um  $4,4 \pm 1,2$  [mm/a] sichtbar (vgl. Abbildung 24). Lediglich das MTnw weist keinen signifikanten linearen Trend auf. Zudem konnte durch die Bruchpunktanalyse festgestellt werden, dass keiner der Tideparameter eine signifikante unetstetige Veränderung aufweist. Nur im MThb sind Ende der 1970er Jahre erhöhte Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt aufgetreten, die allerdings als nicht signifikant bewerten werden. Dennoch liefert dies einen Hinweis darauf, dass ein lokaler Einfluss mit geringen Auswirkungen auf die Tidedynamik vorliegt. Ab den 1980er Jahren lässt sich augenscheinlich eine leichte Reduzierung der Differenz zwischen MThb und dem gemeinsamen Signal erkennen. Betrachtet man jedoch die Verläufe der drei Tideparameter und den zugehörigen Rekonstruktionen der PC1, so beschreiben die Zeitreihen sehr ähnliche Entwicklungen. Demzufolge kann der Pegel Wittdün als stark durch großräumige Entwicklungen geprägt beschrieben werden.

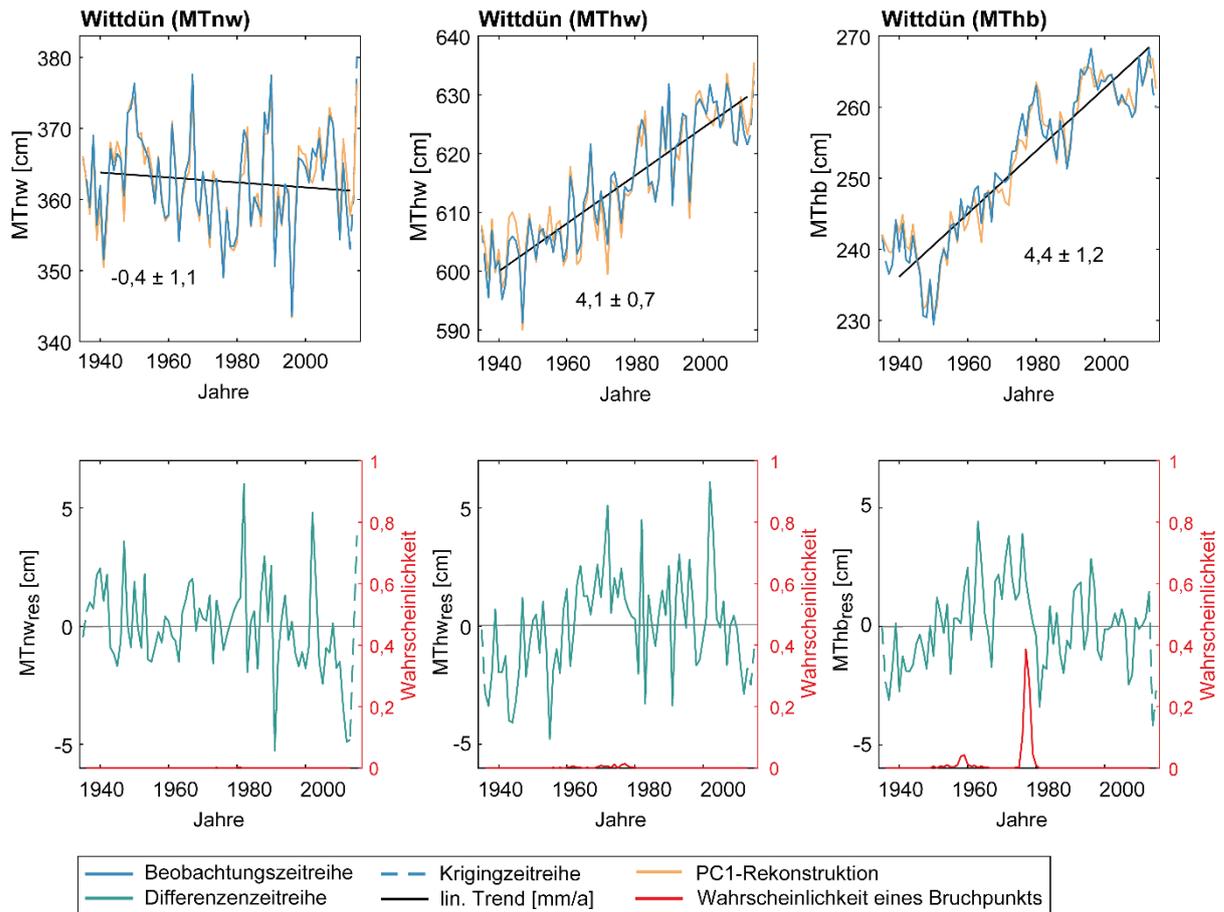


Abbildung 24: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Wittdün.

## 7.16 Wyk auf Föhr

Der Pegel Wyk auf Föhr weist einen vergleichsweise kürzeren Beobachtungszeitraum ab den 1950er Jahren auf, woraus sich unter Berücksichtigung des Nodaltidezyklus ein Untersuchungszeitraum von 1958 bis 2013 ergibt. In diesem Zeitraum spiegelt sich die Änderung der Tidedynamik insbesondere in erhöhten MThw und MThb wieder, während im MTnw kein signifikanter linearer Trend vorliegt. Dabei ist das MThb mit  $4,5 \pm 1,4$  [mm/a] und das MThw mit  $4,9 \pm 1,0$  [mm/a] angestiegen (vgl. Abbildung 25). Da keiner der drei Differenzzeitreihen einen Bruchpunkt aufweist, liegt an dem Pegel Wyk auf Föhr keine un stetige Veränderung vor. Im MThb und MThw schwankt die Differenz zwischen Beobachtungszeitreihe und gemeinsamen Signal um Null, weshalb der gemeinsame Anteil und die Beobachtungen in beiden Fällen eine sehr ähnliche Entwicklung abbilden. Sowohl stetige als auch un stetige Veränderungen aufgrund von lokalen Effekten können nicht festgestellt werden. Im MTnw scheint die Differenzzeitreihe zu Beginn des Aufzeichnungszeitraumes zu sinken, ab den 1960er Jahren wiederum scheint auch die Differenz zwischen Beobachtung und gemeinsamer Entwicklung gleichbleibend zu verlaufen. Da sich die leichte Abnahme der Differenzzeitreihen des MTnw am Beginn liegt und sich lediglich über ein paar Jahre erstreckt, kann hier keine sichere Aussage getroffen werden, ob eine lokale Beeinflussung vorliegt. Da die Differenzzeitreihe über den restlichen Zeitraum gleichbleiben verläuft, lässt sich auch im

MTnw kein lokaler Effekt detektieren. Damit ist der Pegel Wyk auf Föhr, ähnlich wie der ebenfalls an der Küste Schleswig-Holsteins gelegene Pegel Husum, scheinbar nahezu unbeeinflusst von lokalen Systemänderungen.

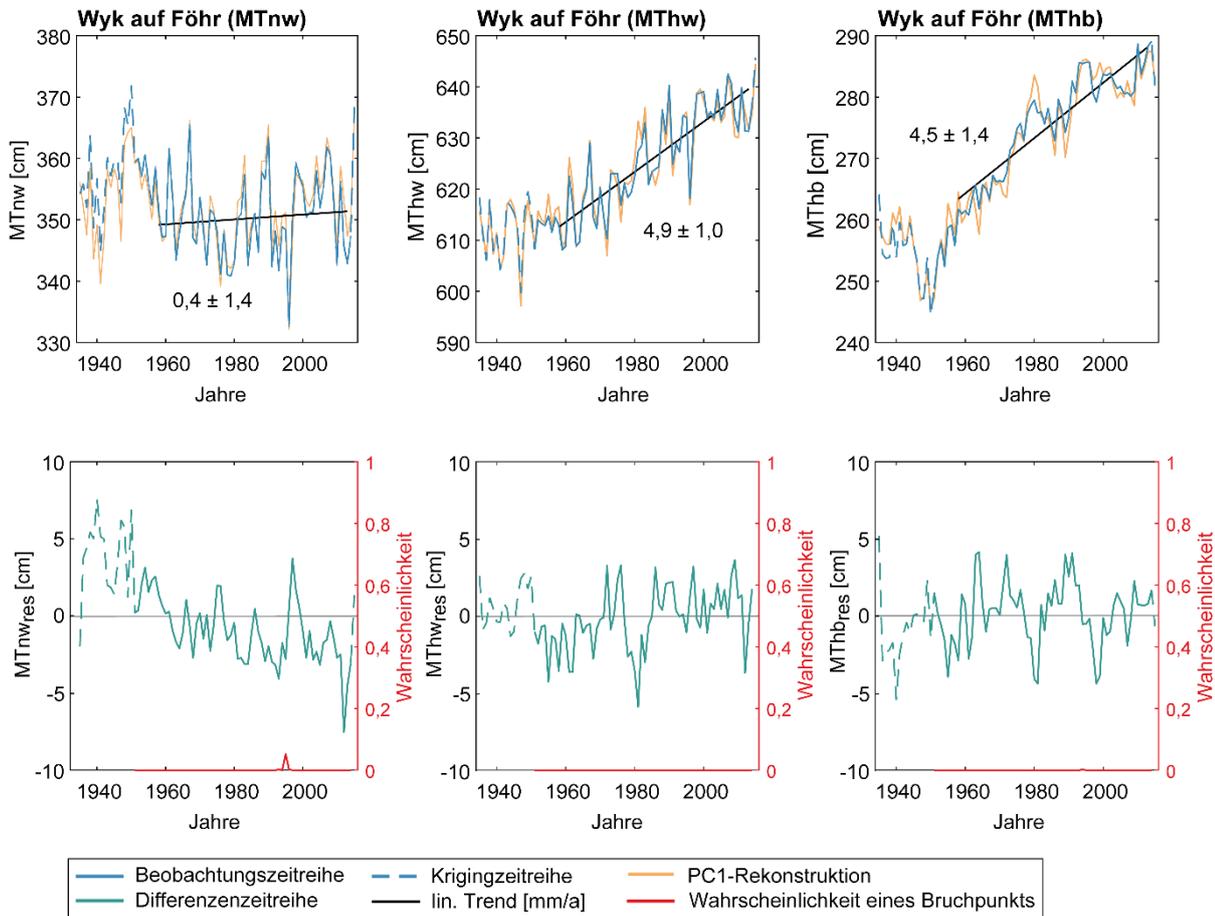


Abbildung 25: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Wyk auf Föhr.

## 7.17 Schlüttsiel

Aufgrund von kürzeren Beobachtungszeitreihen ab Anfang der 1960er Jahre beschränkt sich der Untersuchungszeitraum am Pegel Schlüttsiel unter Berücksichtigung des Nodaltidezyklus auf den Zeitraum von 1977 bis 2013. Innerhalb des genannten Zeitraums lässt sich ein deutlicher Anstieg im MThw von  $4,2 \pm 2,1$  [mm/a] beobachten, während im MTnw keine signifikante Veränderung festgestellt werden kann (vgl. Abbildung 26). Auch das MThb am Pegel Schlüttsiel ist mit  $2,8 \pm 1,8$  [mm/a] angestiegen.

Betrachtet man zusätzlich die Entwicklung der Differenzzeitreihen, so lässt sich eine eher stetige wenn auch geringe Vergrößerung der Differenz zwischen Beobachtungszeitreihe und gemeinsamen Signal feststellen. Demzufolge scheint das MTnw etwas langsamer anzusteigen, als der Anstieg den das gemeinsame Signal beschreibt. Vermuten lässt sich an dieser Stelle, dass ein lokaler Effekt zur Dämpfung des MTnw beigetragen hat. Da die Differenzzeitreihe jedoch keinen Bruchpunkt enthält und die Zeitreihenlänge eingeschränkt ist, lässt sich hier weder ein Startpunkt einer potentiellen Einwirkung noch eine konkrete Ursache zuordnen. Im Fall des MThw ist die Differenz

zwischen den Beobachtungswerten und dem gemeinsamen Anteil des Signals zunächst etwas größer, wobei sich höhere Werte im gemeinsamen Signal erkennen lassen und ab rund 1990 schwankt die Differenz dann um Null. Obwohl kein signifikanter Bruchpunkt ermittelt werden konnte, treten erhöhte Werte der Wahrscheinlichkeit für die Lage eines Bruchpunktes in der Differenzzeitreihe des MThw zwischen 1980 und 1990 auf. Es scheint also zu einer geringfügigen Veränderung innerhalb dieser Jahre gekommen zu sein, die jedoch die festgelegte Signifikanzgrenze von 95% nicht erreicht. Als möglicher Auslöser dieser Veränderung und dem augenscheinlichen Beginn der reduzierten Differenz ist aufgrund der zeitlichen und räumlichen Nähe der Bau des Fahretofter Westerkoog im Jahr 1989 zu nennen (Lehmann, 2018). Bei dieser Zuordnung handelt es sich allerdings um eine Hypothese, die mithilfe der hier verwendeten Methoden nicht plausibilisiert werden kann. Im MThb hingegen kann keine signifikante Veränderung der Differenz zwischen Beobachtung und gemeinsamen Signal in Form von Bruchpunkten oder stetigen Änderungen festgestellt werden und die beiden Zeitreihen beschreiben eine ähnliche Entwicklung. Lokale Effekte mit Auswirkung auf das MThb können folglich am Pegel Schlüttsiel nicht detektiert werden.

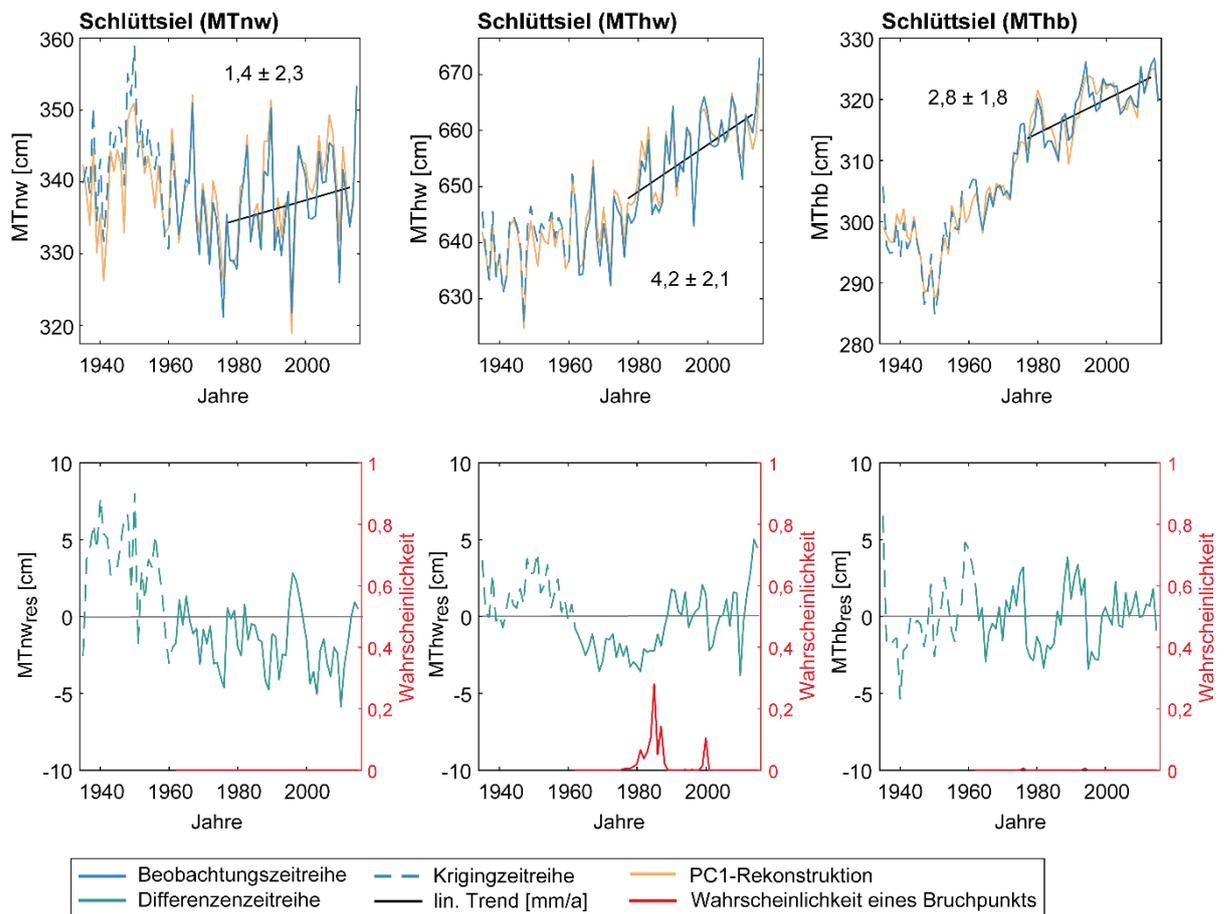


Abbildung 26: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Schlüttsiel.

## 7.18 Dagebüll

Der Pegel Dagebüll an der Küste Schleswig-Holsteins weist innerhalb des Untersuchungsgebiets die größte Veränderung der Tidedynamik auf. Hier unterliegen alle drei Tideparameter deutlichen Veränderungen. Während das MTnw um  $2,5 \pm 1,5$  [mm/a] gesunken ist, ist das MThw um  $4,7 \pm 0,7$  [mm/a] deutlich angestiegen. Diese gegenläufige Entwicklung führte zu einem enormen Anstieg des MThb um  $7,2 \pm 1,6$  [mm/a] (vgl. Abbildung 27).

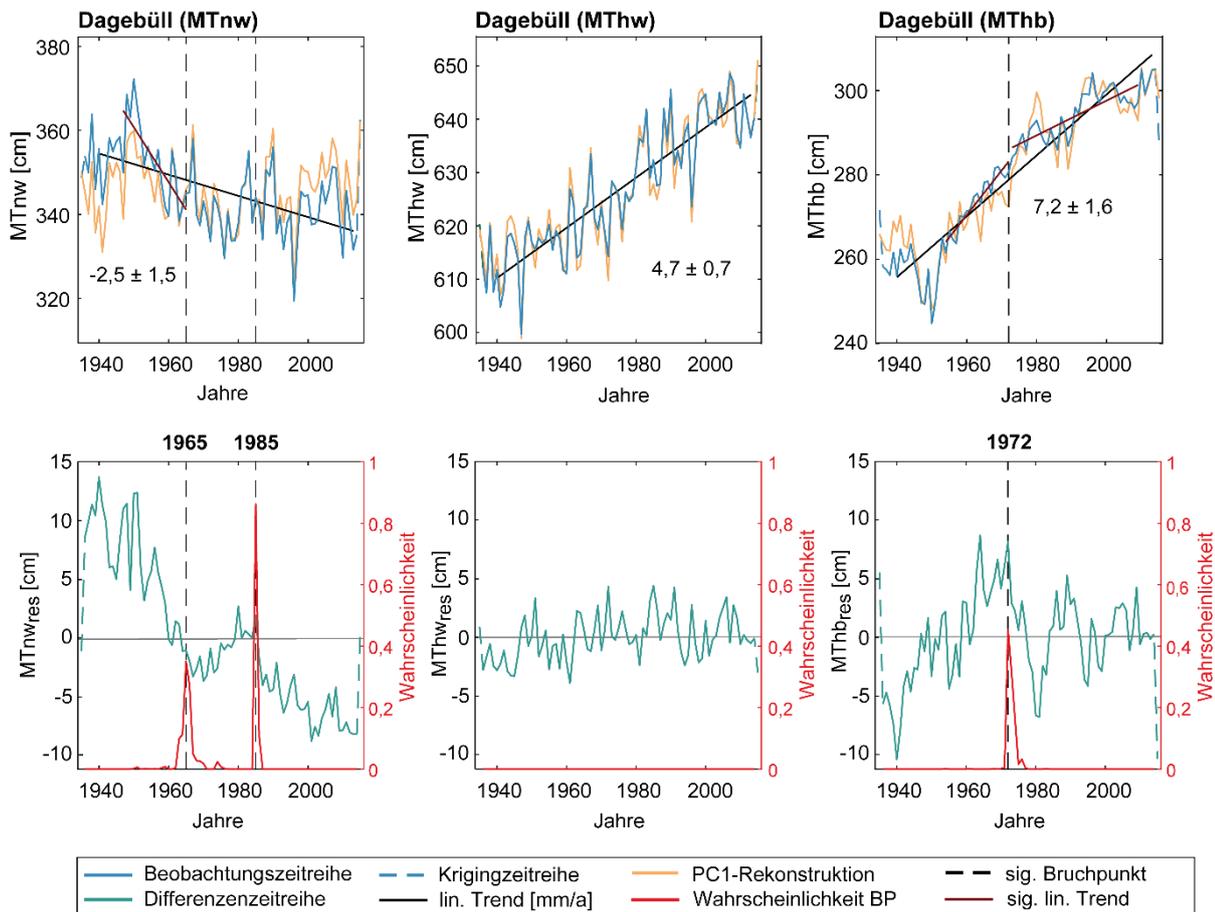


Abbildung 27: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Dagebüll.

Sichtbar werden die großen Veränderungen der Tidedynamik auch in den Differenzzeitreihen des MTnw und des MThb. So weist der Pegel als einziger im Untersuchungsgebiet im MTnw zwei signifikante Bruchpunkte in den Jahren 1965 (95%-Vertrauensbereich: 1963–1969) und 1985 (95%-Vertrauensbereich: 1984–1986) auf. Vom Beginn des Untersuchungszeitraums bis zum ersten Bruchpunkt des MTnw im Jahr 1965 sinkt die Differenzzeitreihe deutlich ab. Gleichzeitig können auch sinkende MTnw beobachtet werden, während das gemeinsame Signal eine eher stagnierende Entwicklung beschreibt. Im Zeitraum zwischen den beiden Bruchpunkten nimmt die Differenz zwischen Beobachtung und gemeinsamen Signal wieder ab und die beiden Zeitreihen verlaufen sehr ähnlich. Mit Eintreten des zweiten Bruchpunkts im Jahr 1985 nimmt die Differenz wieder plötzlich zu und steigt kontinuierlich bis zum Ende des Untersuchungszeitraums. In diesem Zeitraum lassen sich deutlich geringere MTnw verzeichnen,

als das gemeinsame Signal beschreibt. Demzufolge scheint die unstetige Veränderung in den 1980er Jahren eine Ursache zu besitzen, die zu einer Reduzierung der MTnw geführt hat. Eine weitere unstetige Veränderung der Tidedynamik spiegelt sich im Bruchpunkt des MThb im Jahr 1972 mit einem 95%-Vertrauensbereich von 1971 bis 1976 wieder. Zu Beginn des Untersuchungszeitraums wurden geringere MThb beobachtet, als das gemeinsame Signal beschreibt. Mit zunehmender Differenz der beiden Zeitreihen steigt auch das MThb bis zum Bruchpunkt in den 1970er Jahren wesentlich schneller als der gemeinsame Anteil der Entwicklung. Mit der unstetigen Veränderung fällt die Differenz zwischen Beobachtung und dem gemeinsamen Signal plötzlich ab und die beiden Zeitreihen beschreiben ähnliche Entwicklungen. Der zu Beginn schnellere Anstieg des MThb als das gemeinsame Signal deutet darauf hin, dass neben dem großräumigen Einfluss, ein lokaler Effekt den Anstieg bis zum Bruchpunkt verstärkt haben muss. Dieser Effekt scheint jedoch mit Eintreten des Bruchpunktes keinen Einfluss mehr zu besitzen, da die beiden Zeitreihen einen ähnlichen Anstieg beschreiben. Lediglich in der Differenzzeitreihe des MThw konnte weder eine stetige noch eine unstetige Veränderung festgestellt werden. Folglich kann das mittlere Tidehochwasser an diesem Pegel als unbeeinflusst von lokalen Effekten beschrieben werden und die starke Zunahme scheint lediglich durch die großräumige Entwicklung verursacht.

Für die unstetigen Veränderungen am Pegel Dagebüll lassen sich jedoch keine Ursachen aufgrund von in zeitlicher oder räumlicher Nähe stattgefundenen Baumaßnahmen finden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass hier nicht zwingend ein Fehler im Verfahren vorliegt und es sich dennoch um lokale Effekte handelt. Insbesondere eine lückenhafte Informationsgrundlage zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen macht eine Zuordnung innerhalb dieses Projekts unmöglich, alle lokalen Effekte mit plausiblen Ursachen zu begründen. Jedoch lassen sich auch andere Ursachen nicht ausschließen. Dazu können kleinräumige und nicht als Bruchpunkte detektierbare Änderungen zählen, wie bspw. morphologische Prozesse und Entwicklungen, deren Kippunkt (noch) nicht erreicht ist. Insbesondere in komplexen Systemen wie der Deutschen Bucht führen kontinuierliche Änderungen von kleinräumigen Randbedingungen zu allmähliche Systemreaktion. Wie auch bei dem Prinzip der Kippunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al., 2008) sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung nicht immer konstant und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen. Aus diesem Grund können Auswirkungen sichtbar werden, die sich nicht offensichtlich zeitlich oder örtlich einer Ursache zuordnen lassen, wie auch vermutlich am Pegelstandort Dagebüll.

## 7.19 Hörnum

Am Pegel Hörnum wird die Veränderung der Tidedynamik insbesondere im steigenden MThw und MThb deutlich. Während das MTnw über den Untersuchungszeitraum keine signifikante Veränderung aufweist, ist das MThw mit  $4,0 \pm 0,7$  [mm/a] und das MThb mit  $3,9 \pm 0,9$  [mm/a] angestiegen (vgl. Abbildung 28). Im MTnw schwankt zudem die Differenz zwischen Beobachtung und dem gemeinsamen Signal um Null und es lassen sich zudem keine unstetigen Veränderungen feststellen. Da das MTnw also dieselbe stagnierende Entwicklung wie der gemeinsame Anteil des Signals beschreibt, kann hier davon ausgegangen werden, dass keine lokalen Effekte das MTnw am Pegel Hörnum

beeinflusst haben. Dasselbe gilt auch für das MThw. Auch hier lassen sich weder Bruchpunkte noch stetige Veränderungen der Differenzzeitreihe erkennen. Obwohl im MThb erhöhte Werte der Wahrscheinlichkeit auf einen Bruchpunkt vorliegen, können diese mit 91,6 % im Zeitraum von 1951 bis 1967 nicht als signifikant gewertet werden (Signifikanzgrenze bei 95 %). Auf diese erhöhten Werte schwankt die Differenz wiederum ebenfalls um Null und auch im MThb beschreiben die Beobachtungswerte und das gemeinsame Signal eine sehr ähnliche Veränderung. Der Pegel Husum auf der südlichen Spitze der Insel Sylt im Küstenvorfeld Schleswig-Holsteins kann folglich als relativ unbeeinflusst von lokalen Effekten betrachtet werden und es lässt sich die These ableiten, dass die Zunahme der Tidedynamik durch eine großräumige Beeinflussung angetrieben wurde.

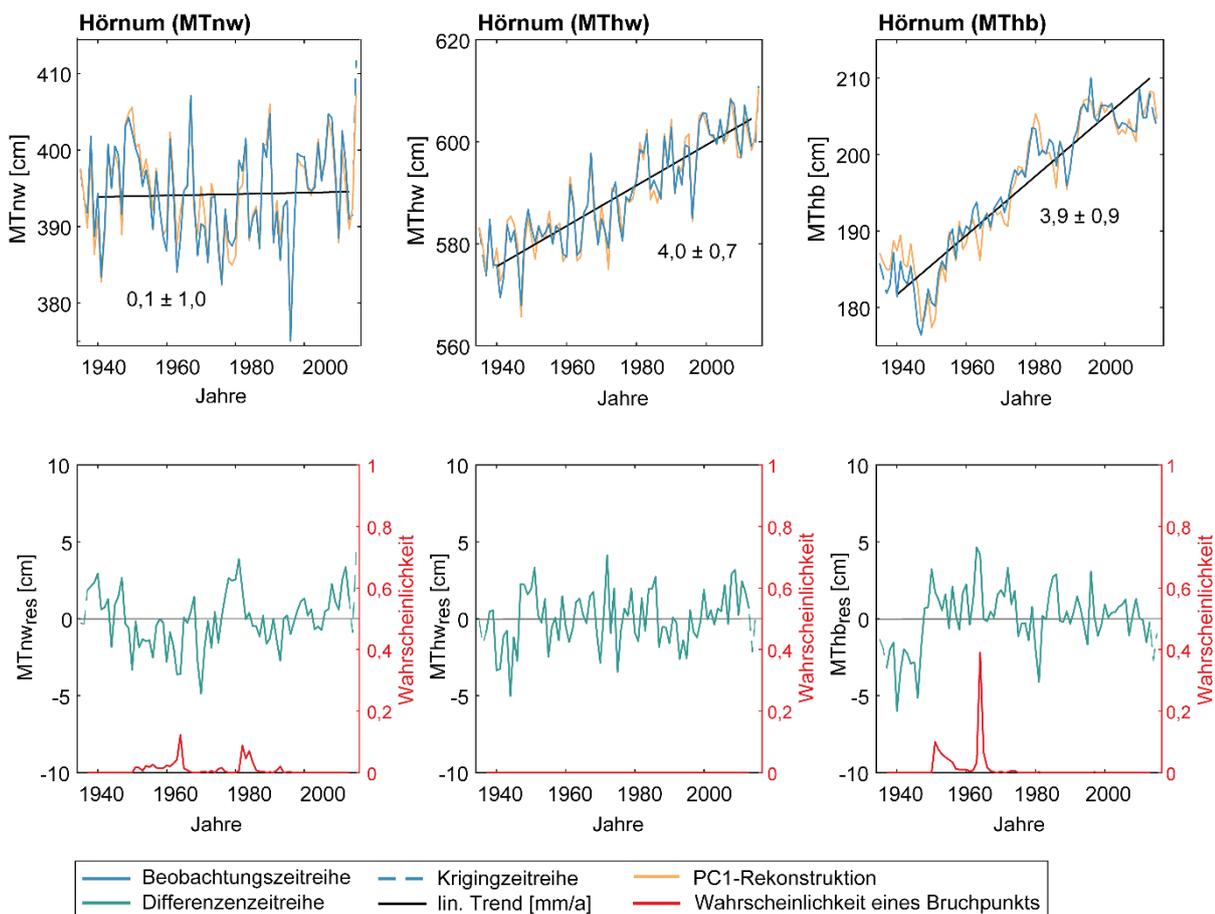


Abbildung 28: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Hörnum.

## 7.20 List

Am Pegel List im Norden der Insel Sylt lassen sich innerhalb des Untersuchungszeitraums deutlich ansteigende MThw mit einem Trend von  $3,1 \pm 0,6$  [mm/a] feststellen, während das MTnw keinen signifikanten linearen Trend aufweist (vgl. Abbildung 29). Als Folge zunehmenden Differenz der Scheitelwasserstände ist auch das MThb um  $2,6 \pm 0,7$  [mm/a] angestiegen. Wie auch am Pegel Husum, ebenfalls auf der Insel Sylt,

kann auch am Pegel List keine unstetige Veränderung festgestellt werden. Die gemeinsamen Signale von MThw und MThb beschreiben nahezu die gleichen Entwicklungen und die Differenzen schwanken dabei nahezu gleichbleibend um Null. Die beiden Parameter MThw und MThb lassen sich folglich mit den hier zugrunde gelegten Annahmen als unbeeinflusst durch lokale Effekte beschreiben. Im MTnw hingegen scheint die Differenz über den Untersuchungszeitraum etwas anzusteigen und die Beobachtungswerte weisen einen leichten Anstieg auf, während das gemeinsame Signal des MTnw eine deutlich stagnierende Entwicklung zeigt. Durch die etwas größer werdende Differenz scheint das MTnw eine Komponente zu enthalten, die das gemeinsame Signal überlagert. Da allerdings im MTnw kein signifikanter linearer Trend beobachtet wurde, kann eine solche Beeinflussung nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Zudem weist die Zeitreihe keinen Bruchpunkt auf, wodurch ein Startpunkt eines potentiellen lokalen Effektes markiert würde.

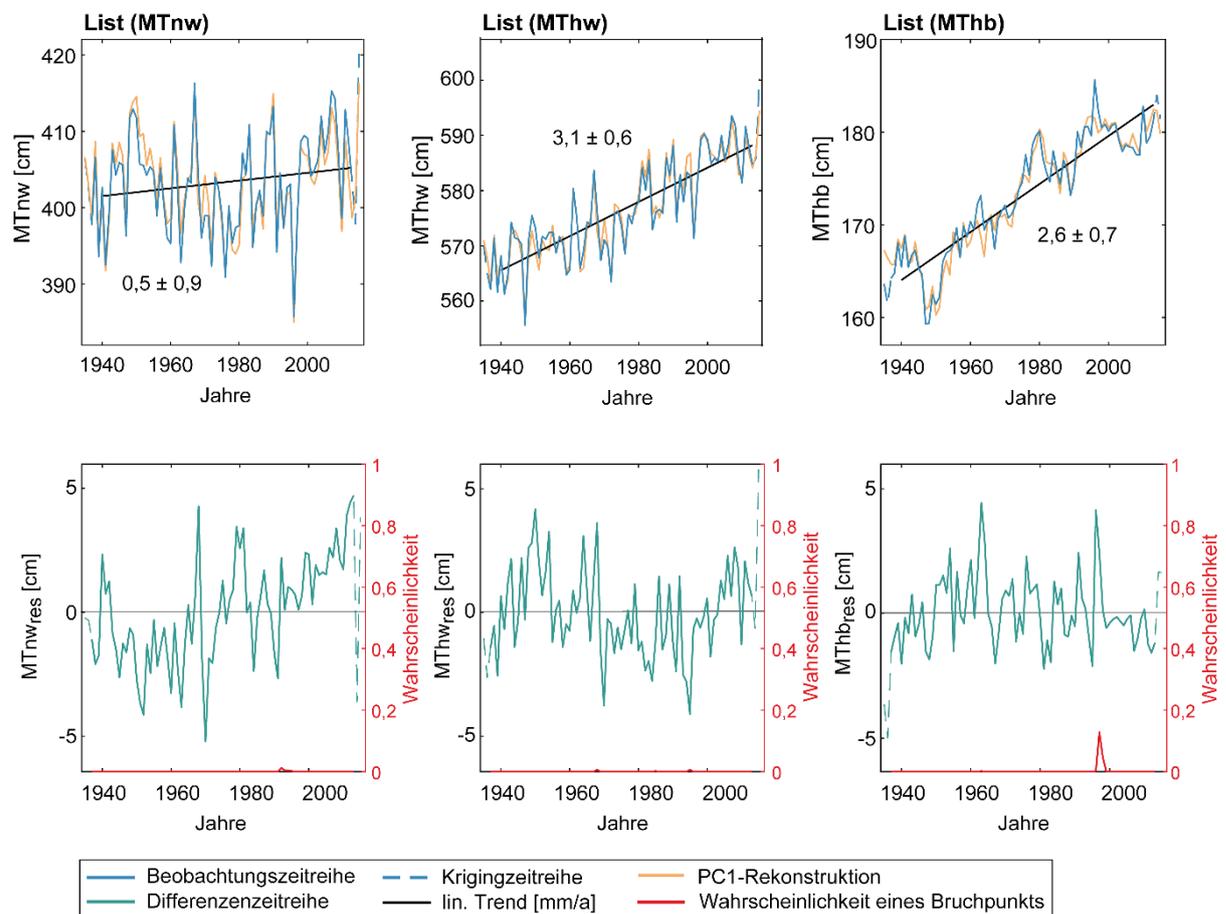


Abbildung 29: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel List.

## 7.21 Esbjerg Havn

Am Pegel Esbjerg Havn konnte ein signifikanter Anstieg der drei untersuchten Tideparameter MTnw, MThw und MThb festgestellt werden (vgl. Abbildung 30). Während das MThw rapide um  $4,9 \pm 1,1$  [mm/a] innerhalb des Untersuchungszeitraums zugenommen hat, ist auch das MTnw, wenn auch deutlich langsamer, um  $1,7 \pm 1,4$  [mm/a]

angestiegen. Als Folge der steigenden Differenz der Scheitelwasserstände konnte auch ein zunehmendes MThb um  $3,2 \pm 0,8$  [mm/a] ermittelt werden. Betrachtet man zusätzlich die Differenzenzeitreihen am Pegel Esbjerg Havn, so lässt sich sehr sicher sowohl im MTnw als auch im MThw ein Bruchpunkt im Jahr 1990 (Wahrscheinlichkeit im MTnw: 100 % und Wahrscheinlichkeit im MThw: 98,6 %) feststellen. Nur im MThb konnte keine unstetige Veränderung festgestellt werden. Ursächlich dafür scheint die simultane Veränderung der Wasserstände, die sich nicht in einer plötzlich veränderten Differenz der Tidewasserstände äußert und folglich nicht im MThb bemerkbar ist.

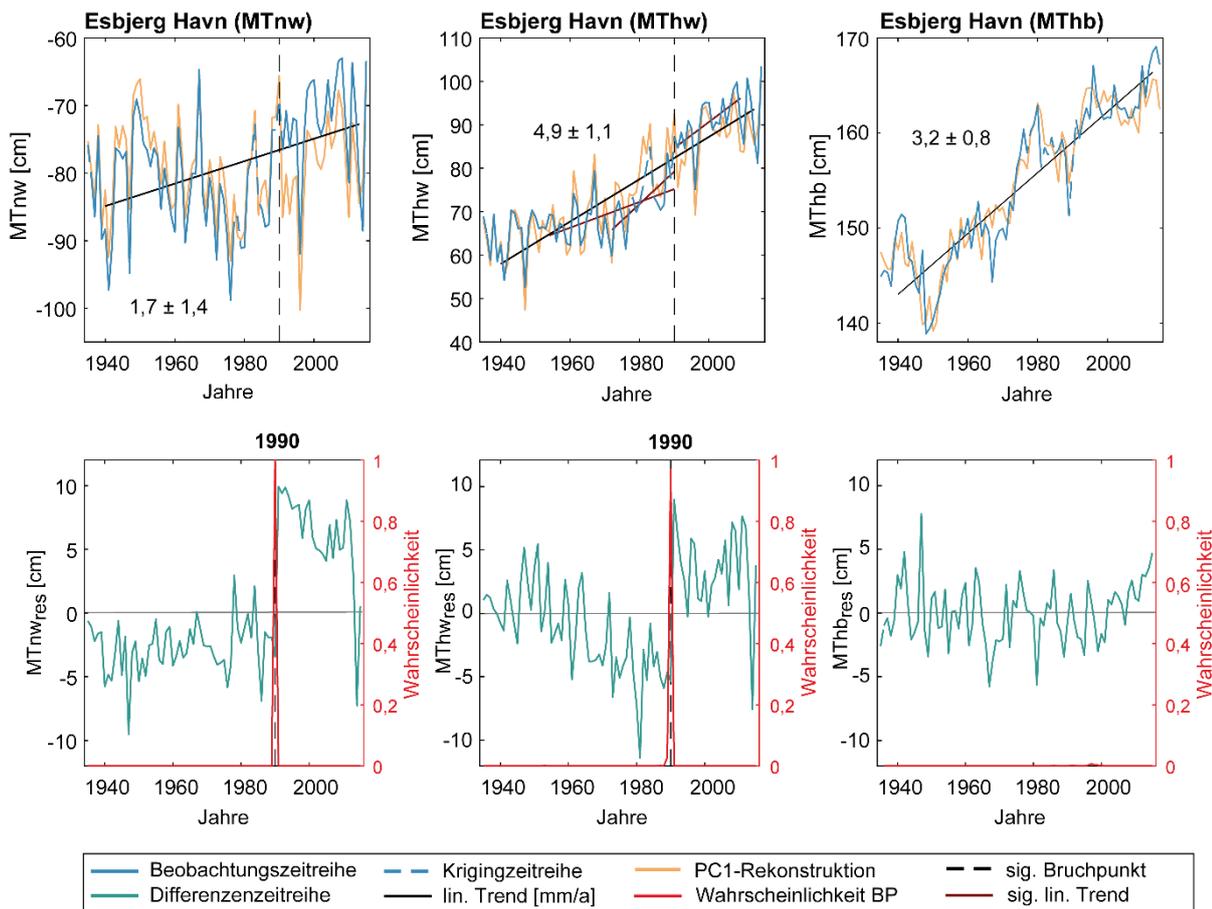


Abbildung 30: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Esbjerg Havn (DK).

Eine Untersuchung der Teilzeitreihen, die sich durch die vor und nach dem Bruchpunkt ergeben, ergibt, dass vor dem Jahr 1990 die MTnw am Pegel Esbjerg Havn einen stagnierenden Verlauf zeigen. Auch nach dem Bruchpunkt beschreibt das MTnw einen geringeren Anstieg als über den gesamten Untersuchungszeitraum. Wie in der Differenzenzeitreihe deutlich zu erkennen, findet eine plötzliche Erhöhung der Differenz zwischen den Beobachtungen und dem gemeinsamen Signal statt. Dieser plötzliche Anstieg nach dem Jahr 1990 prägt sich auch im MTnw aus und scheint für den positiven Trend über den gesamten Untersuchungszeitraum verantwortlich zu sein. Ähnliches lässt sich auch im MThw feststellen. Das MThw beschreibt vor und nach dem Bruchpunkt jeweils geringere Zunahmen als über den gesamten Zeitraum und die Differenzenzeitreihe weist eine plötzliche Erhöhung der Differenz zwischen Beobachtung und gemeinsamen Sig-

nal mit dem Bruchpunkt im Jahr 1990 auf. Auch hier überlagert sich die plötzliche Erhöhung mit den eher mäßig ansteigenden MThw und führt zu einem drastischen Anstieg der Beobachtung. Die Differenzenzeitreihen beider Tidewasserstände weisen zum Zeitpunkt des Bruchpunkts eine plötzliche Erhöhung von rund 5 bis 10 cm auf. Es scheint also jeweils ein Offset im Jahr 1990 aufgetreten zu sein, der eine Erhöhung beider Parameter verursacht hat. Als potentielle Ursache dieses Bruchpunkts ist die Neuinstallation des Pegels im Februar 1991 (PSMSL, 2019; Holgate et al., 2013) zu nennen, die ggf. zu einem Versatz der Referenzhöhe geführt hat. Die Untersuchung höher aufgelöster Zeitreihen der Tidewasserstände auf sprunghafte Änderungen im Zeitraum Februar 1991 könnte zu einer Plausibilisierung dieser Hypothese führen, ist jedoch im Rahmen der angewendeten statistischen Analysen und untersuchten Jahresmittelwerte nicht möglich.

Der Pegel Esbjerg Havn liefert ein relevantes Beispiel das verdeutlicht, dass es notwendig ist, stets die einzelnen Tideparameter gleichzeitig zu betrachten und warum bspw. nur die Betrachtung des MThb nicht ausreichend ist um lokale Effekte zu untersuchen.

## 8 Untersuchung von räumlichen Mustern

Weiterführend wurden die detektierten Bruchpunkte nicht nur an den einzelnen Pegelstandorten separat untersucht, sondern zusätzlich in einer Gesamtübersicht getrennt nach den drei Tideparametern, um räumliche Muster zu detektieren. Die Übersicht der Bruchpunkte im MThb ist in der Abbildung 31 abgebildet. Hier ist zu erkennen, dass die Verteilung der wahrscheinlichsten Lage von enthaltenen Bruchpunkten stark über das Untersuchungsgebiet variiert.

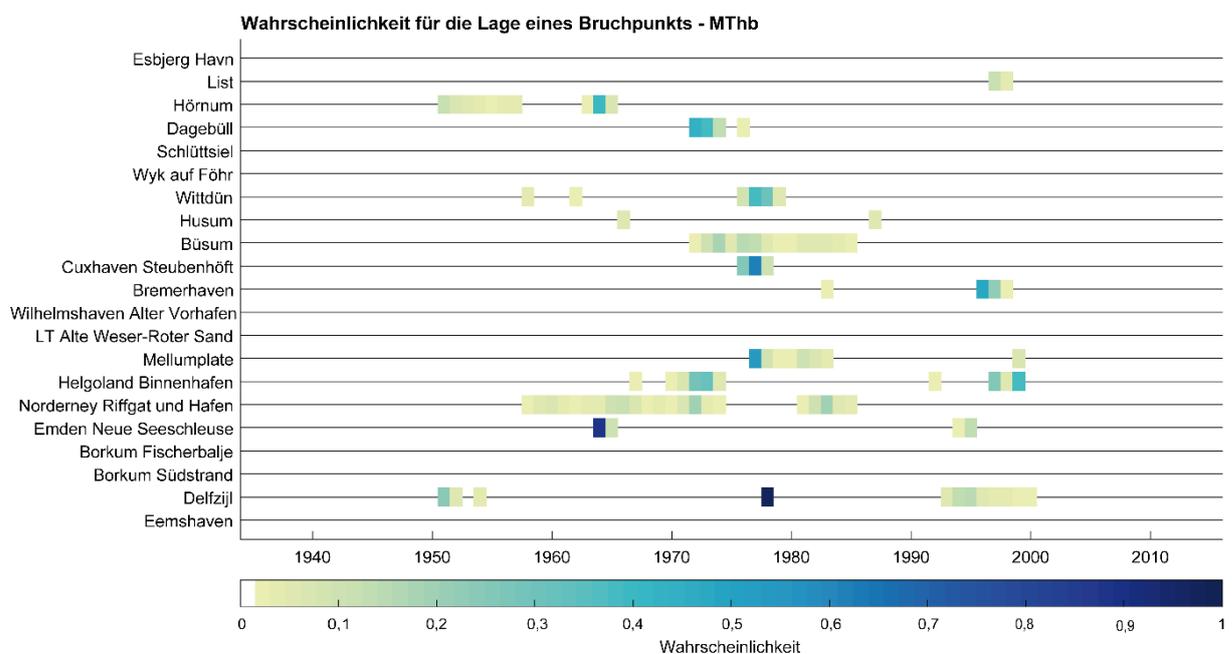


Abbildung 31: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzenzeitreihen des MThb.

Es lässt sich lediglich ein relativ nah beieinanderliegendes Pegelpaar finden, das im selben Zeitraum erhöhte Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt aufweist. Dabei handelt es sich um die Pegel Cuxhaven Steubenhöft und Büsum, mit einer Entfernung von ca. 30 km (Luftlinie, keine Landmasse zwischen den Pegeln), die in den 1970er Jahren beide mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine abrupte Veränderung des Tidehubs aufweisen. Jedoch ist nach den pegelspezifischen Auswertungen (vgl. Kap. 7.12 und 7.13) eine gemeinsame Ursache dieser Änderung nahezu ausgeschlossen bzw. nicht zu erkennen. Alle weiteren Pegel, die in einem gemeinsamen Zeitraum abrupte Veränderungen enthalten, sind deutlich weiter voneinander entfernt als das genannte Pegelpaar und folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Entfernung gemeinsame lokale Einwirkungen ausschließt. Auch lässt sich kein getrenntes Muster für die beiden Küstenabschnitte Niedersachsens und Schleswig-Holsteins finden.

Auch bei der Betrachtung der Übersichten für die Bruchpunkte der beiden Tidewasserstände (vgl. für MTnw: Abbildung 32 und MThw: Abbildung 33) können keine eindeutigen räumlichen oder zeitlichen Muster abgeleitet werden. Einzig die Pegel Norderney Riffgat und Hafen, Emden Neue Seeschleuse und Borkum Südstrand weisen gemeinsam in der Mitte der 1960er Jahre erhöhte Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt auf und liegen jeweils etwa 40 km Luftlinie voneinander entfernt. Doch betrachtet man die Lage der Pegel, insbesondere des Pegels Emden Neue Seeschleuse genauer, so ist eine gemeinsame Ursache für die abrupten Änderungen sehr unwahrscheinlich. Der Pegel Emden Neue Seeschleuse liegt im Bereich der Dollart Bucht und damit im Mündungsbereich der Ems. Eine Tidewelle aus der Nordsee muss demnach zunächst den zwischen den Pegeln Emden Neue Seeschleuse und Borkum Südstrand gelegenen Pegel Delfzijl, ebenfalls im Mündungsbereich der Ems gelegen, passieren. Demnach ist zu erwarten, dass gemeinsame Änderungen der drei genannten Pegel, ebenfalls am Standort Delfzijl sichtbar werden sollten. Hier lässt sich jedoch kein Bruchpunkt in den 1960er Jahren feststellen. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die hohen Wahrscheinlichkeiten für einen Bruchpunkt an den Pegeln Emden Neue Seeschleuse, Borkum Südstrand und Norderney Riffgat und Hafen, keine gemeinsame Ursache besitzen und damit kein räumliches Muster darstellen.

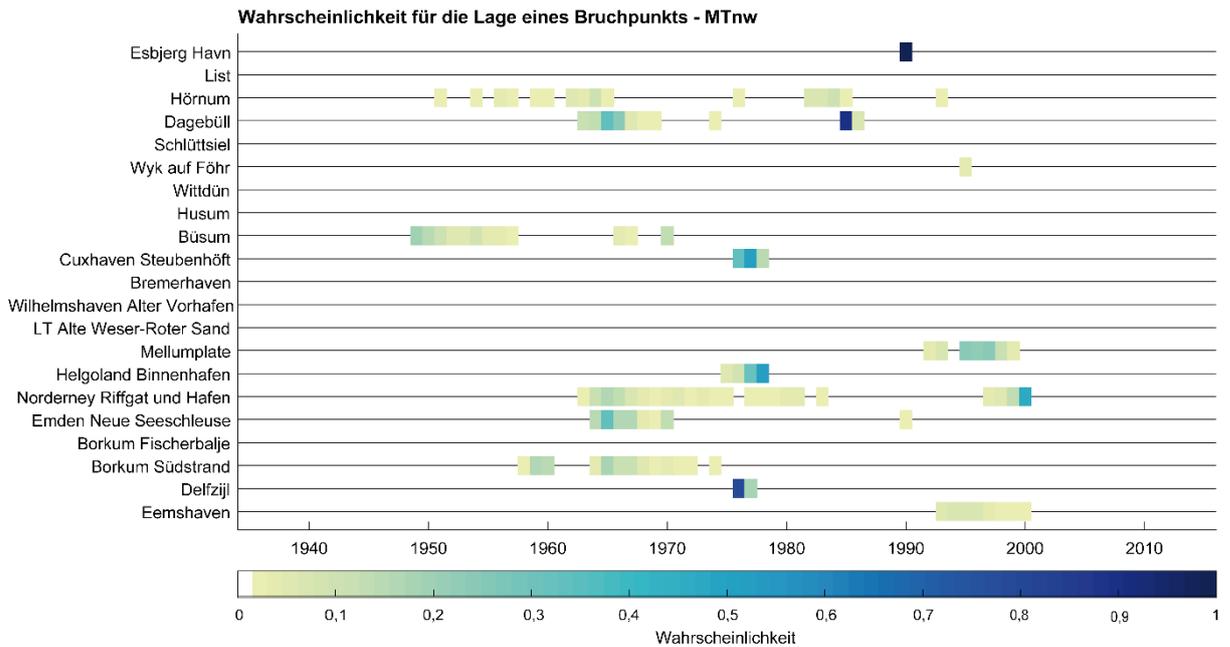


Abbildung 32: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MTnw.

Es scheinen also keine zeitlichen und räumlichen Muster der abrupten Veränderungen vorhanden zu sein. Folglich besitzen die detektierten Bruchpunkte sehr wahrscheinlich unterschiedliche Ursachen, die jeweils eher kleine Wirkungsradien aufweisen. Diese Betrachtung der Bruchpunktanalyse hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Gemeinsamkeiten der Pegelstandorte im Untersuchungsgebiet bestätigt die zugrundeliegende These, dass die Auswirkungen von einzelnen kleinräumigen (Bau-) Maßnahmen räumlich sehr begrenzt zu sein scheinen und die Änderungen der Tideparameter lokal stark variieren.

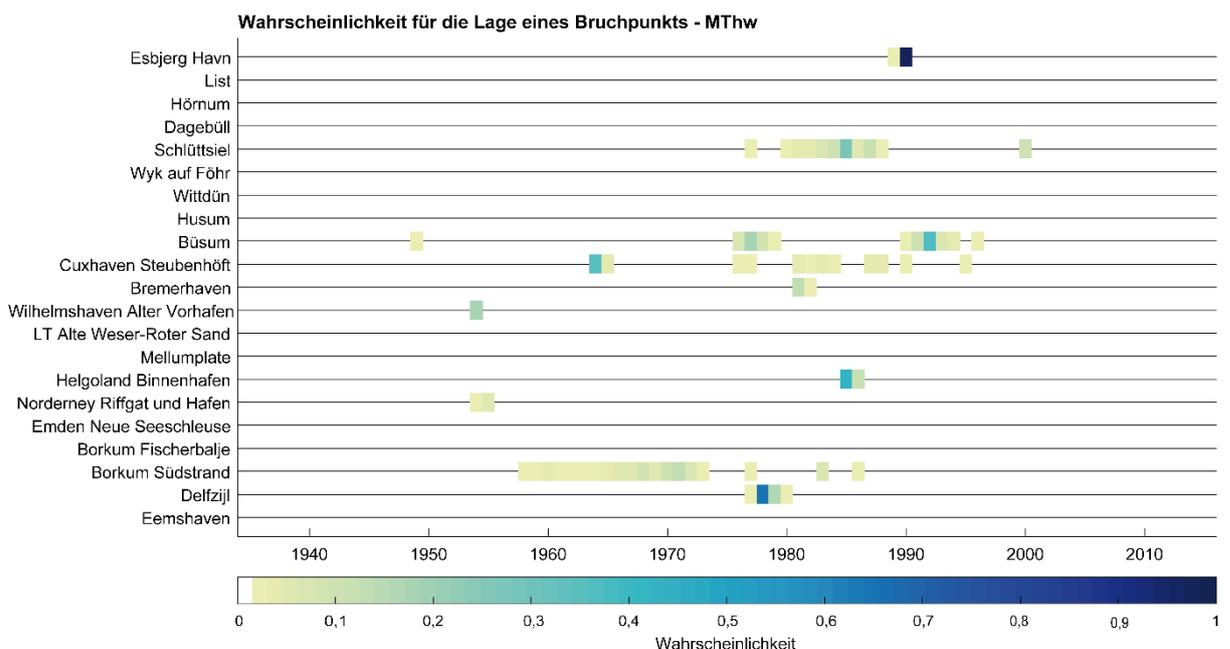


Abbildung 33: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MThw.

## 9 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Entlang der deutschen Nordseeküste ist es seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu großen 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 lokale Effekte zu enthalten. Diese lokalen Effekte können z. B. durch bauliche Maßnahmen und lokale morphologischen 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 gelegte 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 Effekten stehen.

Einer der wesentlichen Schritte der Methodik zur Separierung der klein- und großräumigen Signale in jeder Zeitreihe ist die sog. Hauptkomponentenanalyse (*engl. Principal Component Analysis, PCA*). Es wurde davon ausgegangen, dass die erste Hauptkomponente (*engl. Principical Component, PC*), die den Großteil der Varianz im Untersuchungsgebiet beschreibt, auch die gemeinsamen Entwicklungen abbildet. Demzufolge entsprechen alle weiteren, in den höheren Hauptkomponenten enthaltenen Veränderungen den lokalen Effekten. Rund 90 % der Varianz wird im Untersuchungsgebiet im Fall der MThw- und MThb-Zeitreihen durch die erste PC abgebildet, wohingegen das MTnw nur zu 70 % durch PC1 repräsentiert wird. Dies bedeutet, dass MThw und MThb signifikant stärker von großräumigen Einflüssen gesteuert werden. Zudem weisen die Zeitreihen des MTnw räumlich variierende erklärte Varianzen der niedrigeren PC auf und nur rund 70 % lassen sich bereits 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 Differenzenbildung aus der Zeitreihen eliminieren.

Mithilfe einer Bruchpunktanalyse lassen sich un stetige Veränderungen in den Tidekennwerten detektieren. Angewendet wurde die Bruchpunktanalyse auf die jeweils ermittelten Differenzenzeitreihen zwischen Beobachtungszeitreihen und dem gemeinsamen Signal an den einzelnen Pegelstandorten. Im Weiteren können die linearen Trends der Teilzeitreihen betrachtet 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 un stetigen Änderungen können für die Bruchpunkte potentielle Ursachen gefunden werden. Aufgrund der resultierenden Änderung nach einen Bruchpunkt, lassen sich die zugeordneten Ursachen plausibilisieren und 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 vorgestellte Methodik ist nicht geeignet um Gegenteiliges nachzuweisen. 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 hinsichtlich einzelner lokaler 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 Nordseeästuarie wurden als unstetige Veränderung, vorwiegend aber nicht ausschließlich im MTnw, sichtbar. So sorgte die Vertiefung des Emdener Fahrwassers zwischen 1952 und 1972 wahrscheinlich für Bruchpunkte an den Pegeln Borkum Südstrand und Emden, der Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998/99 für Bruchpunkte an den Pegeln Mellumplate und Bremerhaven und die Elbvertiefung im Zeitraum von 1974 bis 1978 scheint sich als unstetige Veränderung von MTnw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft zu zeigen. Auch die Eindeichungsmaßnahmen der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978 lässt sich sehr deutlich im MThb des Pegels Büsum erkennen und beschreiben durch ansteigendes MTnw und stagnierendes MThw. Zudem konnten Hafenumbaumaßnahmen wie am Pegel Delfzijl, sichtbar durch einen Bruchpunkt gegen Ende der 1970er, in den Aufzeichnungen detektiert werden. Außerdem scheint die Methode geeignet zu sein, einen Pegelversatz in den Zeitreihen der Tidekennwerte zu entdecken. So lässt sich vermutlich die Umstellung des Pegels Norderney Hafen auf Norderney Riffgat in den 1960er Jahren und am Pegel Esbjerg Havn eine plötzliche Erhöhung von MTnw und MThw um einige Zentimeter aufgrund einer Neuinstallation des Pegels feststellen. 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 können. Dies muss jedoch nicht zwingend auf einen Fehler im Verfahren hinweisen, sondern auch eine mangelhafte Informationsgrundlage zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen kann es erschweren, allen kleinräumigen Änderungen Ursachen zuzuordnen. Auch andere Ursachen sind nicht auszuschließen, die im Rahmen dieser Studie nicht adressiert wurden, wie kleinräumige und nicht als Bruchpunkte detektierbare Änderungen. Dazu können bspw. morphologische Prozesse zählen und Entwicklungen, deren Kippunkt (noch) nicht erreicht ist. Insbesondere in solch komplexen System wie dem der Nordsee kann nicht davon ausgegangen werden, dass kontinuierliche Änderungen von groß- und kleinräumigen Randbedingungen auch immer allmähliche Systemreaktion verursachen. Wie auch bei dem Prinzip der Kippunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al., 2008) sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung nicht immer konstant und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen. Aus diesem Grund, können ggf. Auswirkungen sichtbar werden,

deren Ursachen bereits zeitlich zurückliegen und nicht offensichtlich zugeordnet werden können.

Die vorgestellte Methodik wurde zur Trennung von großräumigen und lokalen Anteilen der Veränderungen in den Aufzeichnungszeitreihen der Tidekennwerte entwickelt. Darüber hinaus sind Schlussfolgerungen über die Wirkung von vereinzelt Baumaßnahmen möglich. Zudem bietet die Methodik einen zielführenden Ansatz, den Einfluss von großräumigen Entwicklungen auf die Tidedynamik an einzelnen Pegelstandorten zu beschreiben. Nichtsdestotrotz ist die Entwicklung von verbesserten Verfahren zur Quantifizierung der Auswirkungen unerlässlich. Weiterentwickelte oder neue Verfahren können zur Beantwortung der Forschungsfrage nach dem Anteil der beteiligten Prozesse beitragen. Auch ist noch nicht ganzheitlich geklärt, wie sich die räumliche Ausdehnung von einzelnen lokalen Effekten bestimmen lässt. Weiterführend ist es notwendig, neben der Auswertung von kleinräumigen Veränderungen die Ursachen für die deutlich ausgeprägteren großräumigen Entwicklungen zu verstehen. Dazu gehört die Beschreibung, welche großräumigen Effekte wie bspw. ozeanographischen Prozesse anteilig zu den Entwicklungen beigetragen haben. Da die zugrundeliegenden Prozesse und Wechselwirkungen für Änderungen der Tidedynamik sind noch nicht gänzlich verstanden und können nur mittels einer ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtsystems Nordsee untersucht werden. Ein weiterer Aspekt, der in diesem Forschungsvorhaben unter der Betrachtung von langzeitlichen Entwicklungen nicht adressiert wurde, aber relevante Erkenntnisse in weiterführenden Analysen liefern kann, ist die zeitliche Variabilität. So könnte der Einfluss des saisonalen Zyklus auf die Entwicklung der Tidedynamik mithilfe einer höher aufgelösten Datengrundlage wie bspw. mit monatlichen Mittelwerten der Tideparameter untersucht werden.

## 10 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das dieses Projekt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) finanziell über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Weiterhin danken wir dem KFKI für die fachliche Unterstützung im Rahmen der projektbegleitenden Gruppe. Unser Dank gilt auch allen Behörden und Institutionen, die Daten für die Realisierung des Projektes bereitgestellt haben. Zuletzt bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit.

Siegen, März 2020



(Andra Ebener, M.Sc.)



(Dr.-Ing. Arne Arns)



(Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen)



(Leon Jänicke, M.Sc.)

## 11 Schriftenverzeichnis

- Abdi, H. & Williams, L. J. (2010): Principal component analysis. In: *WIREs Comp Stat* 2 (4), S. 433–459. DOI: 10.1002/wics.101.
- Aldridge J. N.; Parker, E. R.; Bricheno, L. M.; Green, S. L. & van der Molen, J. (2015): Assessment of physical disturbance of the northern European Continental shelf seabed by waves and currents; *Continental Shelf Research*, 108, 121–140.
- Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S. & Jensen, J. (2015): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight, *Coastal Engineering*, 96, 118,131.
- Arns, A., Dangendorf, S., Jensen, J.; Talke, S., Bender, J. & Pattiaratchi, C. (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Sci Rep* 7, 40171 (2017) doi:10.1038/srep40171.
- Bartels, J. (1952): *Gezeitenkräfte*, Handbuch der Physik, Bd. XLVIII, 1952.
- BAW (2014): *Die Unterems im Fokus. Ursachen der Verschlickung und mögliche Gegenmaßnahmen*. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.); BAWAktuell 03/2014; ISSN 2192-3078.
- Brasseur, G. P.; Jacob, D. & Schuck-Zöllner, S. (2017): *Klimawandel in Deutschland; Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum. DOI 10.1007/978-3-662-50397-3\_1.
- Cowtan, K. & Way, G. R. (2014): Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140: 1935–1944, July 2014, DOI: 10.1002/qj.2297.
- Cressie, N. (1990): The origins of kriging. *Mathematical Geology*. April 1990, Volume 22, Issue 3, pp 239-252.
- Dangendorf, S. & Jensen, J. (2011): Untersuchungen zur Detektion von Instationaritäten in küstenhydrologischen Zeitreihen; In: *Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen*, Heft 2, 2011; CoastDoc Seminar 2010, ISSN 1868-6613.
- Devlin, A. T.; Zaron, D. A.; Talke, S. A. & Pan, J. (2018): Seasonality of Tides in Southeast Asian Waters. *J. Phys. Oceanogr.*, 48, 1169-1190, doi:10.1175/JPO-D-17-0119.1.
- DIN 4049-3:1994-10 (1994): *Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.
- FGG Elbe (2007): *Sauerstoffgehalte der Tideelbe; Entwicklung der kritischen Sauerstoffgehalte im Jahr 2007 und in den Vorjahren, Erörterung möglicher Ursachen und Handlungsoptionen; Arbeitsgruppe "Oberflächengewässer" in der Flussgemeinschaft Elbe (FGG); 2007.*
- Flather, R. A. (2001): Storm surges. In J. H. Steele, S. A. Thorpe, & K. K. Turekian (Eds.), *Encyclopedia of ocean sciences* (pp. 2882–2892). San Diego, CA: Academic Press.
- Führböter, A. & Jensen, J. (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste* 42. Heide, Holstein: Boyens. S. 78-100.
- Gönnert, G. (2003): Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht - Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. In: *Die Küste* 67. Heide, Holstein: Boyens. S. 185-365.

- Green, J. A. M. (2010): Ocean tides and resonance. *Ocean Dynamics*, 60(5), 1243–1253. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0331-1>.
- Green, J. A. M.; Molloy, J. L.; Davies, H. S. & Duarte, J. C. (2018): Is there a tectonically driven supertidal cycle? *Geophysical Research Letters*, 45.
- Haigh, I. D., Nicholls, R. J., & Wells, N. C. (2010): Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900–2006. *Continental Shelf Research*, 30(9), 1042–1055. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.002>
- 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. (2020). 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>.
- Holgate, S. J.; Matthews, A.; Woodworth, P. L.; Rickards, L. J.; Tamisea, M. E.; Bradshaw, E.; Foden, P. R.; Gordon, K. M.; Jevrejeva, S. & Pugh, J (2013).: New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level. In: *Journal of Coastal Research*, Jg. 29, 3, 493-504. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1, 2013.
- Hollebrandse, F. A. P. (2005): Temporal development of the tidal range in the southern North Sea; Dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft; 2005.
- Jänicke, L.; Ebener, A.; Dangendorf, S.; Arns, A.; Niehüser, S.; Haigh, I.; Woodworth, P. & Jensen, J. (in prep.): Assessing 20th century tidal range changes in the North Sea.
- Jensen, J. (1984): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. In: *Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig* (83), 1984.
- Jensen, J.; Mügge, H.-E. & Visscher, G (1988): Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste* 47. Heide, Holstein: Boyens. 1988.
- Jensen, J.; Mügge, H.-E. & Schönfeld, W. (1992): Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht\* \*(Abschlussbericht zum KFKI-Projekt - Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht - ). In: *Die Küste* 53. Heide, Holstein: Boyens. S. 211-275.
- Jensen, J., Frank, T. & Wahl, T. (2011): Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). In: *Die Küste* (78), 2011.
- Jolliffe I. T. (2002): *Principal Component Analysis*, Springer Series in Statistics, doi: 10.1007/b98835.
- Keller, H. (1901): *Weser und Ems, ihre Stromgebiete und ihre wichtigsten Nebenflüsse: Eine hydro-graphische, wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Darstellung.* Berlin: Dietrich Reimer, 1901.
- Krige, D. G. (1951): A Statistical Approaches to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52, 119-139.

- Lehmann, C. (2018): 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. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system; *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (6), pp. 1786-1793; <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>.
- Malcherek A. (2010) Tidedynamik in Ästuaren. In: *Gezeiten und Wellen*. Vieweg+Teubner; DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9764-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9764-0_5); 2010.
- Marmer, H. A. (1935): *Tides and Currents in New York Harbor*, U. S. C. & G. S. Special Publication 111, revised ed, Washington, D. C.
- Mawdsley, R. J. & Haigh I. D. (2016): Spatial and Temporal Variability and Long-Term Trends in Skew Surges Globally. *Front. Mar. Sci.* 3:29. doi: 10.3389/fmars.2016.00029.
- Mudersbach, C.; Wahl, T.; Haigh, I. & Jensen, J (2013): Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes. *Continental Shelf Res* 65, 111–120.
- Müller, M. (2011): Rapid change in semi-diurnal tides in the North Atlantic since 1980, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11602 doi: 10.1029/2011GL047312.
- Müller, M.; Arbic, B. K. & Mitrovica, J. X. (2011): Secular trends in ocean tides: Observations and model results. *J. Geophys. Res.*, 116, C05013, doi:10.1029/2010JC006387.
- Niemeyer, H. D. (1999): Change of mean tidal peaks and range due to estuarine waterway deepening; 26th International Conference on Coastal Engineering; Copenhagen, Denmark; DOI: 10.1061/9780784404119.251.
- Ohlig, C. (2005): *Ostfriesland und das Land Oldenburg im Schutz der Deiche und weitere wasserhistorische Beiträge*; Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft (DWhG) e.V., Band 6, Siegburg 2005, ISBN 3-8334-1503-7.
- Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) (2019): "Tide Gauge Data", Retrieved 28 Oct 2019 from <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.
- Pickering, M. D., Wells, N. C., Horsburgh, K. J., & Green, J. A. M. (2012): The impact on the European Shelf tides by future sea-level rise. *Continental Shelf Research*, 35, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.11.011>.
- Pugh, D. & Woodworth, P. (2014): *Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*; Cambridge University Press: Cambridge, 395 pp.
- Rakhorst, D. (2003): *Veranderingen in het tijdverschil langs de Nederlandse kust*, Haarlem, Rijkswaterstaat RIKZ.
- Rigor, I. G.; Colony, R. L. & Martin S. (2000): Variations in surface air temperature observations in the arctic, 1979-97. *Journal of Climate*, Vol. 13: 2000.
- Rohde, R; Muller, R. A.; Jacobsen, R.; Muller, E.; Perlmutter, S.; Rosenfeld, A.; Wurtele, J.; Groom, D. & Wickham, C. (2013): A new estimate of the average earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinfor. Geostat: An Overview*. 1:1, doi:10.4172/gigs.1000101.
- Ruggieri, E. (2012): A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. In: *Int. J. Climatol.* 33 (2), S. 520–528. DOI: 10.1002/joc.3447.

- Şanal, Z. (2015): *Mathematik für Ingenieure, Grundlagen – Anwendungen in Maple*; Springer Vieweg; ISBN 978-3-658-10641-6.
- Schönfeld, W. & Jensen, J. (1991): Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln\* \*(Zwischenbericht zum KFKI-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“); In: *Die Küste* 52. Heide, Holstein: Boyens. S. 191-204.
- Schubert, R. & Rahlf, H. (2003): *Hydrodynamik des Weserästuars*; Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* Nr. 86, 2003.
- Siefert, W. & Jensen, J. (1993): *Fahrrinnenvertiefung und Tidewasserstände in der Elbe*; HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen, 130. Jahrgang, Nr. 10, 1993.
- Siefert, W. (1998): *Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen*. In: *Die Küste* 60. Heide, Holstein: Boyens. S. 1-115.
- Straub, H. (2004): *Langzeitverhalten von hydrologischen Größen*. KLIWA-Symposium 2004. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- Straub, H. (2004): *Langzeitverhalten von hydrologischen Größen*. KLIWA-Symposium 2004. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- Talke, S. A. & Jay, D. A. (2017): *Archival Water-Level Measurements: Recovering Historical Data to Help Design for the future*. US Army Corps of Engineers: Civil Works Technical Series, Re-port CWTS-02, ~50pp.
- Vierfuß, U. (2003): *Realisierte Strombaumaßnahmen an der Weser, Grundlagen für Strombau-Konzeptionen an Tideästuaren*; Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg, 2003.
- Wahl, T.; Jensen, J. & Frank, T. (2008): *Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline*. Proc. of the Coastal Cities Summit 2008 – Values and Vulnerabilities, St. Petersburg, Florida, USA, 2008.
- Wahl, T., Jensen, J., Frank, T. & Haigh, I. D. (2011): *Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years*. *Ocean Dynamics* 61 (5), 701–715. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-011-0383-x>.
- Wanninger, L.; Rost, C.; Sudau, A.; Weiss, R.; Niemeier, W.; Tengen, D.; Heinert, M.; Jahn, C.-H.; Host, S. & Schenk, A. (2009): *Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken*; *Die Küste*, 76 (2009), 121-180.
- Weiss, R. (2013): *Erfassung und Beschreibung des Meeresspiegels und seiner Veränderung im Bereich der Deutschen Bucht*; Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Heft 40, Darmstadt, November 2013; ISBN 978-3-935631-29-7.
- Woodworth P.A. (2010): *Survey of recent changes in the main components of the ocean tides* *Cont. Shelf Res* 30:1680–1691.

## Anhang

### A.1 Lineare Trenduntersuchung

Tabelle 4: Lineare Trends des MThw mit 2- $\sigma$  Standardfehler in [mm/a] der untersuchten Tidepegel innerhalb der verschiedenen Zeiträume; in fett markiert: signifikante lineare Trends, NL: niederländische Pegel, DK: Dänischer Pegel.

Pegel		Lineare Trends des MHW für verschiedene Zeiträume $\pm 2\text{-}\sigma$ Standardfehler in [mm/a]				
		1940-2013	1958-2013	1977-2013	1995-2013	
NL	Eemshaven	-	-	-	-1,6 $\pm$ 3,9	
	Delfzijl	<b>4,0 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>4,0 <math>\pm</math> 1,4</b>	1,7 $\pm$ 2,0	-0,5 $\pm$ 4,5	
Niedersachsen	Borkum Südstrands	<b>2,3 <math>\pm</math> 0,6</b>	<b>1,8 <math>\pm</math> 0,9</b>	1,0 $\pm$ 1,6	-0,0 $\pm$ 5,0	
	Borkum Fischerbalje	-	-	<b>3,3 <math>\pm</math> 1,3</b>	1,6 $\pm$ 3,8	
	Emden Neue Seeschleuse	-	<b>3,6 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>1,9 <math>\pm</math> 1,6</b>	0,8 $\pm$ 5,0	
	Norderney Riffgat und Hafen	<b>2,2 <math>\pm</math> 0,6</b>	<b>2,8 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>1,9 <math>\pm</math> 1,8</b>	0,7 $\pm$ 4,8	
	Helgoland Binnenhafen	<b>2,5 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>3,1 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>3,0 <math>\pm</math> 2,0</b>	0,5 $\pm$ 5,6	
	Mellumplate	-	-	1,9 $\pm$ 1,9	2,2 $\pm$ 5,6	
	LT Alte Weser-Roter Sand	<b>2,5 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>2,6 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>2,7 <math>\pm</math> 1,6</b>	3,4 $\pm$ 3,6	
	Deutsche Bucht	Wilhelmshaven Alter Vorhafen	<b>3,9 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>4,0 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>3,0 <math>\pm</math> 1,7</b>	1,1 $\pm$ 4,7
		Bremerhaven	<b>3,7 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>3,7 <math>\pm</math> 1,2</b>	<b>3,4 <math>\pm</math> 2,0</b>	3,1 $\pm$ 5,2
		Cuxhaven Steubenhöft	<b>2,9 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>2,8 <math>\pm</math> 1,2</b>	1,2 $\pm$ 1,7	0,6 $\pm$ 4,2
Büsum		<b>2,9 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>3,1 <math>\pm</math> 1,3</b>	0,8 $\pm$ 2,0	0,4 $\pm$ 5,5	
Schleswig-Holstein	Husum	<b>3,9 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>4,5 <math>\pm</math> 1,3</b>	<b>3,1 <math>\pm</math> 2,2</b>	1,9 $\pm$ 6,6	
	Wittdün	<b>4,1 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>4,0 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>3,1 <math>\pm</math> 2,0</b>	0,5 $\pm$ 6,1	
	Wyk auf Föhr	-	<b>4,9 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>4,3 <math>\pm</math> 1,9</b>	1,8 $\pm$ 5,7	
	Schlüttsiel	-	-	<b>4,2 <math>\pm</math> 2,1</b>	2,2 $\pm$ 6,3	
	Dagebüll	<b>4,7 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>5,0 <math>\pm</math> 1,2</b>	<b>3,8 <math>\pm</math> 2,1</b>	2,8 $\pm$ 6,8	
	Hörnum	<b>4,0 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>4,4 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>3,7 <math>\pm</math> 1,8</b>	3,5 $\pm$ 6,0	
	List	<b>3,1 <math>\pm</math> 0,6</b>	<b>3,7 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>3,6 <math>\pm</math> 1,6</b>	3,4 $\pm$ 5,7	
DK	Esbjerg	<b>4,9 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>6,4 <math>\pm</math> 1,3</b>	<b>7,2 <math>\pm</math> 2,4</b>	3,9 $\pm$ 5,3	

Tabelle 5: Lineare Trends des MTnw mit 2- $\sigma$  Standardfehler in [mm/a] der untersuchten Tidepegel innerhalb der verschiedenen Zeiträume; in fett markiert: signifikante lineare Trends, NL: niederländische Pegel, DK: Dänischer Pegel.

		Lineare Trends des MLW für verschiedene Zeiträume $\pm 2\text{-}\sigma$ Standardfehler in [mm/a]				
		1940-2013	1958-2013	1977-2013	1995-2013	
NL	Eemshaven	-	-	-	0,1 $\pm$ 5,3	
	Delfzijl	<b>-2,0 <math>\pm</math> 0,8</b>	<b>-2,1 <math>\pm</math> 1,1</b>	0,4 $\pm$ 1,8	-1,4 $\pm$ 5,0	
Deutsche Bucht	Borkum Südstrands	<b>1,0 <math>\pm</math> 0,8</b>	0,9 $\pm$ 1,1	1,4 $\pm$ 2,2	3,3 $\pm$ 7,2	
	Borkum Fischerbalje	-	-	<b>2,4 <math>\pm</math> 2,0</b>	4,0 $\pm$ 5,7	
	Emden Neue Seeschleuse	-	<b>-2,4 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>-2,1 <math>\pm</math> 2,0</b>	-3,5 $\pm$ 5,4	
	Niedersachsen	Norderney Riffgat und Hafen	0,3 $\pm$ 0,8	0,4 $\pm$ 1,1	0,5 $\pm$ 2,2	-0,4 $\pm$ 8,5
		Helgoland Binnenhafen	<b>1,1 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>1,6 <math>\pm</math> 1,4</b>	<b>3,2 <math>\pm</math> 2,7</b>	3,8 $\pm$ 9,2
		Mellumplate	-	-	2,1 $\pm$ 2,9	5,6 $\pm$ 7,2
	LT Alte Weser-Roter Sand	<b>1,0 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>1,5 <math>\pm</math> 1,3</b>	<b>2,8 <math>\pm</math> 2,6</b>	<b>7,1 <math>\pm</math> 5,8</b>	
	Wilhelmshaven Alter Vorhafen	0,7 $\pm$ 0,8	<b>1,4 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>2,2 <math>\pm</math> 2,2</b>	<b>5,2 <math>\pm</math> 4,9</b>	
	Bremerhaven	<b>-2,2 <math>\pm</math> 0,9</b>	<b>-2,4 <math>\pm</math> 1,5</b>	-1,2 $\pm$ 3,1	2,5 $\pm$ 4,7	
	Cuxhaven Steubenhöft	0,8 $\pm$ 1,1	1,1 $\pm$ 1,5	<b>3,7 <math>\pm</math> 2,2</b>	3,5 $\pm$ 7,0	
Schleswig-Holstein	Büsum	<b>2,6 <math>\pm</math> 1,0</b>	<b>3,9 <math>\pm</math> 1,1</b>	<b>4,3 <math>\pm</math> 2,4</b>	<b>6,4 <math>\pm</math> 5,9</b>	
	Husum	-0,4 $\pm$ 1,2	1,0 $\pm$ 1,3	0,6 $\pm$ 2,6	4,8 $\pm$ 5,6	
	Wittdün	-0,4 $\pm$ 1,1	0,4 $\pm$ 1,5	0,9 $\pm$ 3,0	1,3 $\pm$ 9,3	
	Wyk auf Föhr	-	0,4 $\pm$ 1,4	1,7 $\pm$ 2,7	0,6 $\pm$ 8,8	
	Schlüttsiel	-	-	1,4 $\pm$ 2,3	0,9 $\pm$ 6,4	
	Dagebüll	<b>-2,5 <math>\pm</math> 1,5</b>	-0,7 $\pm$ 1,6	-0,3 $\pm$ 3,2	2,2 $\pm$ 9,2	
	Hörnum	0,1 $\pm$ 1,0	1,2 $\pm$ 1,3	1,8 $\pm$ 2,4	4,2 $\pm$ 7,0	
	List	0,5 $\pm$ 0,9	<b>1,6 <math>\pm</math> 1,3</b>	<b>2,5 <math>\pm</math> 2,2</b>	4,9 $\pm$ 7,1	
DK	Esbjerg	<b>1,7 <math>\pm</math> 1,4</b>	<b>3,1 <math>\pm</math> 1,7</b>	<b>4,9 <math>\pm</math> 3,0</b>	2,0 $\pm$ 7,5	

Tabelle 6: Lineare Trends des MThb mit  $2\text{-}\sigma$  Standardfehler in [mm/a] der untersuchten Tidepegel innerhalb der verschiedenen Zeiträume; in fett markiert: signifikante lineare Trends, NL: niederländische Pegel, DK: Dänischer Pegel.

		Lineare Trends des MTR für verschiedene Zeiträume $\pm 2\text{-}\sigma$ Standardfehler in [mm/a]				
		1940-2013	1958-2013	1977-2013	1995-2013	
NL	Eemshaven	-	-	-	$-1,8 \pm 3,0$	
	Delfzijl	<b><math>6,0 \pm 2,0</math></b>	<b><math>6,1 \pm 2,9</math></b>	$2,1 \pm 2,1$	$0,9 \pm 2,9$	
Deutsche Bucht	Borkum Südstrands	<b><math>1,3 \pm 0,9</math></b>	$1,0 \pm 1,3$	$-0,4 \pm 2,4$	$-3,1 \pm 4,3$	
	Borkum Fischerbalje	-	-	$0,9 \pm 2,3$	$2,4 \pm 3,2$	
	Emden Neue Seeschleuse	-	<b><math>6,0 \pm 1,3</math></b>	<b><math>4,0 \pm 1,9</math></b>	<b><math>4,2 \pm 3,1</math></b>	
	Niedersachsen	Norderney Riffgat und Hafen	<b><math>1,9 \pm 1,2</math></b>	<b><math>2,4 \pm 1,5</math></b>	$1,4 \pm 3,3$	$1,1 \pm 2,5$
		Helgoland Binnenhafen	<b><math>1,4 \pm 1,0</math></b>	$1,6 \pm 1,6$	$0,2 \pm 2,1$	$-3,3 \pm 4,4$
		Mellumplate	-	-	$-0,2 \pm 2,4$	$-3,5 \pm 3,5$
	LT Alte Weser-Roter Sand	<b><math>1,5 \pm 1,0</math></b>	$1,2 \pm 1,4$	$-0,2 \pm 2,8$	$-3,8 \pm 4,4$	
	Wilhelmshaven Alter Vorhafen	<b><math>3,2 \pm 1,1</math></b>	<b><math>2,6 \pm 1,4</math></b>	$0,7 \pm 2,5$	$-4,2 \pm 2,2$	
	Bremerhaven	<b><math>5,9 \pm 1,2</math></b>	<b><math>6,1 \pm 2,0</math></b>	<b><math>4,5 \pm 4,3</math></b>	$0,6 \pm 2,7$	
	Cuxhaven Steubenhöft	<b><math>2,1 \pm 1,8</math></b>	$1,7 \pm 2,6$	<b><math>-2,5 \pm 2,2</math></b>	$-2,9 \pm 3,2$	
Schleswig-Holstein	Büsum	$0,4 \pm 1,4$	$-0,8 \pm 1,6$	<b><math>-3,5 \pm 1,7</math></b>	<b><math>-6,0 \pm 2,4</math></b>	
	Husum	<b><math>4,3 \pm 1,1</math></b>	<b><math>3,5 \pm 1,6</math></b>	$2,4 \pm 3,8$	$-2,8 \pm 4,9$	
	Wittdün	<b><math>4,4 \pm 1,2</math></b>	<b><math>3,6 \pm 1,4</math></b>	$2,2 \pm 2,7$	$-0,8 \pm 4,2$	
	Wyk auf Föhr	-	<b><math>4,5 \pm 1,4</math></b>	<b><math>2,6 \pm 1,6</math></b>	$1,2 \pm 3,6$	
	Schlüttsiel	-	-	<b><math>2,8 \pm 1,8</math></b>	$1,4 \pm 2,7$	
	Dagebüll	<b><math>7,2 \pm 1,6</math></b>	<b><math>5,7 \pm 1,3</math></b>	<b><math>4,1 \pm 1,9</math></b>	$0,5 \pm 3,2$	
	Hörnum	<b><math>3,9 \pm 0,9</math></b>	<b><math>3,2 \pm 1,0</math></b>	<b><math>1,9 \pm 1,5</math></b>	$-0,7 \pm 1,8$	
	List	<b><math>2,6 \pm 0,7</math></b>	<b><math>2,2 \pm 0,9</math></b>	$1,0 \pm 1,4$	$-1,5 \pm 1,9$	
DK	Esbjerg	<b><math>3,2 \pm 0,8</math></b>	<b><math>3,3 \pm 0,8</math></b>	<b><math>2,2 \pm 1,1</math></b>	$1,7 \pm 2,5$	

## A.2 Nichtlineare Trenduntersuchung

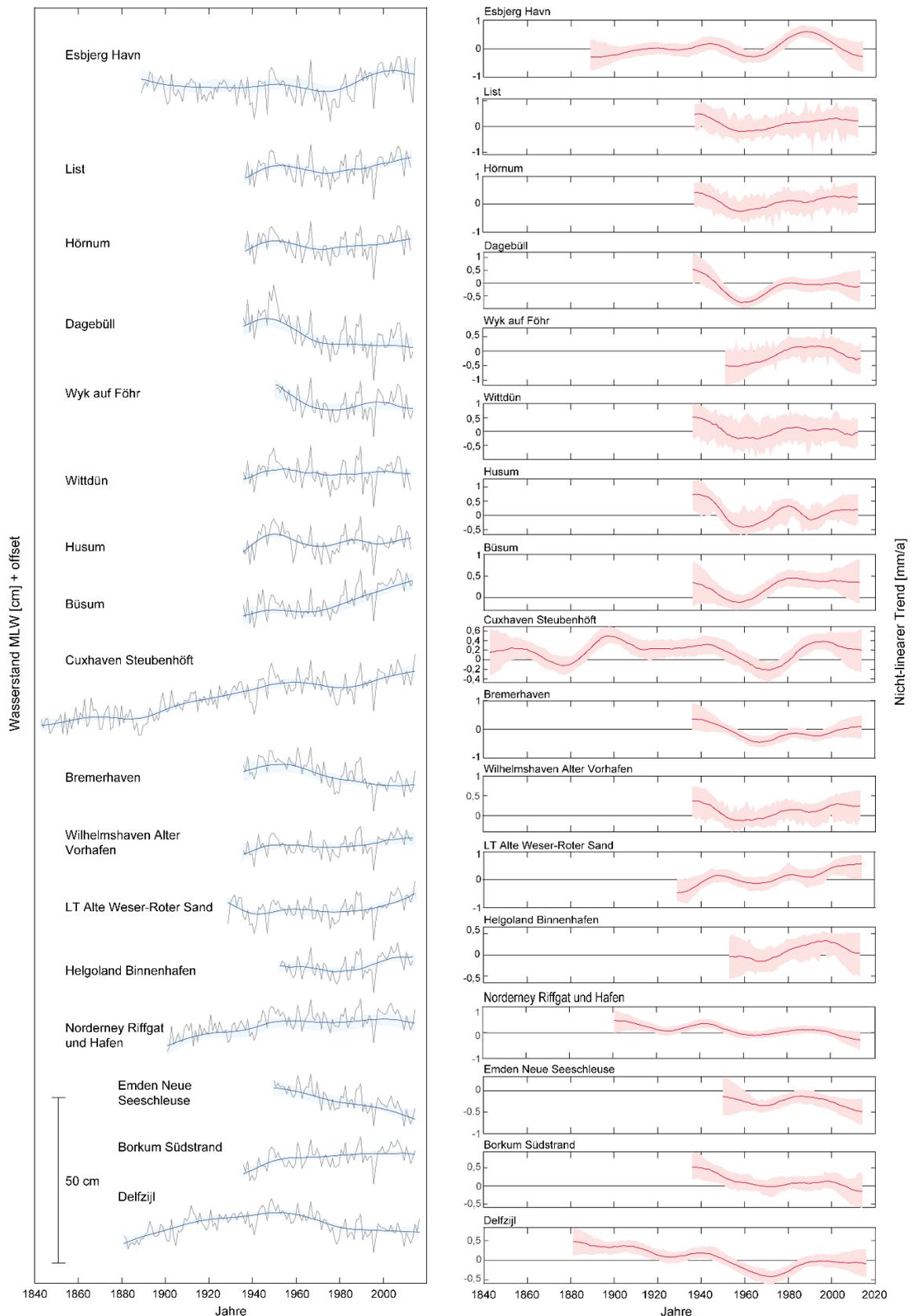


Abbildung 34: Nichtlineare Trend der MTnw-Zeitreihen an ausgewählten Pegelstandorten; links: Darstellung der Zeitreihen mit nichtlinearen Trends, rechts: Darstellung der Trendraten in [mm/a].

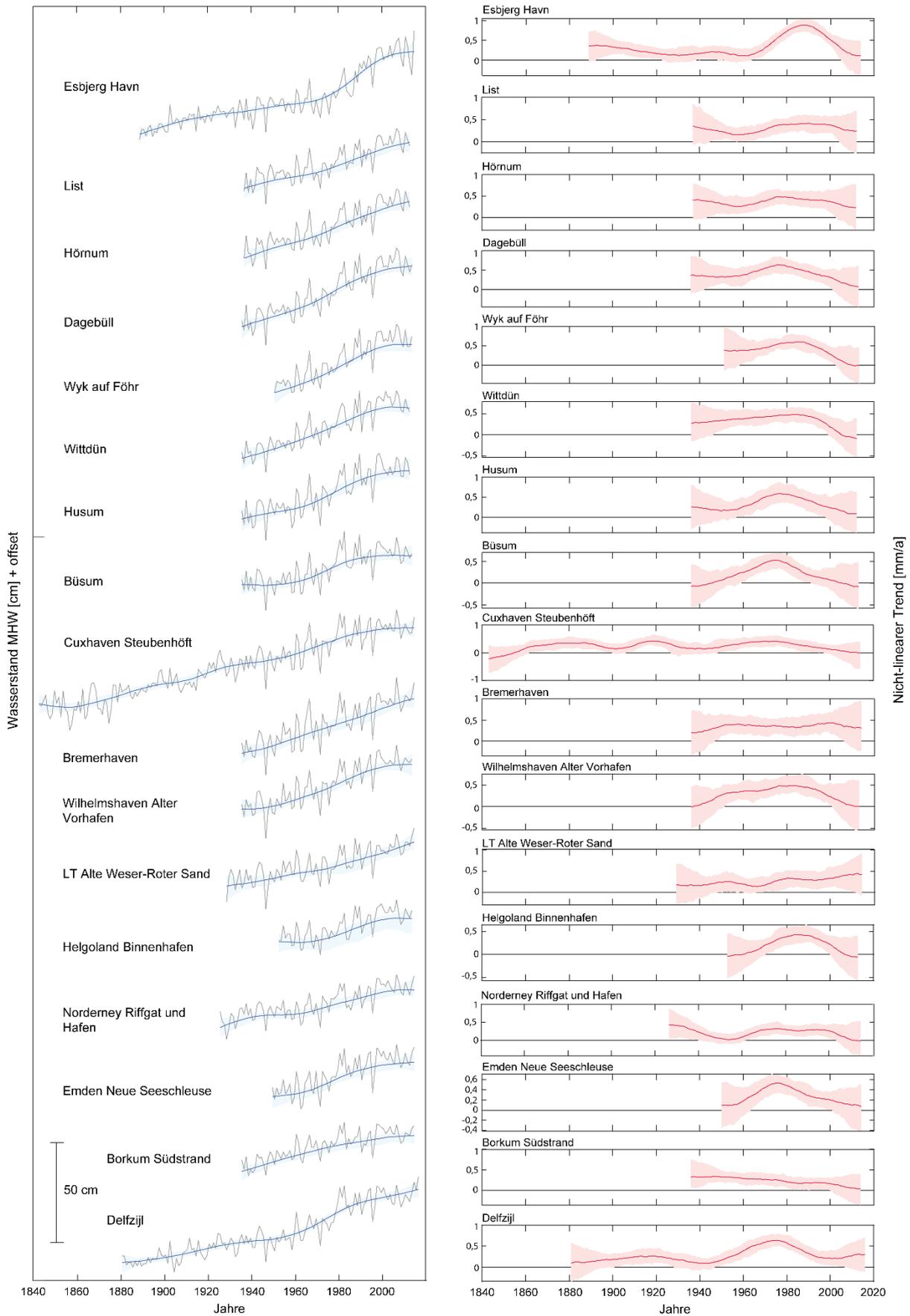


Abbildung 35: Nichtlineare Trends der MThw-Zeitreihen an ausgewählten Pegeln; links: Darstellung der Zeitreihen mit nichtlinearen Trends, rechts: Darstellung der Trendraten in [mm/a].

# **ALADYN-B: Modellgestützte Untersuchungen zur großräumigen Tidedynamik**

## Fachlicher Abschlussbericht

Gefördert durch:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Förderkennzeichen:	03F0756B
Projektlaufzeit:	10/2016 – 09/2019
Aufgestellt von:	Xing Yi Ralf Weisse

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Der Fachbericht wird zur Veröffentlichung in der Schriftenreihe *Die Küste* eingereicht.

Geesthacht, den 31.03.2020

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

*Xing Yi und Ralf Weisse*

## Zusammenfassung

Seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts wird an den Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste 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 Untersuchungen 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 is 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 solely could 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.*

## Keywords

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

## Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Daten und Methoden .....	3
3	Ergebnisse.....	6
3.1	Großräumiger Veränderungen von Tideparametern entlang der deutschen Nordseeküste.....	6
3.2	Einfluss großräumiger Veränderungen ozeanographischer Faktoren .....	8
3.3	Möglicher Einfluss großräumiger Schwankungen und Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation.....	11
3.4	Möglicher Einfluss großräumiger morphologischer Änderungen auf die Tidedynamik .....	12
4	Zusammenfassung.....	17
5	Schriftenverzeichnis.....	18

## 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 verbundenen 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 beobachteten 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, 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. Die vorliegende Arbeit befasst 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 (Kap. 2). Die Ergebnisse sind in Kap. 3 dargestellt. In Kap. 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 Kap. 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 Kap. 3.3 werden Einflüsse aufgrund langfristiger Schwankungen und Veränderungen im Windklima über der Nordsee analysiert. In Kap. 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 (Kap. 4).

## **2 Daten und Methoden**

Bei den durchgeführten Arbeiten wurden beobachtete Tideparameter an 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste (Abb. 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.

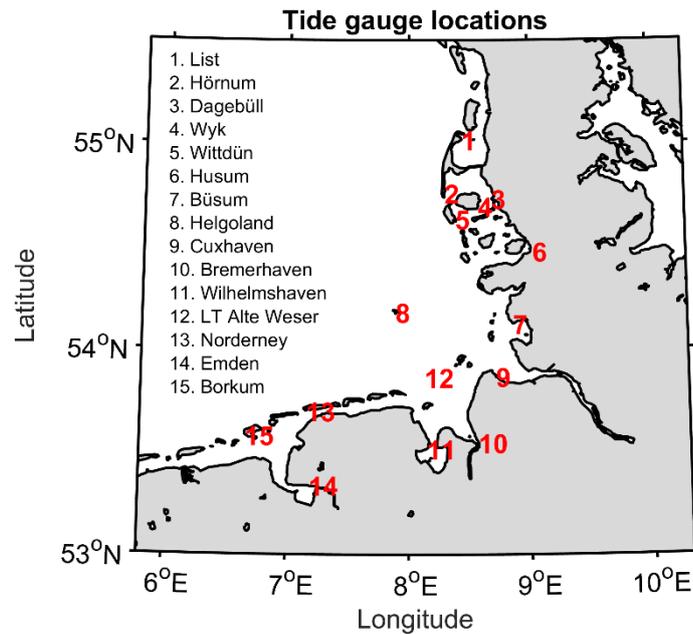


Abbildung 1: Positionen und Namen der verwendeten 15 Pegel entlang der deutschen Nordseeküste. Die roten Zahlen beziehen sich auf die im Folgenden verwendete Nummerierung.

Für die im Folgenden beschriebenen numerischen Experimente wurde das im 2D-Modus genutzte Modell TRIM-NP (Tidal Residual Intertidal Mudflat - Nested and Parallelized) (KAPITZA und EPEL 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 (Abb. 2). Für einige Experimente wie zum Beispiel der 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.

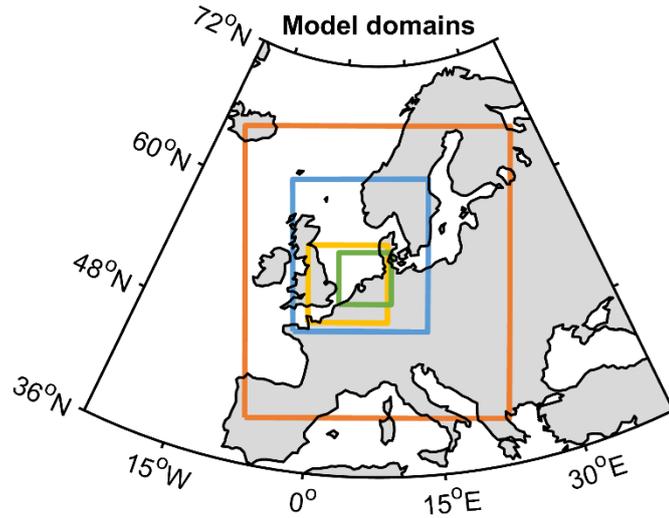


Abbildung 2: Modellgebiet der genesteten Version des hydrodynamischen Modells TRIM-NP mit den Gebieten der vier Gitterweiten von 12,8 km (orange), 6,4 km (blau), 3,2 km (gelb) und 1,6 km (grün).

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  $0,125^\circ \times 0,125^\circ$  Gitter vorgegeben. In Experimenten, in denen der atmosphärische Einfluss berücksichtigt wurde, wurde der bodennahe 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.

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. Diese 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)  $\mathbf{p}_k(\vec{r})$  und zugehörigen Zeitreihen (Amplituden)  $\alpha_k(t)$  zerlegt, so dass

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

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 Großräumiger Veränderungen von Tideparametern entlang der deutschen Nordseeküste

Die Veränderung des mittleren Tidenhubs im Zeitraum 1958-2014 an den betrachteten 15 Pegeln ist in Abb. 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 (Abb. 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 beobachteten 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. Dieses 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 (Abb. 4).

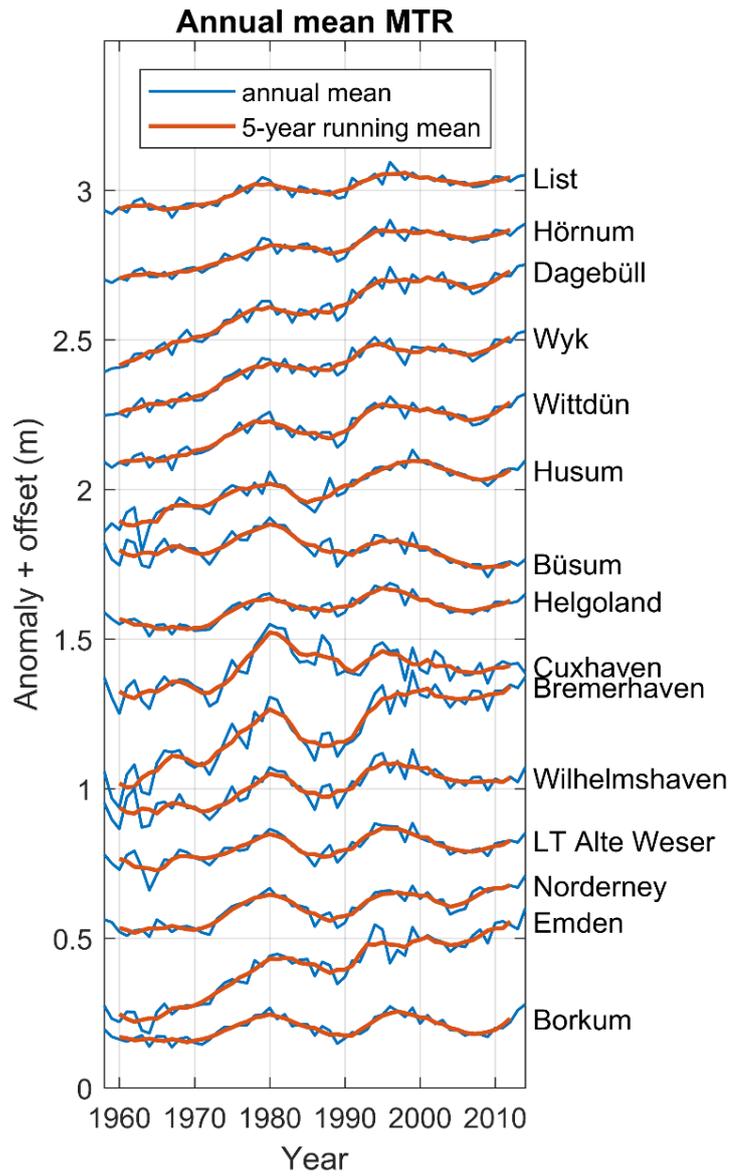


Abbildung 3: Veränderung des jährlichen mittleren Tidenhubs (blau) und des zugehörigen 5-jährig gleitenden Mittels an den 15 betrachteten Nordseepegeln.

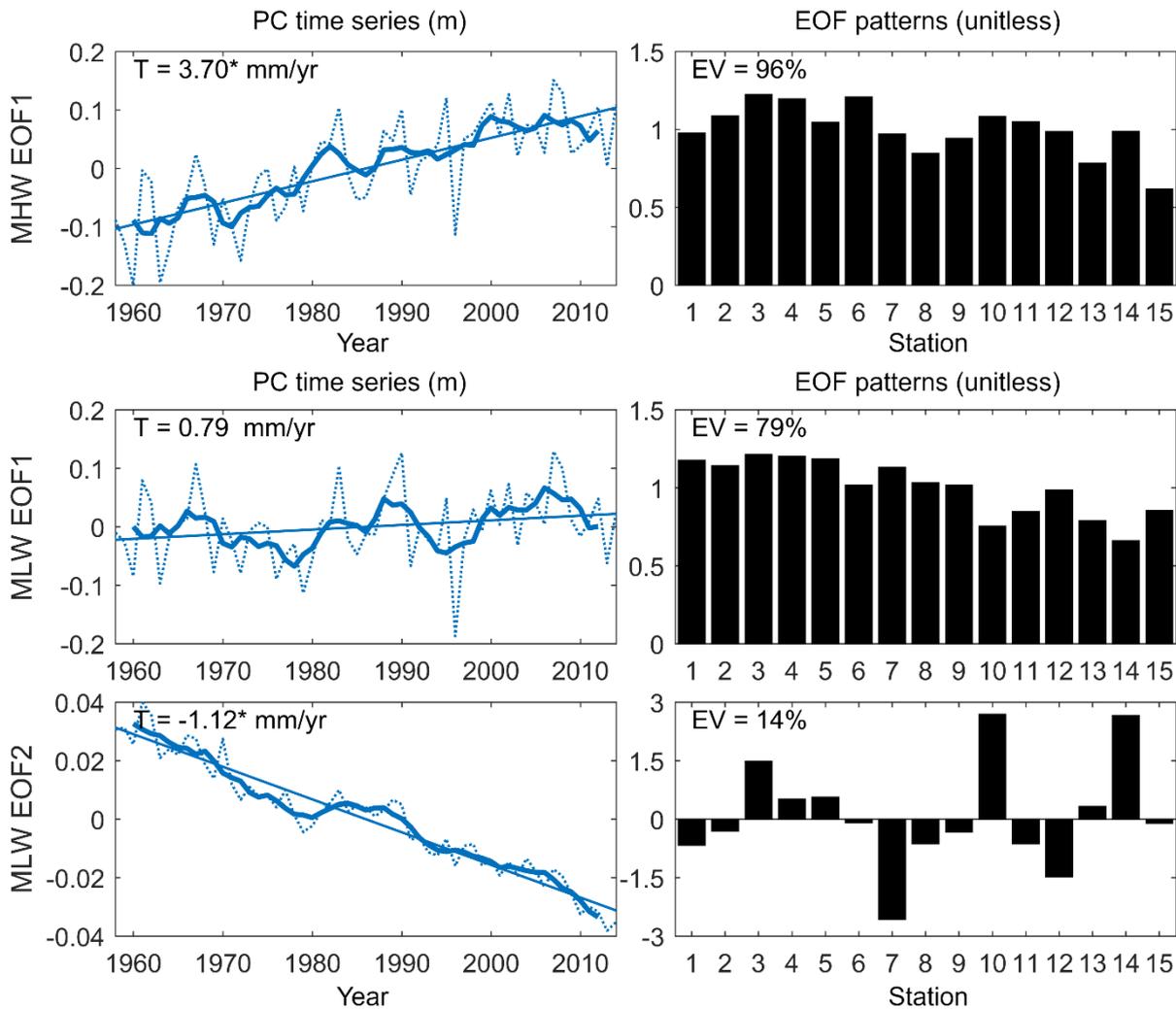


Abbildung 4: Erste EOF des MThw (oben) sowie erste (Mitte) und zweite (unten) EOF des MTnw. Muster (rechts; dimensionslos; Stationsnummern s. Abb. 1) und zugehörige Zeitreihen (links; in Metern; dick: 5-jährig gleitendes Mittel).

### 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 (Abb. 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.

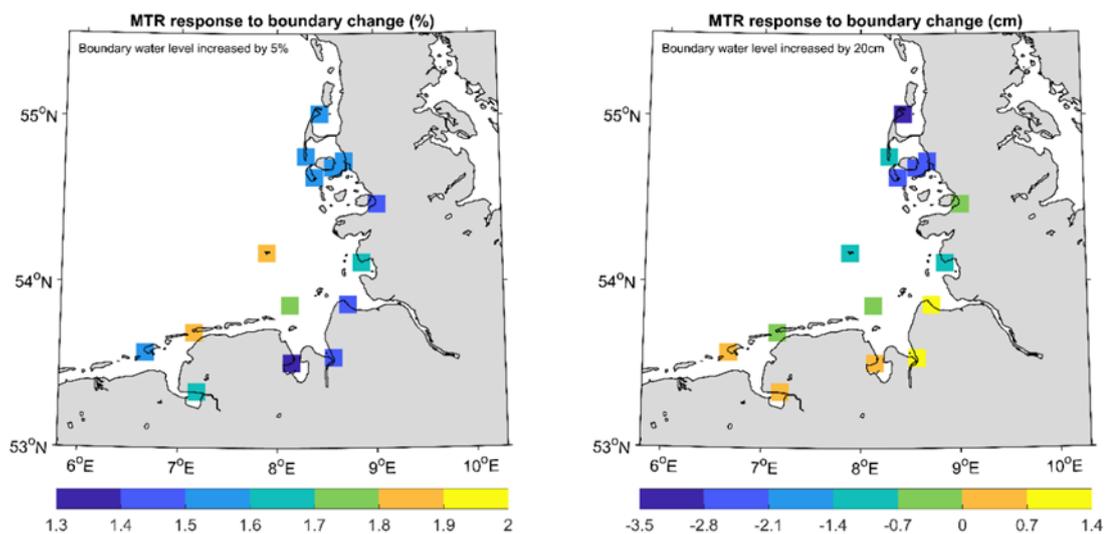


Abbildung 5: Veränderungen im von TRIM-NP modellierten mittleren Tidenhub (MTR) in der Nähe der 15 Pegel in der Deutschen Bucht in Prozent bei einer Erhöhung des Tidenhubs an den Modellrändern um 5% (links) und in cm bei einer Erhöhung des mittleren Meeresspiegels um 20 cm (rechts).

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). Auch bei diesem Modellexperiment wurden keine ausreichend großen Signale in der Deutschen Bucht erzeugt, die als wesentliche Erklärung für die beobachteten Veränderungen des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht dienen könnten (Abb. 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 (Abb. 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 Tidenhub 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 sind, 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.

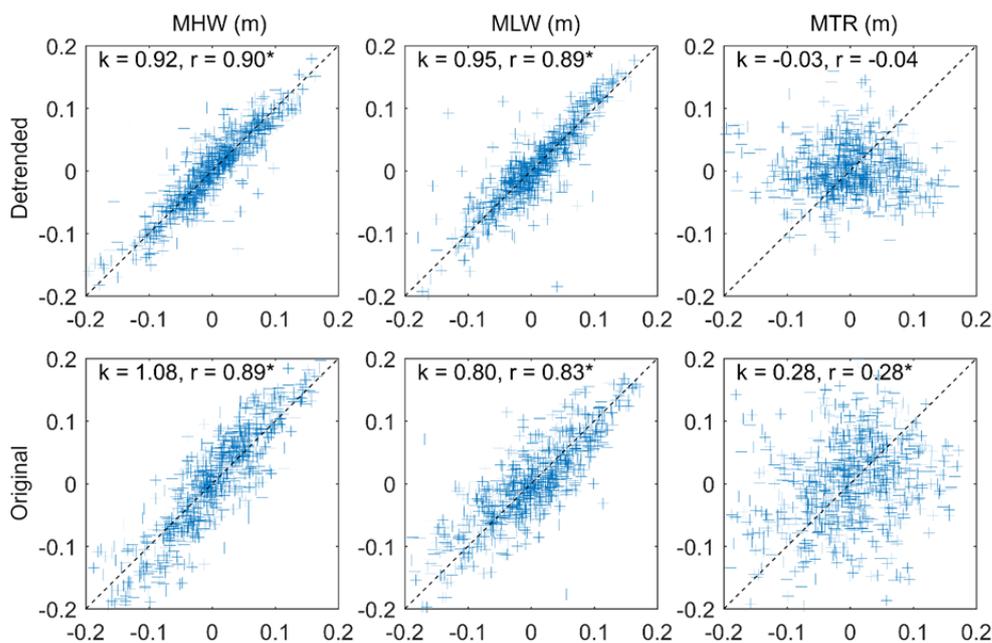


Abbildung 6: Streudiagramme von jährlichen Anomalien des mittleren Hochwassers (MHW, links), des mittleren Tideniedrigwassers (MLW, Mitte) und des mittleren Tidenhubs (MTR, rechts) 1958-2014 im Vergleich zu Anomalien des mittleren Meeresspiegels für die Original- (unten) und die trendbereinigte (oben) 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 Abb. 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 Partikliden 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.

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 (Abb. 4) auf die Modelldaten projiziert. Die entsprechenden Zeitreihen sind in Abb. 7 dargestellt. Es zeigte sich, dass die entsprechenden Zeitreihen aus dem Modellauf mit jeweils etwa 0.85 hohe Korrelationen mit denen 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.

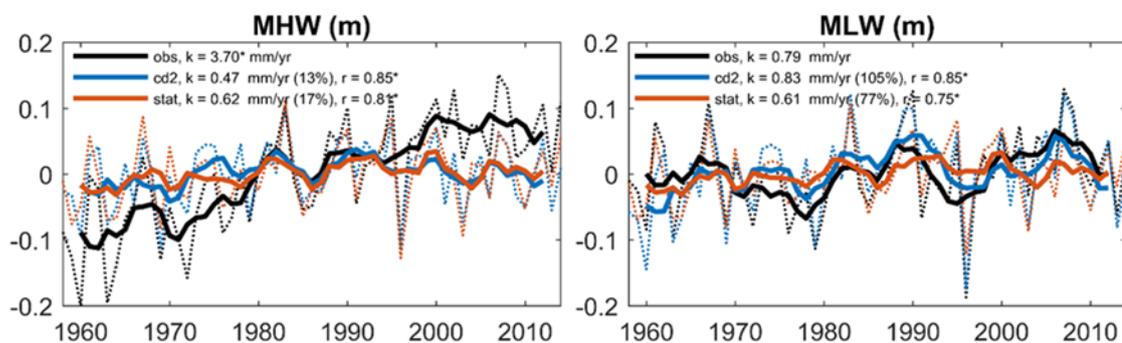


Abbildung 7: Schwarz: Zeitreihen (dünn) der jeweils 1. EOF der beobachteten jährlichen mittleren Tidehochwasser MHW (links) und Tideniedrigwasser MLW (rechts) basierend auf Daten der 15 betrachteten Pegel in der Deutschen Bucht und zugehöriges 5-jährig gleitendes Mittel (dick). Entsprechende Zeitreihen aus der Analyse des Modellaufs (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 Luftdrucks über dem Nordatlantik.

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 (Abb. 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; Abb. 3). Angesichts solcher Zeiträume ist es möglich, dass die Tidedynamik einzelner oder mehrerer Pegel durch größere Baumaßnahmen (z.B. infolge von Eindeichungen) und den daraus resultierenden morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld beeinflusst worden ist. Auch hier werden im Folgenden lediglich mögliche großräumige Effekte untersucht, wogegen 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 Abb. 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.

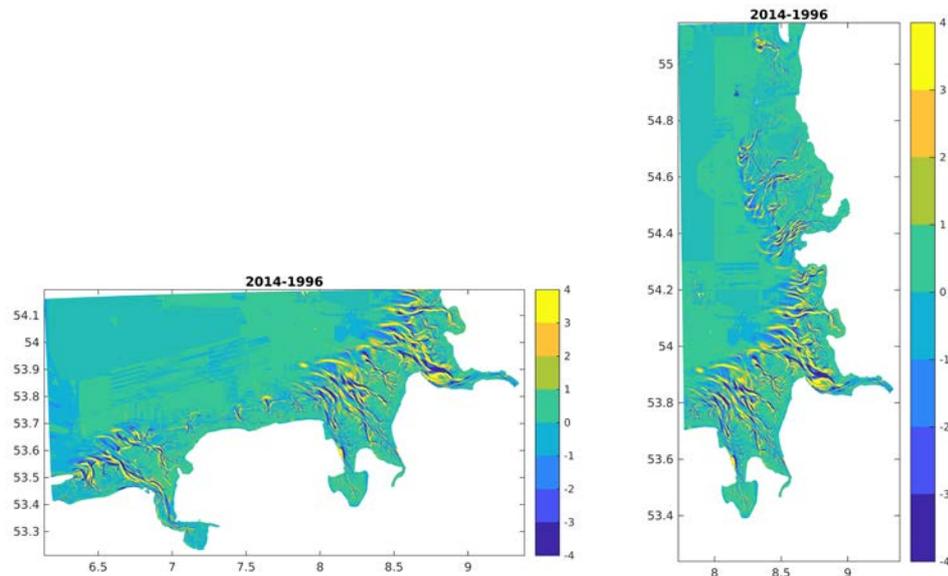


Abbildung 8: Differenzen in Metern zwischen den EasyGSH-DB Bathymetrien 2014 und 1996 entlang der niedersächsischen (links) und entlang der schleswig-holsteinischen Küste (rechts).

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, wurden deshalb sowohl eine Reihe von Sensitivitätsexperimenten mit TRIM-NP und vorhandenen Bathymetrien, als auch eine statistische Analyse durchgeführt, die mögliche großskalige Zusammenhänge aufzeigen könnte.

Um mögliche großskalige Zusammenhänge zwischen morphologischen Veränderungen und Änderungen in den Tideparametern zu untersuchen und herauszufiltern, wurden zunächst wiederum EOF Analysen des beobachteten mittleren Tidenhub 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 Abb. 9 dargestellt. Es zeigte sich, dass großräumige Veränderungen im Tidenhub eher mit vielen zeitgleich ablaufenden kleinräumigeren Variationen, als mit größerskaligen morphologischen Änderungen korreliert sind. Zeitlich besteht zwischen diesen Änderungen mit etwa 0.82 eine sehr hohe Korrelation (Abb. 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.

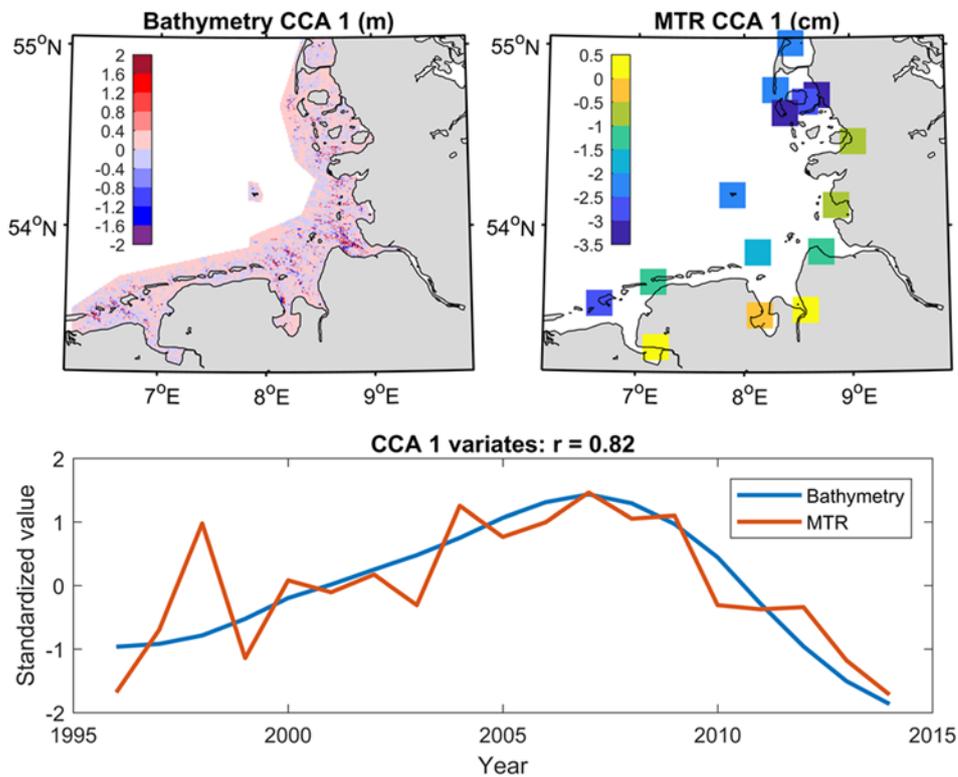


Abbildung 9: Erstes Paar kanonisch korrelierter Muster der jährlichen Bathymetrien des EasyGSH-DB Datensatzes (links) und des jährlichen mittleren Tidenhubes an den 15 Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste (rechts) 1996-2014 und zugehörige Zeitreihen (unten).

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, 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. Abb. 10 zeigt die durch die TRIM-NP simulierte 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 cm 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 Änderungen für 1996-2007 im Mittel etwas zu gering ausfallen.

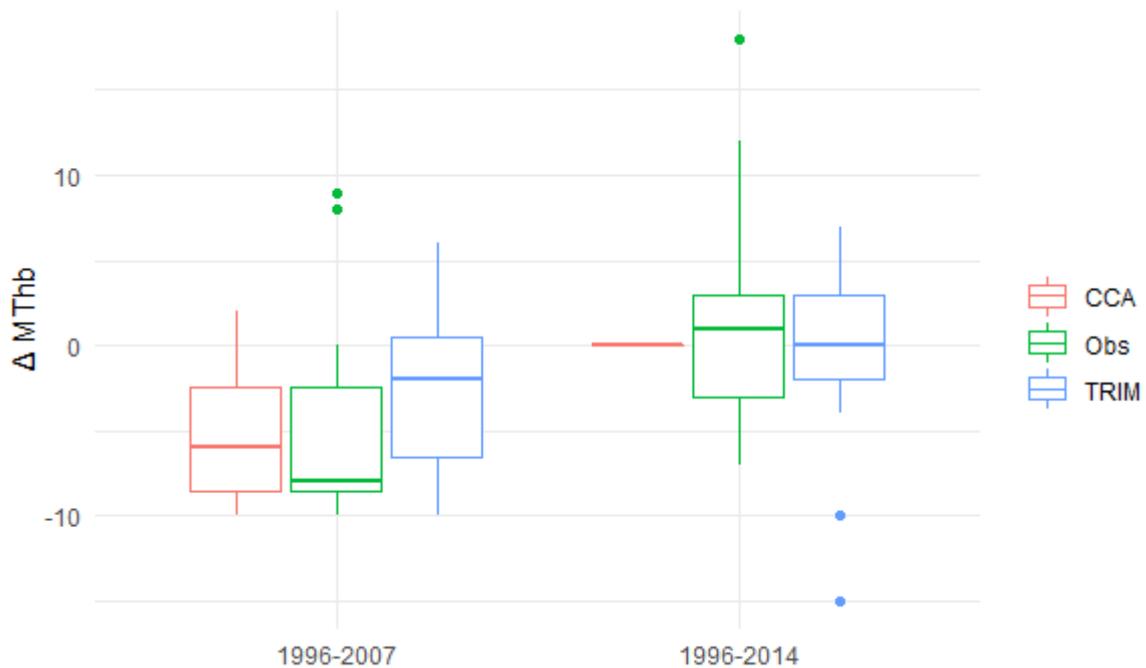


Abbildung 10: Verteilungen von Veränderungen im MThb in cm anhand von beobachteten jährlichen (grün) und modellierten (rot-CCA; blau-TRIM) MThb an den betrachteten 15 Pegeln für die Zeiträume 1996-2007 und 1996-2014. Die Werte aus dem statistischen Modell für 1996-2014 sind alle kleiner als einen halben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

Abb. 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 2 Ausreißer sehr gut wieder. Die Ausreißer (Bremerhaven und Emden) liegen dabei beide in den Mündungsbereichen der Ästuarie. Da das statistische 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 Reflektion der Tidewelle realistisch abzubilden (RASQUIN et al. 2019).

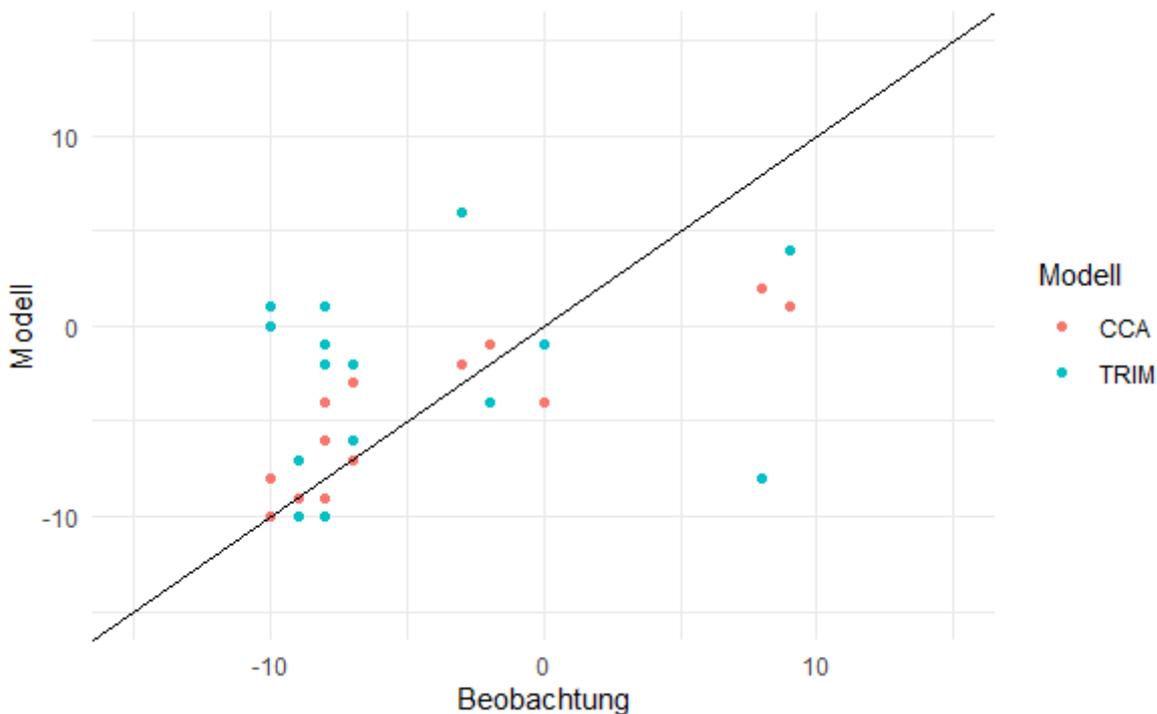


Abbildung 11: Gegenüberstellung der für 1996-2007 modellierten (CCA-rot; TRIM-blau) Veränderungen im MThb in cm mit den Beobachtungen an den 15 betrachteten Pegeln entlang der deutschen Nordseeküste.

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.

Abb. 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 cm 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.

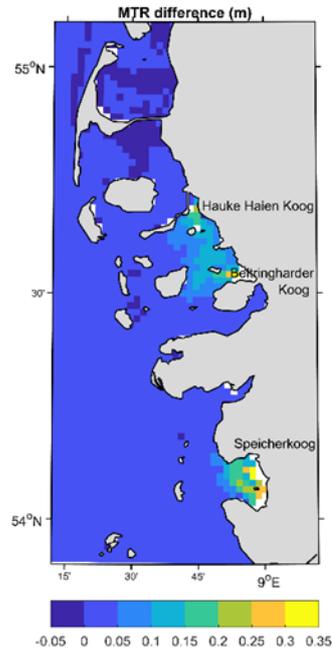


Abbildung 12: Unterschiede im mittleren Tidenhub aufgrund von vier größeren Baumaßnahmen entlang der schleswig-holsteinischen Küste (Eindeichung/Baumaßnahme Beltringharder Koog, Hauke Haien Koog, Speicherkoog Nord und Speicherkoog Süd).

#### 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 großräumig in der Vergangenheit 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 Schriftenverzeichnis

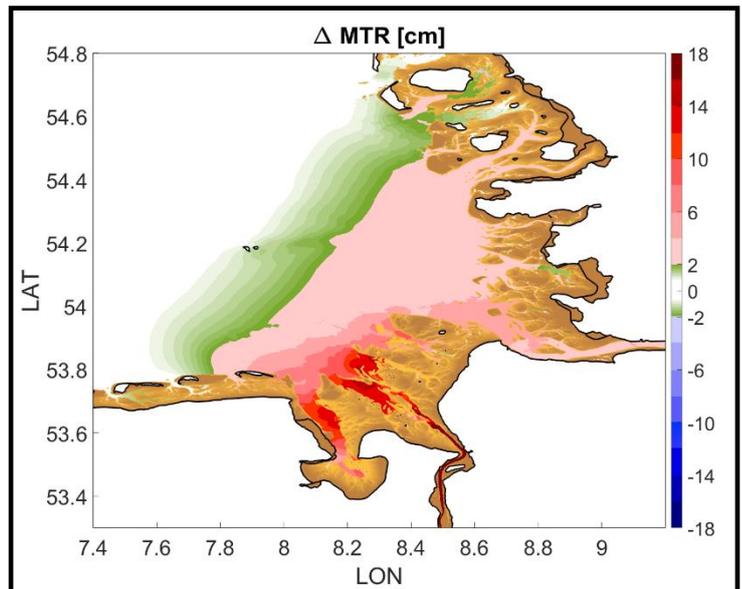
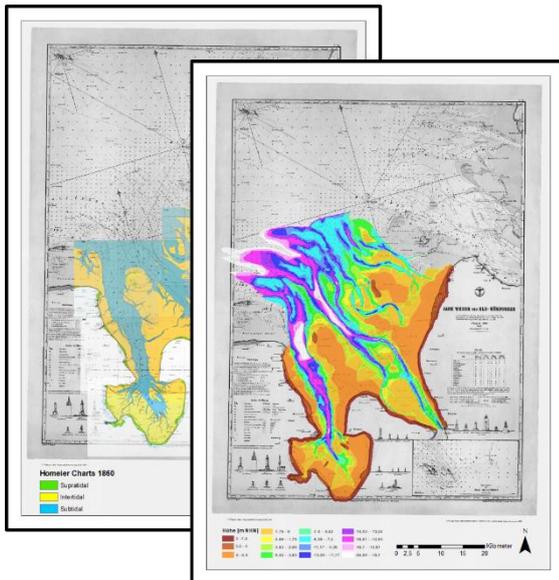
- ALADYN. Analyse der beobachteten Tidedynamik in der Nordsee <http://www.kfki.de/de/projekte/aladyn>, Stand: 20.04.2020.
- ALBRECHT, F.; WAHL, T.; JENSEN, J. R. und WEISSE, R.: Determining sea level change in the German Bight. In: *Ocean Dynamics*, Jg. 61, 12, 2037-2050. doi: 10.1007/s10236-011-0462-z, 2011.
- BODC. UK Tide Gauge Network [https://www.bodc.ac.uk/data/hosted\\_data\\_systems/sea\\_level/uk\\_tide\\_gauge\\_network/](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*, Jg. 30, 4, 433-449. doi: 10.1111/j.1365-246X.1972.tb05826.x, 1972.
- CASULLI, V. und CATTANI, E.: Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. In: *Computers & Mathematics with Applications*, Jg. 27, 4, 99-112. doi: 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. und JENSEN, J.: Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste. In: *Die Küste*, in Begutachtung. 2020.
- GEYER, B.: High-resolution atmospheric reconstruction for Europe 1948–2012. *Coast-Dat2* In: *Earth System Science Data*, Jg. 6, 1, 147-164. doi: 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. und 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*, Jg. 58, 1, doi: 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. und BERKENBRINK, C.: Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics. In: *Die Küste*, in Begutachtung. 2020.
- HURRELL, J. W.; KUSHNIR, Y. und VISBECK, M.: The North Atlantic Oscillation. In: *Science*, Jg. 291, 5504, 603-605. doi: 10.1126/science.1058761, 2001.
- JENSEN, J.; MUDERBACH, C.; MÜLLER-NAVARRA, S.; BORK, I.; KOZIAR, C. und RENNER, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: *Die Küste*, Jg. 71, 123-167. 2006.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: GLASER, R., SCHENK, W., VOGT, J., WIEBNER, R., ZEPP, H. und WARDENGA, U. (Hrsg.): *Küstenszenarien*. Leipzig, 99-112. 2007.
- JENSEN, J.; MÜGGE, H. E. und SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste*, Jg. 53, 211-275. 1992.

- KAPITZA, H. und EPEL, D.: Simulating morphodynamical processes on a parallel system. In: SPAULDING, M. L. (Hrsg.): Estuarine and coastal modeling. Proceedings of the conference ; Newport, Rhode Island, November 15 - 17, 1989. New York, NY, 1990.
- KOHLUS, J. und KÜPPER, H.: Umweltatlas Wattenmeer. 1. Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer Ulmer, Stuttgart, 270 S., 1998.
- LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T. und FRANCIS, O.: Modelling the global ocean tides. Modern insights from FES2004 In: Ocean Dynamics, Jg. 56, 5-6, 394-415. doi: 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. und EDEN, C.: An evaluation of the North Sea circulation in global and regional models relevant for ecosystem simulations. In: Ocean Modelling, Jg. 116, 70-95. doi: 10.1016/j.ocemod.2017.06.005, 2017.
- RASQUIN, C.; SEIFFERT, R.; WACHLER, B. und WINKEL, N.: The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. doi: 10.5194/os-2019-84, 2019.
- SMITH, S. D. und BANKE, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Jg. 101, 429, 665-673. doi: 10.1002/qj.49710142920, 1975.
- STORCH, H. von und 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. und WÖPPELMANN, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. In: Earth-Science Reviews, Jg. 124, 51-67. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.05.003, 2013.
- WEISSE, R.; GASLIKOVA, L.; GEYER, B.; GROLL, N. und MEYER, E. M. I.: coastDat - model data for science and industry. In: Die Küste, Jg. 81, 5-18. 2014.
- WOODWORTH, P. L.; SHAW, S. M. und BLACKMAN, D. L.: Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. In: Geophysical Journal International, Jg. 104, 3, 593-609. doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb05704.x, 1991.

# Technical report



Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN)  
-Coastal Research Station-



Krischan Hubert, Andreas Wurpts & Cordula Berkenbrink

## **ALADYN: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight**

## **Interaction between estuaries and the open sea**



**Niedersachsen**

# Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN) -Coastal Research Station-

Krischan Hubert, Andreas Wurpts & Cordula Berkenbrink

## **ALADYN: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight**

### **Interaction between estuaries and the open sea**

**ALADYN is a project funded by the  
German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)  
under the reference 03F0756A-C  
"Interaction between estuaries and the open sea"  
is part of ALADYN-C (03F0756C)**



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Norderney, March 2020

Front page:

left: Homeier charts (HOMEIER et al. 2010) of the outer Weser and Jade estuary region for the state of 1860 (back panel) and digitised elevation data for the state of 1870 (front panel) in front of a historical navigational chart (LANG 1973)

right: Model differences of mean tidal range values for the present minus the historic setup of Weser and Jade estuaries

NLWKN – Coastal Research Station  
An der Mühle 5, 26548 Norderney  
Tel.: 04932-916-0  
Fax: 04932-916-222  
E-mail: [postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de](mailto:postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de)

# **ALADYN: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight**

## **Interaction between estuaries and the open sea**

Krischan Hubert, Andreas Wurpts & Cordula Berkenbrink

### **Abstract**

Long term tidal dynamic changes comprise a share of multiple possible influencing processes. In the shallow Wadden Sea in the south eastern German Bight, morphological changes – both natural and those manmade – are key contributors, as coastal relief and tidal wave are shaping and interacting with each other. Several publications have analysed, how bathymetrical changes in the estuarine zone due to river construction measures influence the tidal regime inside the investigated entity (i.e. ELSEBACH et al. 2007, HERRLING & NIEMEYER 2008, HERRLING et al. 2014). This study aims at identifying, how far those tidal dynamic changes will have an impact on adjacent coastal waters and give an estimate how they are reflected in the data of surrounding tide gauges. The investigation is based on comparisons of tidal characteristics for different morphological conditions of selected regions along the German coastline by means of numerical modelling. A cross-scale model domain was set up to simulate the hydrodynamics of the entire Greater North Sea with a special focus on the highly resolved German tidal waters. Digitized historical conditions for the Ems and Weser estuary prior to major human activities along the rivers were used to reproduce the tidal regime of the corresponding time period within the large-scale environment of the overall domain. Morphological changes that account for single measures, such as the land subsidence due to gas extraction, were analysed isolated from other changes. The differences of the simulation results are compared to values from control runs with the present bathymetrical state. This illustrate the region of influence, in which tides are effected from locally limited bathymetrical changes.

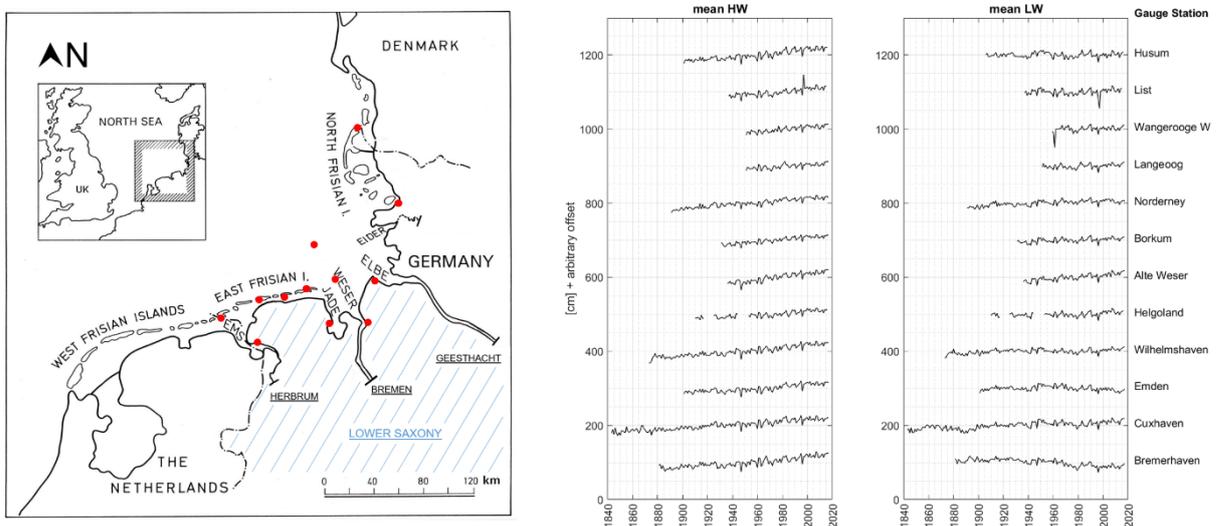
## Table of contents

<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Methodology</b> .....	<b>5</b>
2.1 Model Setup .....	6
2.1.1 Grid .....	7
2.1.2 Bathymetry .....	11
2.2 Model Calibration .....	13
<b>3 Results</b> .....	<b>21</b>
<b>4 Summary</b> .....	<b>27</b>
<b>5 Acknowledgements</b> .....	<b>27</b>
<b>6 Software and Data providers</b> .....	<b>28</b>
<b>7 References</b> .....	<b>28</b>

# 1 Introduction

The motivation for the joint research project ALADYN was to gain a better understanding of the composition of observed tidal range changes within the German Bight. Therefore, the three separate parts of the project would each aim on identifying and analysing different potential factors that may have contributed to the observed trends. One task within ALADYN was to analyse tidal regime changes induced by local bathymetrical changes. The goal of this project part was to analyse how far local hydrodynamic changes would spread into adjacent coastal regions. The focus is on the region around the estuaries Ems and Weser, both entering the North Sea at the Lower Saxonian coastline.

The hydrodynamics of the German Bight, its coastal morphology and a vast number of natural processes as well as human activities are greatly dominated by the influence of the tides. Along the coastline, there are numerous tide gauges, some of which are already in operation since up to over 150 years. Figure 1 shows yearly mean tidal high (MHW) and tidal low water (MLW) levels for selected gauge stations throughout the German Bight since begin of their operation.



**Figure 1:** Left panel: Overview. Middle and right panel: Yearly mean tidal high and low waters [cm] with arbitrary offset at different gauge stations throughout the German Bight. The positions are indicated in the left panel. Data provided by German Federal Waterways and Shipping Administration (WSV).

Trend analysis of long term tide records indicate a general increase of both MHW and MLW with rates of several centimeters up to a few decimeters within one century. Whereas the trends of the high waters are rather similar throughout the different gauge stations, trends in low waters are slightly diverse, as the low waters react stronger on local morphological variations. For example, the low waters near the estuaries – i.e. Bremerhaven and Emden - seem to decrease due to the constant deepening of the neighbouring navigational channels. But there is one trend that is valid for all gauge stations: The MLW is always either falling or rising less strong than the corresponding MHW. Thus, the rates of tidal range increase are all positive (Table 1).

The observed trends are composed from a variety of different processes that all contribute with different magnitudes and signs and that may interact linearly and non-linearly with each other. In addition to global factors like sea level rise, vertical land movement, variations in wind climate or astronomical constellations, changes of the tidal regime can also mirror local effects. Morphology is a key factor on such local scales, especially in shallow coastal zones. Here the tidal regime is dominated by the bathymetry and correspondingly susceptible to morphological changes. The Wadden Sea represents an inherently morphodynamical system, which is subject to continuous

rearrangement. Contributors are naturally imposed shifts and transformations of the tidal channels, flats, basins and barrier islands as well as anthropogenically induced changes due to navigational purposes or demands of coastal protection.

In both Weser and Ems estuary, the major human interventions and consecutive morphological reactions started more than 130 years ago. After smaller previous measures the so-called Franzius-Corrections started in 1887 and were the beginning of a substantial rearrangement of the Outer and Lower Weser riverbeds, in order to obtain the access of the port of Bremen to the open sea. The corrections comprised a transition from a fairly shallow, curvy and branched riverbed to a deeper, comparatively narrow and single-branched channel (ELSEBACH et al. 2007, FRANZIUS 1888, NIEMEYER, 2000). Several consecutive adaptations of the river for increasing navigational demands followed up to present times (BUND, PORTAL TIDEWESER).

Considering the tidal range, the modifications engendered a drastic amplification of the tidal wave amplitude along the estuaries. Figure 2 displays the change of tidal range over time for lower Weser and Ems rivers. Before the Franzius-corrections, the tidal wave was almost completely damped on it's way through the Weser estuary while today it is fully reflected and also steepened with strongly amplified range. At the head of the estuary, the present tidal range exceeds the one at the mouth, whereas it used to be close to zero before the corrections.

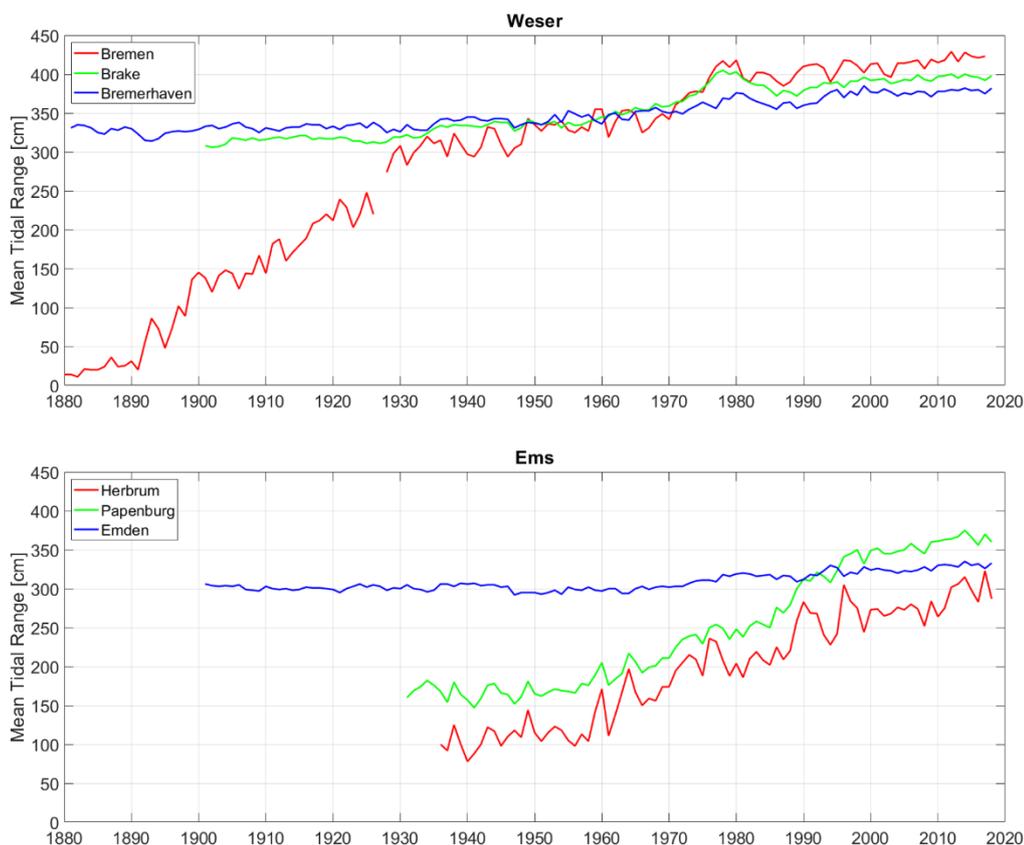
The evolution of the Ems estuary's morphology follows a similar pattern (HERRLING & NIEMEYER 2007b). Here, modifications also started in the second half of the 19<sup>th</sup> century, but continuous tide gauge records do not date back as long as for the Weser.

**Table 1:** Linear trends [mm/a] of yearly mean tidal high water, low water and tidal range values for the time of recording at different gauge stations throughout the German Bight. The positions are indicated in Figure 1. Calculated with data provided by WSV.

Tide-gauge	Period	Linear trends [mm/a]		
		MHW	MLW	MTR
Husum	1901 – 2016	3.28	0.11	3.17
List	1937 – 2015	3.36	0.47	2.89
Wangerooge West	1951 – 2017	3.34	1.60	1.74
Langeoog	1951 – 2017	2.38	1.10	1.28
Norderney Hafen/Riffgat	1891 – 2017	2.80	1.33	1.47
Borkum Südstrand /Fischerbalje	1931 – 2017	3.09	1.18	1.91
Leuchtturm Roter Sand/Alte Weser	1936 – 2017	4.49	2.84	1.65
Helgoland Binnenhafen	1910 – 2016	2.16	0.72	1.44
Wilhelmshaven Alter Vorhafen	1873 – 2017	2.93	0.65	2.28
Emden Neue Seeschleuse	1901 – 2017	2.33	-0.29	2.62
Cuxhaven Steubenhöft	1843 – 2017	2.25	1.31	0.94
Bremerhaven Doppelschleuse/Alter Leuchtturm	1881 – 2017	2.74	-1.68	4.42

The anthropogenic interventions caused significant changes of the tidal regime within the estuaries (ELSEBACH et al. 2007, HERRLING & NIEMEYER 2008, HERRLING et al. 2014).

This project is dealing with the question, whether and how strong these changes also affect the adjacent coastal waters and tidal gauges located there. We examine possible interactions of the estuaries with the coastal zone and analyse, how far the hydrodynamic changes spread outside of the region of the corresponding morphological changes. This objective is addressed using numerical simulations of the large-scale tidal dynamics with comparisons between present and historical morphological conditions. The method allows to analyse single measurements or regions isolated from surrounding morphological changes. This way, shares of tidal characteristic changes can be assigned to certain events including the nonlinear behaviour of the hydrodynamics.



**Figure 2:** Yearly mean tidal range values [cm] along the Weser (upper panel) and Ems (lower panel) estuaries from 1880 - 2018. Red lines indicate a position near the head of the estuary, blue lines near the mouth and green lines approximately half way in between. Data provided by WSV. (ELSEBACH et al. 2007 & NIEMEYER 2000 edit).

## 2 Methodology

For the purpose of this study a numerical model domain was set up, that not only covers the investigation area but is well extended above the Greater North Sea into parts of the North East Atlantic. This approach offers several advantages over models with smaller extend or nested cascades of models:

- It bypasses model cascades, as the tidal oscillations at the seaward open boundaries can be forced directly through tidal constituent phases and amplitudes in the open ocean. Due to the great distance between open boundary and investigation area, the velocity boundary condition can be omitted.

- The propagation of the tidal wave is physically consistent throughout the entire model domain. There is a bi-directional interaction between the coastal zone and the open sea, which would be missing in a one-way nested application. Influences from model boundary forcing are avoided.
- The investigation area is not limited pre-hand to an inner domain or specific region. This is an important factor, as the spatial distribution is part of the analysis and is considered as unknown initially.

The procedure of the evaluation of morphologically induced tidal regime changes happen as follows: We perform two simulations on the same numerical grid, which is beforehand optimized for two morphological states. The first one is the control run with the present state bathymetry and which is the same for all analysis. In the second simulation, the bathymetry in the area of interest is replaced with a historical data set. All remaining parts of the model and all boundary conditions remain exactly the same. After calculating the differences of certain tidal characteristics between the two simulations, it is possible to derive spatial information on how far these differences exceed the manipulated area.

Analysis are carried out over a period of at least two spring-neap cycles. For the comparisons, synthesized mean tidal curves for elevation and u- and v-velocities are derived from all single tidal cycles for each computational node in the domain. This procedure ensures, that the calculated differences comprise an average over the diurnal, fortnightly and monthly inequalities of the tide. It is not only an average of single parameters like peak and crest heights or maximum flood and ebb velocities. The synthesized tidal curve displays an averaged tidal curve over 12.4 hours with a temporal discretization of six minutes (Section 3).

## 2.1 Model Setup

The simulations are carried out with the semi-implicit, finite element model suite SCHISM (ZHANG et al. 2016, version 5.6.1) which is tailored to seamless cross-scale applications. The domain is – in the horizontal plane – discretized with an unstructured grid of triangular and quadrangular elements (Figure 3).

The western seaward open boundary spans from the north-western tip of Spain across the Atlantic at  $\sim 16^\circ$  west up to Iceland. The northern seaward open boundary spans from Iceland across the Norwegian Sea down to western Norway. The most easterly part of the model is the Kattegat. The model boundary towards the Baltic Sea follows the coast of the Danish major islands Funen and Zealand, connecting the Danish and Swedish mainland. The connecting belts to the Baltic Sea are not considered as open boundaries, as we consider the influence it has on the investigation area in the German Bight as insignificant, especially as it would have to encounter the net-direction of both the Norwegian and so-called “Silberrinnen” tidal wave (SEE- UND OZEANHANDBÜCHER 1958). In the German Bight, the different entities of the Wadden Sea – tidal inlets, tidal basins and barrier islands – are resolved. The model includes the estuaries of the Ems, Weser and Elbe rivers up to their tidal barriers in Herbrum, Bremen and Geesthacht respectively. Also parts of the tidal Eider River are included in the Model domain. Ems, Weser and Elbe River are supplied with discharge open boundaries. The discharge boundaries are located upstream of the tidal barriers which are represented by weir structures in the model (ATELJEVICH et al. 2014). Tributaries of Ems and Weser River as well as the Eider River are treated as sources.

### 2.1.1 Grid

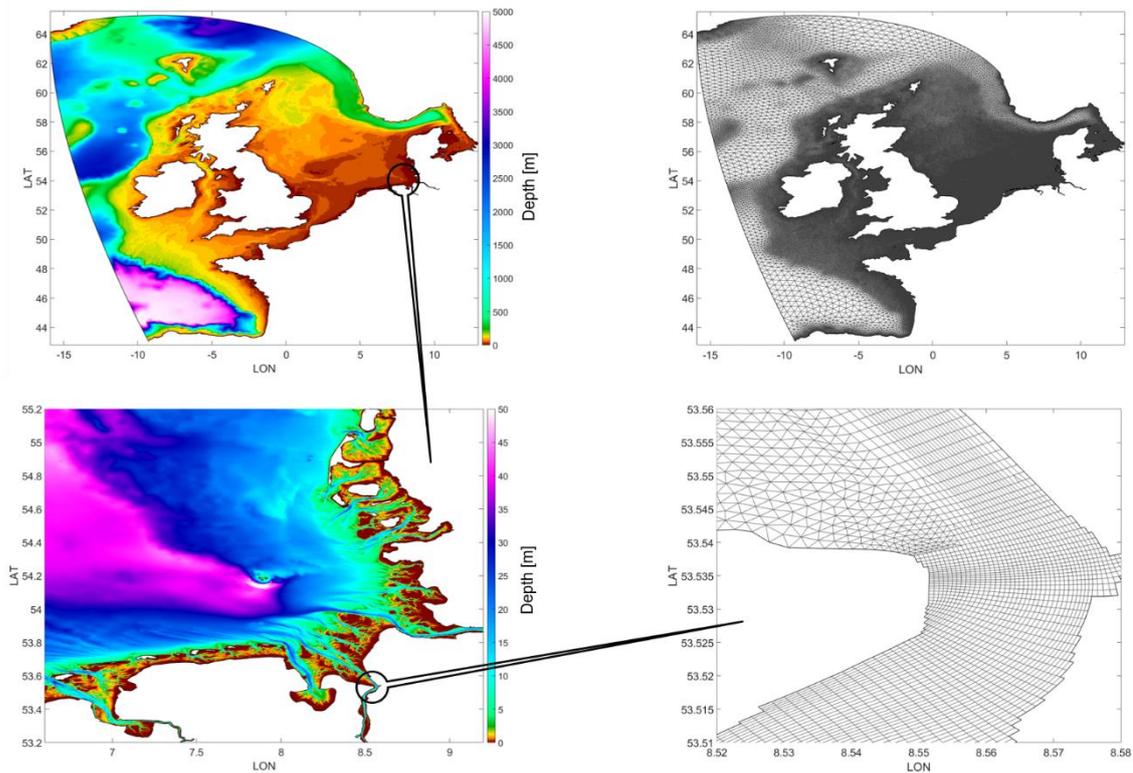
The SCHISM-model enables maximum flexibility for the horizontal discretization. Because the terms imposing the most stability constraints are handled numerically implicit and advection of momentum is treated by means of an un-Trim-like Lagrange approach, a wide range of different mesh sizes is possible, as Courant numbers far beyond 1 are possible (ZHANG et al. 2016). We highly resolve the investigation area around the estuaries and the Wadden Sea and have a very coarse resolution in the Greater North Sea and Atlantic parts of the model. This way, around 90 % of the ~675 thousand horizontal computational nodes and ~ 1.2 million elements are inside the investigation area, which in contrast only covers less than 1 % of the model domain (Table 2). Consequently, the large overall domain has little effect on the computational time.

**Table 2:** Numbers of grid nodes, area size and element size range for different regions of the model domain. Values are only approximate.

<b>Region</b>	<b>number of nodes</b>	<b>Share of nodes</b>	<b>Area</b>	<b>Share of Area</b>	<b>Element size range</b>
	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>	<b>[km<sup>2</sup>]</b>	<b>[%]</b>	<b>[m]</b>
Inner estuaries of Ems Weser Elbe	100000	14.8	1100	0.05	5* – 200
Wadden Sea	500000	74.1	15000	0.65	50 - 200
Remaining Greater North Sea	50000	7.4	700000	31.15	200 – 10000
Remaining Model domain	25000	3.7	1530000	68.15	3000 – 50000
Total	675000	100.0	2246100	100.00	5 - 50000
<b>*direction of quad. elements perpendicular to flow direction</b>					

The majority of elements are of triangular shape. Their sizes are determined by the surrounding depth. In the channels of Ems and Weser as well as in selected tidal channels, where there occurs distinct bidirectional flow, quadrangular elements are used to ensure a proper representation of the channels cross-sections and further reduce numerical diffusion and element numbers. As the Ems river gets comparatively narrow close to its tidal barrier, element sizes perpendicular to the flow direction go under 10 meters, in order to assure a minimum number of five to six nodes in the cross-section during mean low water conditions. In the vertical discretization, localized sigma coordinates (LSC<sup>2</sup>) are used (ZHANG et al. 2015).

The final grid is the result of an iterative evolution of the mesh design following a comprehensive process of calibration, evaluation as well as consideration of emerging research questions during the project. Figure 6 exemplarily demonstrates the evolution of the grid for the Ebb tidal delta and tidal basin of Norderney for three different model setups.



**Figure 3:** Overview of the model domain (HUBERT et al. 2019).

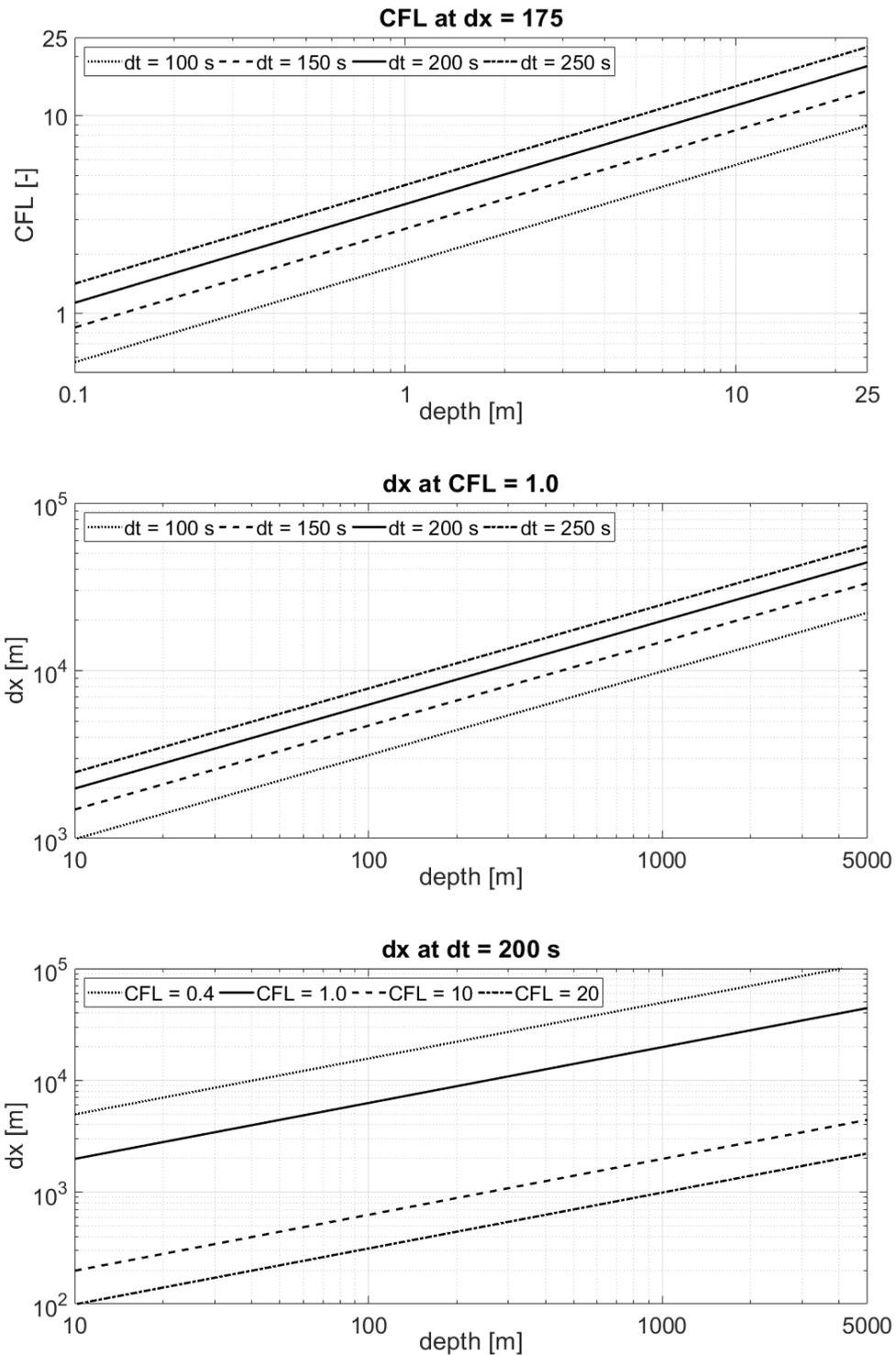
The grid is optimized for a time stepping of 200 seconds, aiming for a best fit concerning required resolution, numerical constraints and computational time in terms of grid size and temporal resolution. Due to the semi-implicit scheme of the SCHISM model, Courant numbers (CFL – Courant-Friedrich-Lewy) above one are possible, allowing a combination of high resolution in the areas of interest and coarse resolution in the remaining domain. The respective discretization is separated in three different categorical domains.

The first discretization-domain covers the inner estuaries of Ems and Weser up to their tidal barriers. Here, the major part of the elements is of rectangular shape, aligned perpendicular to the flow direction of the main channels. The inner estuary of the Elbe River is part of the model but not part of the investigation. It is discretized with triangular elements with increasing size from the tidal barrier at Geesthacht to Cuxhaven from 50 to 175 m. The numerous basins and channels of Hamburg harbour are not included in the model. It only resolves the northern and southern branch of river Elbe.

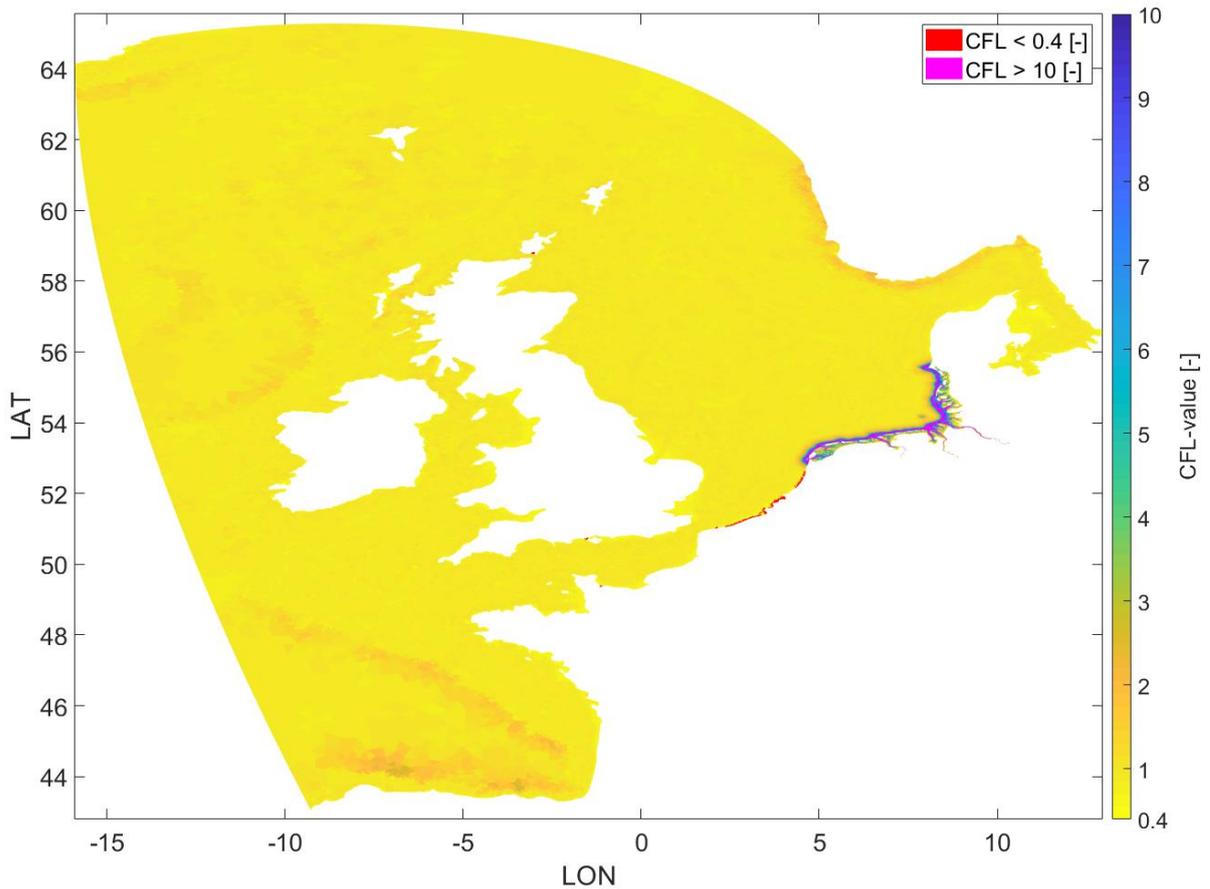
The second discretization-domain covers the outer estuaries and the Wadden Sea from Den Helder up to Esbjerg reaching approximately to the 20 m isobath on the seaward boundary. Here, the area is discretized with triangles of a uniform element size of roughly 175 m. CFL numbers are kept between 1 and 20, with the greatest values in the deep channels (Figure 4 upper panel). An exception to this rule is made within the tidal basin and ebb tidal delta of Norderney, where there are also quadrangular elements perpendicular to the flow direction of the major tidal channels (Figure 6).

The remaining parts of the model are also discretized with triangular elements, but the size is subject to the surrounding depth and the reversed CFL-criterion of the SCHISM-solver. Element size increases with depth and CFL is kept above 0.4, with the biggest share of the elements fulfilling  $CFL = 1.0$  (Figure 4 middle and bottom panel). Only a few patches violate the lower limit of 0.4 (Figure 5).

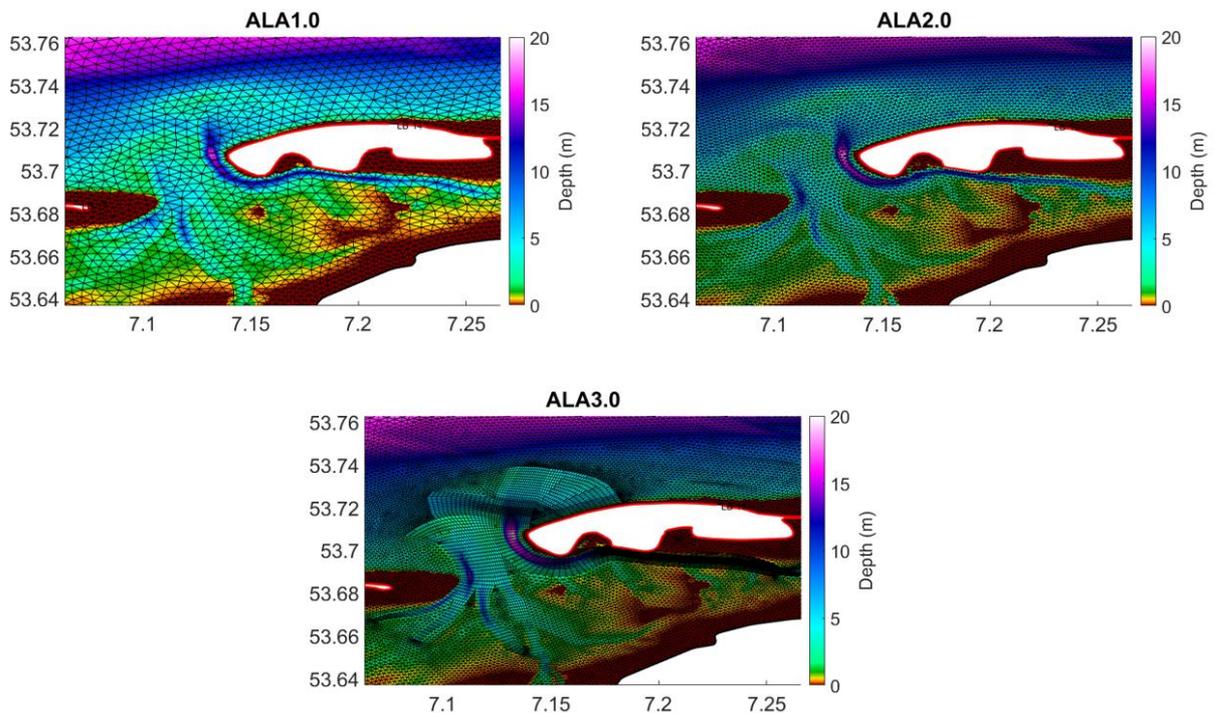
Between the different discretization-domains transition zones ensure a smooth alignment.



**Figure 4:** Upper panel: CFL-values for different depth and time stepping at a fixed element size of  $dx = 175$  m. Middle panel: Element sizes  $dx$  for different depth and time stepping at a fixed CFL-value of 1.0. Bottom panel: Element sizes  $dx$  for different depth and CFL-values at a fixed time stepping of 200 s. Note that double logarithmic scales are used.



**Figure 5:** CFL-values of the grid elements for a time stepping of 200 seconds. Red colours indicate values below 0.4, purple colours indicate values exceeding 10.



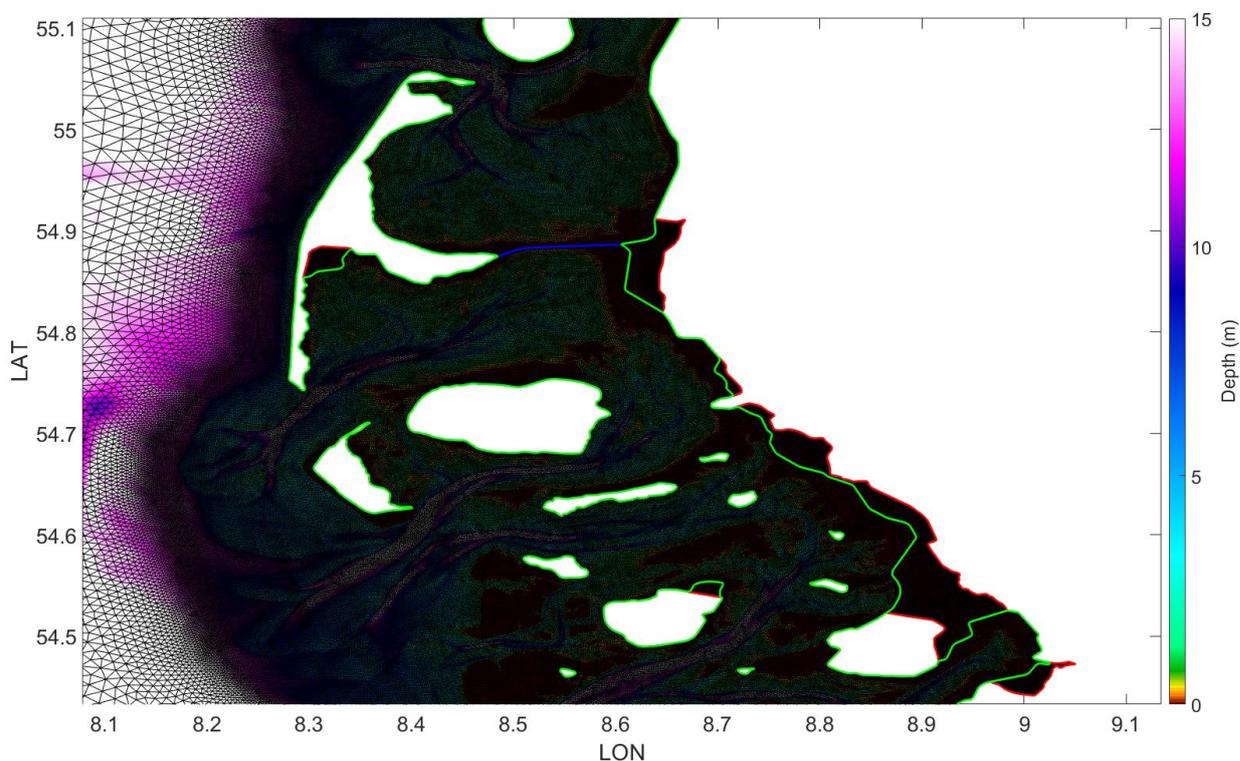
**Figure 6:** Evolution of the horizontal grid discretization at Norderney. The abbreviations above the panels refer to internally used names of the different mesh designs. ALA3.0 is the final mesh.

As the analysis compare historic and present morphological states, the setup is capable of representing both conditions in one and the same grid. The model boundary follows the most inland located coastline of the two states. Inside the grid, elements are aligned in such a way that the coastlines of the remaining morphological state can be represented coherently. Figure 7 illustrates

this exemplarily along a part of the Schleswig-Holstein coastline. The green lines follow along the present dyke- or coastlines. In areas, where land was reclaimed, the grid is extended by those polders. In this case, the historic dyke line represents the landward model boundary (red lines in the figure). For simulations of present states, grid cells behind the green line remain dry and inactive. Historic dyke lines of the Schleswig Holstein coast were provided by the Schleswig-Holstein Agency for Coastal protection, National park and Marine Conservation (LKN.SH).

Furthermore, the grid elements are aligned along major tidal channels, hydraulic structures and dams to guarantee a best possible representation of cross sections and allow for modification of construction heights.

Within the inner estuaries of Ems and Weser, where elements are of rectangular shape perpendicular to the main channels, the design process for a grid fitting both morphological states was more sophisticated, as over the regarded period of time, the channels have shifted significantly in certain areas.



**Figure 7:** Detail of the model grid at the coast of Schleswig-Holstein. Green lines represent the present coast- and dykelines. Red lines represent historic routes. The blue line represents the Hindenburg dam connecting the island of Sylt with the mainland.

### 2.1.2 Bathymetry

Bathymetrical information for the model is compiled from several sources (Table 3). In the larger domain of the Greater North Sea and Atlantic we use open source data from EasyGSH-DB and EMODnet. Within the Lower Saxony Coastal Zone and estuaries we use state owned high resolution Lidar and sounding data. Bathymetry for the tidal parts of the Eider River were provided by the state of Schleswig-Holstein (LKN.SH).

**Table 3:** Present and historic bathymetries used in the numerical model

Region	Period*	Source
<b>Present</b>		
Atlantic and parts of the North Sea	2016	EMODnet
German Bight and parts of the North Sea	2016	EasyGSH-DB
Parts of the tidal Eider River	2012	State of Schleswig Holstein
Ems estuary	2015	State of Lower Saxony
Jade Estuary	2012	State of Lower Saxony
Weser estuary	2012	State of Lower Saxony
Elbe estuary	2010	State of Lower Saxony
East Frisian islands	2013- 2016	State of Lower Saxony
<b>Historic</b>		
Entire Lower Saxony coastline	1650, 1750, 1860, 1960	HOMEIER et al. 2010
Ems	1937	HERRLING and NIEMEYER 2007a
Lower Weser	1887	ELSEBACH et al. 2007
Outer Weser	1870	Dev. within this project
East Frisian islands	1960	Dev. within this project
* data might not be limited to a single year but cover a larger time span		

Considering the historical bathymetries, a number of data sets has been developed within former research work as well as within this research project. They have been developed by comprehensive digitization of historic navigational charts or other ancient documents.

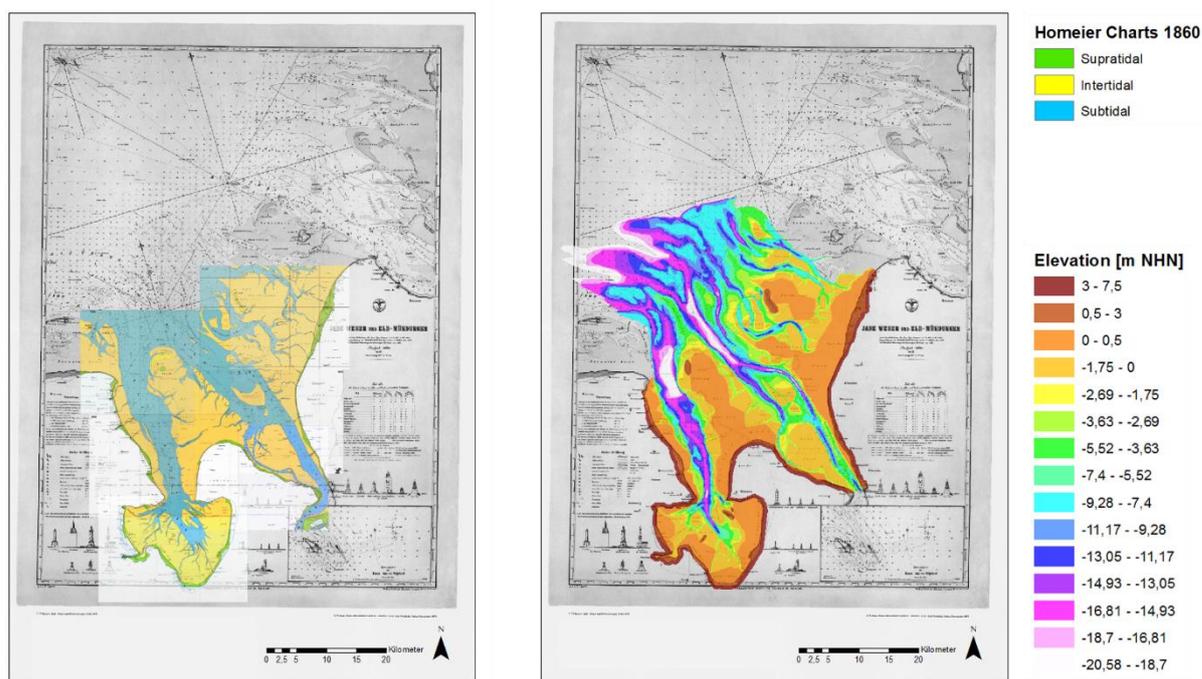
Because bathymetrical information more than a hundred years ago was sparse – both in space and time – as well as much less accurate compared to today’s possibilities, there are a few limitations that need to be pointed out:

- The historical data sets, especially for larger areas, never represent a close instant of time. The preparation of navigational charts in 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> century took several measuring campaigns to complete and thus are compiled from data that was collected over a period of sometimes several years.
- For larger areas, there are sometimes not enough maps of the same period available, to cover the whole area, or certain maps have to be omitted due to insufficient quality or other reasons. For example, the historical bathymetry for the Ems estuary is compiled from different maps covering several decades (HERRLING & NIEMEYER 2007a).
- As ancient maps were mainly created for navigational purposes, information outside the navigational channels, i.e. tidal flats, are provided only with little depth information. These gaps have to be filled with assumptions.

- The vertical reference system differs from today's vertical reference and thus depths need to be adjusted. In some cases, depth will be given with reference to local low water marks. Here, adjustment of the depths is a lot more difficult, as it has to be done with historical tide gauge data.

Also present bathymetrical data sets face some of these problems, especially when looking at the larger offshore domain of the North Sea, where on the one hand depth are still shallow, so that inaccuracies can have a notable impact on the simulated tide but on the other hand such inaccuracies are unavoidable with respect to the size of the area and the absence of GNSS kinematic reference.

Therefore it is very important to straighten out, that the derived results in this study must always be looked at with respect to the range of uncertainties.



**Figure 8:** Homeier charts (HOMEIER et al. 2010) of the outer Weser and Jade estuary region for the state of 1860 showing supra-, inter- and subtidal areas (left panel) and Triangular Irregular Network (TIN) of the same region for the state of 1870. The background shows a historical navigational chart (LANG 1973) that was used to digitize the elevation data for the TIN.

## 2.2 Model Calibration

Due to the model set-up and its completely new spatial domain covering a large area, the calibration process took a big share within the project. The ALE-approach of the SCHISM-model requires the calibration to iteratively optimize the model grid, since a specific range of very high CFL values has to be met. Also during the evaluation process of the study, necessary modifications of the grid resolution setup had to be implemented continuously. The model was calibrated with and validated for different time periods from 2014 – 2017.

The overall results also strongly depend on the turbulence closure scheme used: The cross-scale domain shows depth variations between several thousand meters at the continental shelf and constantly wetting and drying cells next to tidal channels of 10m depth in the Wadden Sea and estuaries.

Shallow water wave equation models, when turbulence is considered in a boussinesq-approximated way (e.g. two equation turbulence models) basically assume the complete water depth as the turbulent wall boundary layer.

Especially without meteorological or wave forcing at the surface, the specific configuration of the turbulence model may pose severe problems finding a realistic compromise between the open ocean and deeper North Sea areas and the Wadden Sea and estuaries. This is further complicated with vertical grid resolution issues.

The following parameters had to be considered in the calibration of the model:

- Horizontal grid and time stepping

The most important part was the design of the unstructured mesh in the horizontal plane, since the mathematical approach requires strict compliance with the appropriate CFL range. It has to accommodate optimal resolution of the investigation area in combination with a reasonable overall mesh size, time stepping and computational time. Several meshes for the same domain were set up and tested. Especially in the Wadden Sea and estuarine zone, the setups have developed intensely over time. Besides the implementation of quadrangular elements in the estuarine zone and stepwise refinement of the entire Wadden Sea from Den Helder to Esbjerg, a major step was to improve the grid design for Ems and Weser river, so that it can handle both historical and present states with flow-parallel quadrangular elements, even though positions and directions of the main channels differ greatly in some parts between the two conditions. Additionally, the model domain includes several areas between historical and present dyke lines. The current grid is optimized for a time stepping of 200 seconds.

- Vertical discretization

In the vertical plane, different solutions for discretization have been tested from 2D, pure  $z$ , hybrid sigma/ $z$ - coordinates to localized sigma coordinates (ZHANG et al. 2015). The current setup uses LSC<sup>2</sup> with a focus on the top 200 m, i.e. continental shelf.

- Bottom friction and turbulence closure scheme

The model was calibrated using different regional friction coefficients. The bottom friction is calibrated in alignment with present conditions and adopted for the historical states. This of course is a compromise and has the consequence, that results will not be satisfactory in all places and morphological states. But since friction is also one of the boundary conditions, this procedure ensures that we analyse differences induced only by bathymetrical changes and not from friction coefficient variations or other boundary conditions. Bottom roughness is given as roughness length  $z_0$  with a constant value of 2 mm.

- Bathymetry

As bathymetrical data is only accurate up to a certain level, it is valid and probably necessary to adjust it as a parameter in the calibration process in the range of its uncertainties (VERBOOM et al. 1991). Especially the historical bathymetries lack on accuracy, as stated before. Another problem evolves from the sparse density of the historical depth information. This leads to a great underestimation of the bed form resistance and existing dune structures, which cannot be compensated through roughness parameters. Therefore, these features are substituted by artificial surface irregularities that are added with a random distribution in the historical model parts.

The seaward open boundaries are driven with amplitudes and phases of 29 astronomical constituents, covering daily, fortnightly, monthly and seasonal inequalities of the tide. The nodal tide is represented with a constant node factor for each constituent. The amplitudes and phases of the constituents at the boundary nodes are interpolated from the FES Global Tides Model 2014. Constituent's Equilibrium arguments with reference to Greenwich and node factors are calculated within the SCHISM model suite on basis on of SCHUREMAN 1940 for the starting and middle time of the simulation respectively.

The open boundaries at the tidal barriers of Ems, Weser and Elbe are supplied with discharge data. For some calibration runs we use daily discharge values measured at the gauges Versen (near Ems River tidal barrier), Intschede (Weser) and Neu-Darchau (Elbe). For the analysis though, we use approximate multiannual mean discharge values (Table 4), as we only want to analyse the influence from bathymetrical changes under mean boundary conditions. Additional sources are set for Eider River and major tributaries along lower Ems and Weser.

**Table 4:** Constant discharge values at open boundaries and sources in the German Bight.

<b>Rivers and tributaries</b>	<b>Position</b>	<b>Discharge [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Source</b>
Ems	At tidal barrier	80.0	Versen (rounded value), NLWKN 2018
Weser	At tidal barrier	300.0	Intschede (rounded value), NLWKN 2018
Elbe	At tidal barrier	700.0	Neu-Darchau (rounded value), HPA 2017
Leda	At tidal barrier	15.0	estimate
Hunte	At Weser inflow	15.0	Elsebach et al. 2007
Ochtum	At Weser inflow	7.5	Elsebach et al. 2007
Lesum	At Weser inflow	13.0	Elsebach et al. 2007
Geeste	At Weser inflow	5.0	Elsebach et al. 2007
Eider	Near Tönning	6.5	estimate

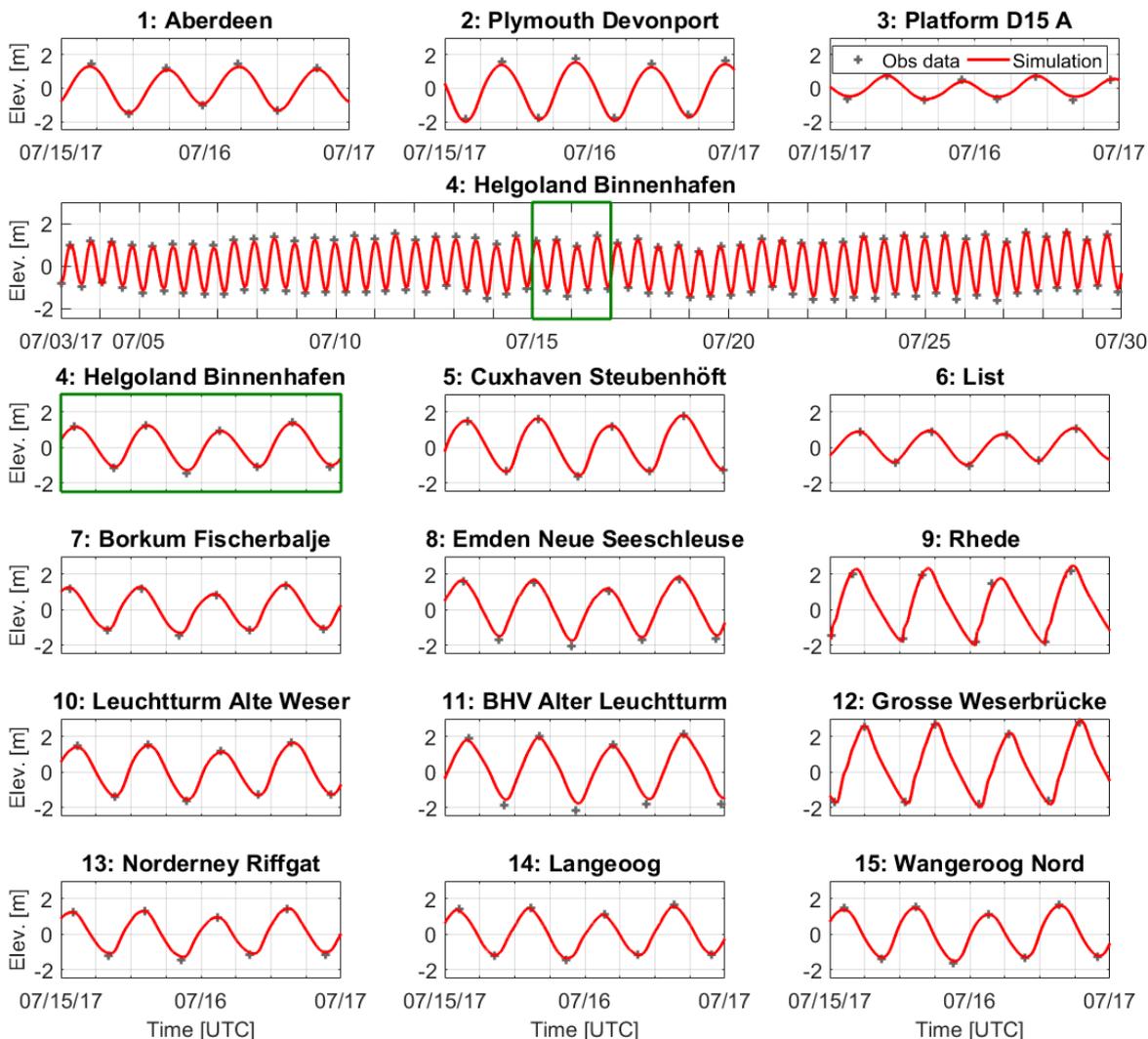
Atmospheric forcing is used within the calibration process to check the model performance under different meteorological conditions, even though the later analysis are carried out with astronomical tidal input only, because boundary conditions should remain the same between historical and present conditions and results should refer to mean tidal values and not be influenced by other boundary conditions. For the atmospheric calibration we use hourly forecast model data for air pressure, wind speed and wind direction from the DWD ICON-Model.

The model results are compared to observation data of tide gauge stations along the British (10), Dutch (5) and German (55) coastline as well as from different offshore (5) stations.

Figure 9 shows a selection of comparisons throughout the German Bight and inside the estuaries of Ems and Weser for the present morphological state as well as for gauge stations near the margins of the North Sea and offshore. Figure 10 displays the Root mean square error (RMSE) for gauge stations in the German Bight. Because for most gauges only peak and crest values were collected for comparison, the RMSE is displayed for High and Low waters. The upper panel shows the combined RMSE. Along the coastline the RMSE is satisfactory with values below 10 cm. Inside

the estuaries, especially for low water conditions, there is a misfit between observation and simulation at some stations. This applies near the tidal barrier of the Ems River and around Bremerhaven and Nordenham in the Weser River. It is assumed, that this is due to the rheological influence of the fluid mud and the dynamics of the estuarine circulation, since turbidity and density induced turbulence damping is not included in the calculations.

The amphidromic system of the model is shown in the Co-Tidal / Co-Range chart in Figure 11, which's values are in good accordance with gauge station data.

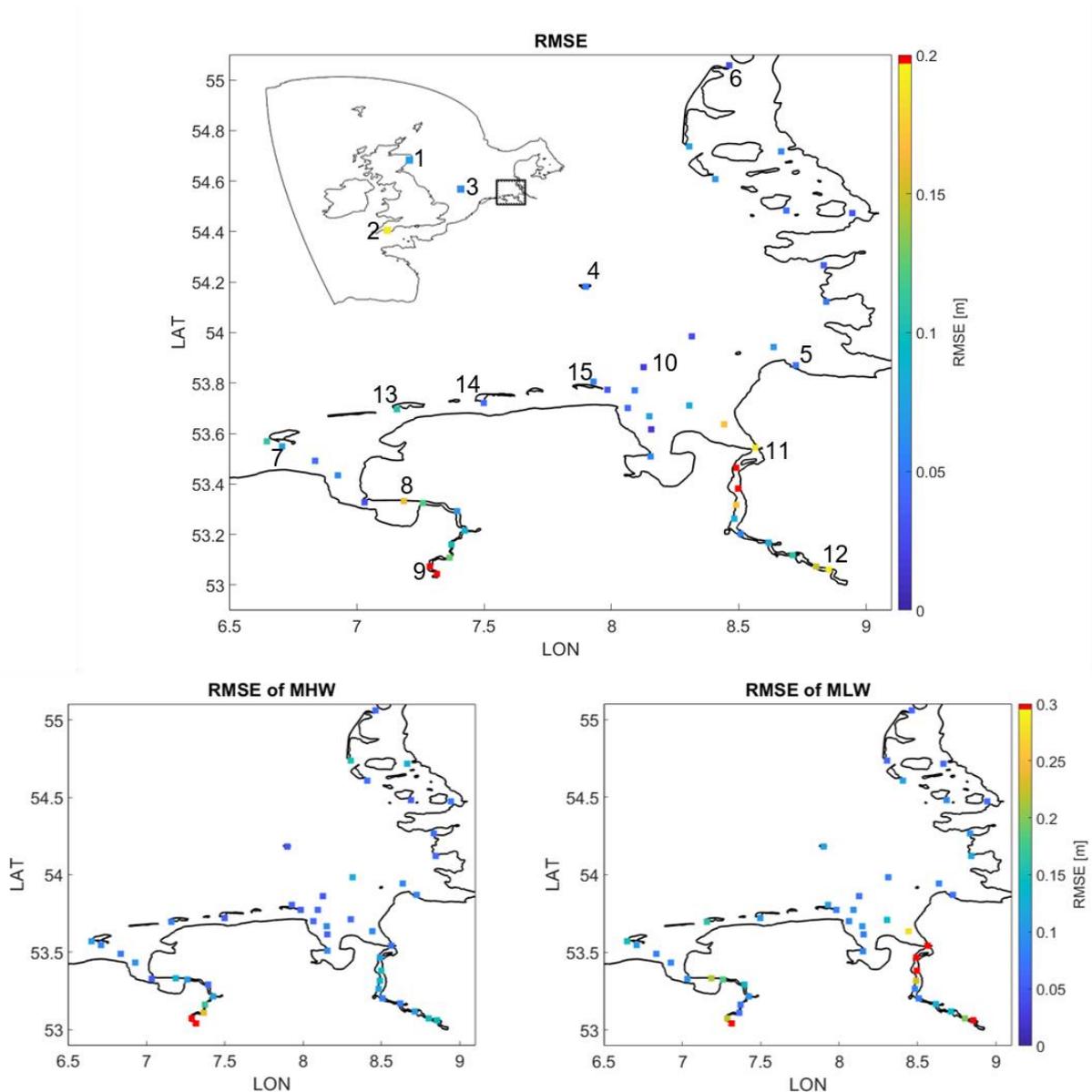


**Figure 9:** Comparison of Simulation (red) to Observation (gray) data at selected gauge stations. Positions are indicated in Figure 10. Observation data provided by WSV and British Oceanographic Data Centre

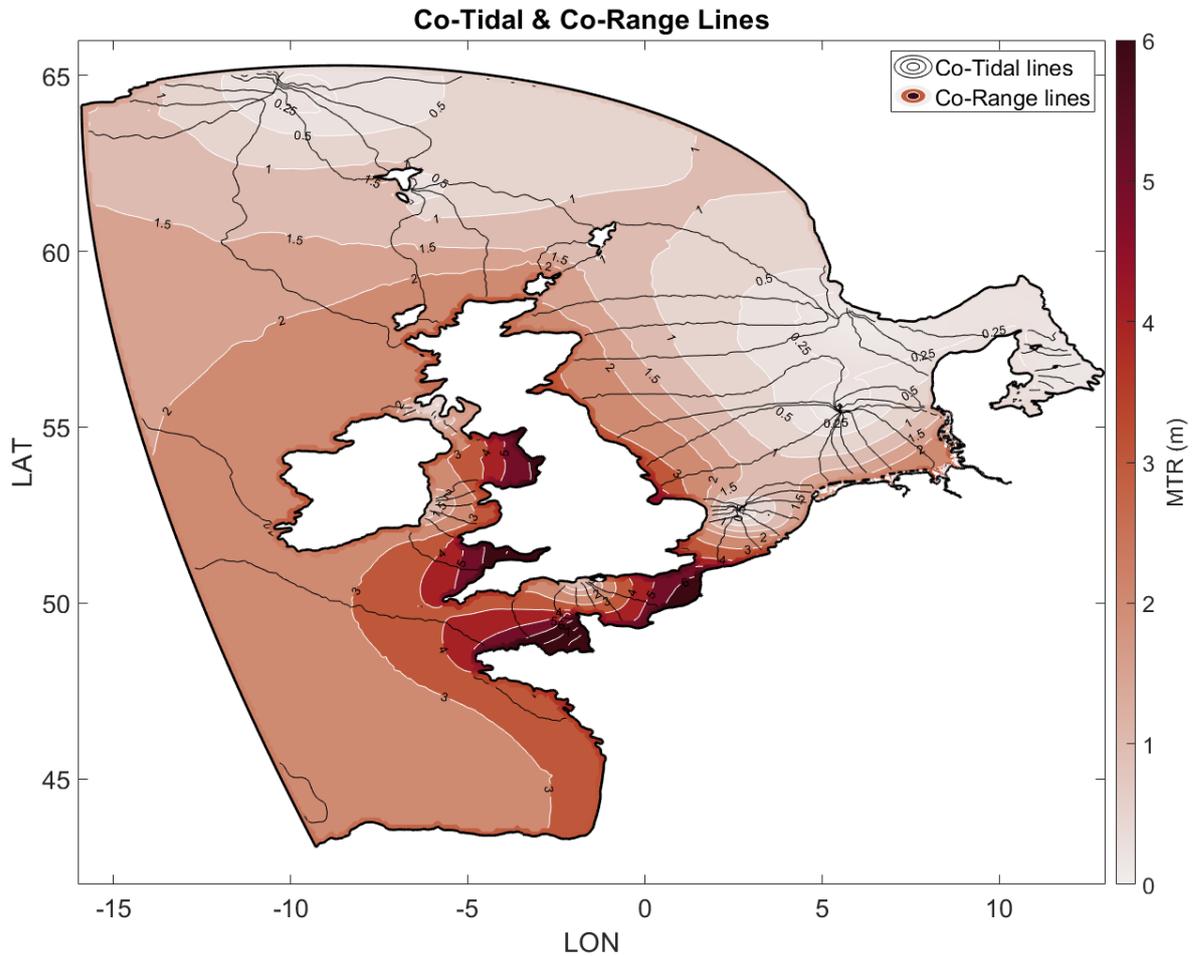
In the case of baroclinical calibration, open boundaries are set to a constant value of 35.0 PSU at the seaward and 0.3 PSU at riverine open boundaries. The domain is initiated with a hotstartfile, that was previously ramped-up for 30 days with initial PSU between 32 and 34 on the shelf and <32 to 0.5 in the estuaries. Analysis though are carried out barotropically without solving for transport equations. Salinity plays an important role for sea level heights, especially in the estuarine zone, where the density gradient influences the elevation in the range of several centimeters. But when not looking at absolute values but comparing differences between historical and present tidal characteristics, the differences remain nearly the same for both barotropic and baroclinical simulations in the coastal zone, as the influence from density evens out here (Figure 18, left panel in comparison to Figure 17 bottom right panel). Because the advantages due to baroclinical sim-

ulation regarding the outcome in the coastal zone is rather small compared to the strongly increased computational effort, simulations are carried out barotropically without solving for transport equations. Another reason contradicting the baroclinical approach is the difficulty to calibrate the historical model for salinity, as there is no sufficient data.

Also the differences between perigean and apogean tides even out when comparing water level differences. The first estimations intended, that it seemed important for the results to include at least two spring-neap cycles. But analysis showed that despite differences of up to several centimeters in absolute values, the effect cancels out when comparing the differences between historical and present morphological states (Figure 18, left panel in comparison to Figure 17 bottom right panel).

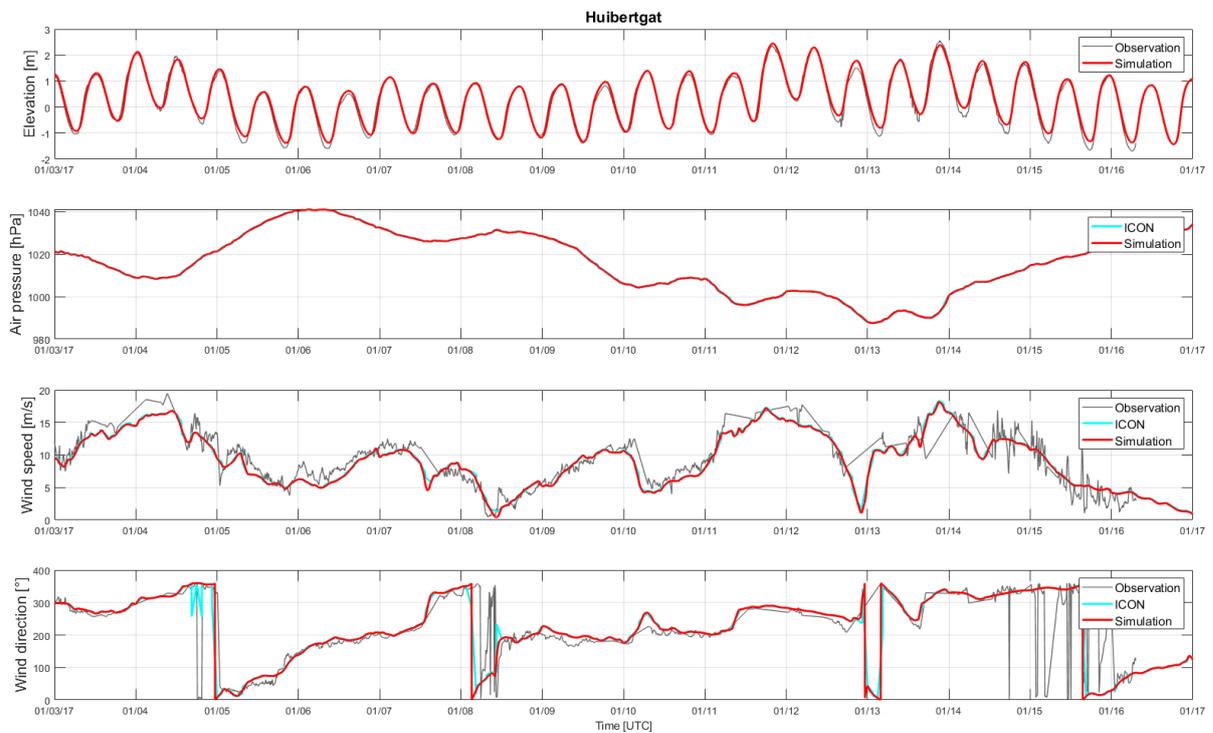


**Figure 10:** Root Mean Square Errors (RMSE) for tide gauges in the German Bight (present morphological state). Lower panels display RMSE for High and Low water values, upper panel the combined RMSE. Numbers in upper panel indicate position of plots in Figure 9.



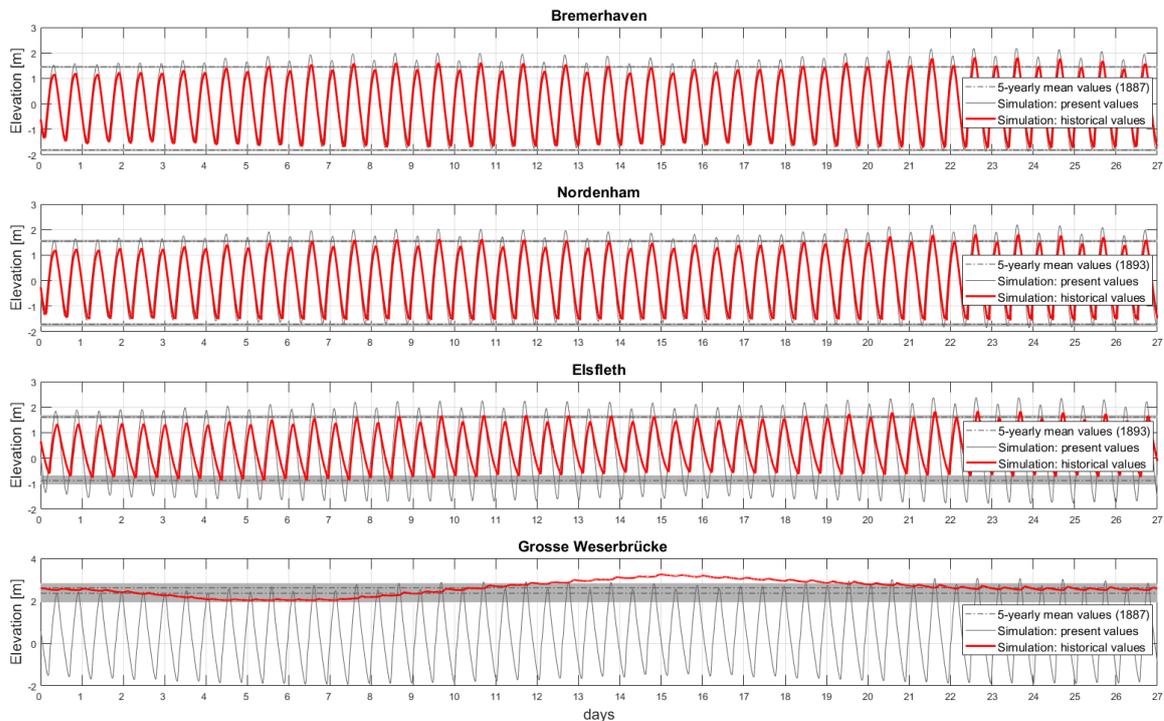
**Figure 11:** Mean Co-Tidal and Co-Range lines derived from a 30 day simulation. Black Co-Tidal lines represent equal MHW intervals and coloured Co-Range contour lines represent equal Mean Tidal Range.

Figure 12 shows results in comparison to observation data for a model run with storm surge conditions during January 2017 at the Dutch gauge station Huijertgat, which plays an important role in the calibration process, as its position close to the Dutch-German border is in tidal luv of the investigation area along the German Coastline. The results show, that the model is able to perform both in calm weather and storm surge conditions. Atmospheric forcing is driven with forecast-model data from the DWD ICON-Model (DWD). As this is not observation data, disagreements between modelled and observed water level can also be due to under- or overestimated atmospheric parameters in the forecast model. The upper panel shows water level elevation, lower three panels show air pressure, wind speed and wind direction respectively.



**Figure 12:** Comparison of simulation (red) to observation (grey) and forecast-model (light blue) data at gauge station Huibertgat during a time period with storm surge conditions in the German Bight (January 2017). Huibertgat is offshore the most eastern Dutch barrier islands Schiermonnikoog and Rottumerplaat. Observation data provided by Rijkswaterstaat.

Since for most gauge stations, available historical single water level values are rare, we use multi-annual mean values to compare the model results from historical bathymetries. In Figure 13 there are comparison plots for different gauge stations along the Weser estuary. The plots are ordered in upstream direction. The results were produced without meteorological forcing and with an arbitrary astronomical constellation, as we do not compare to a specified period but to multiannual mean values. In order to better meet the observations, mean sea level for calibration of the model was lowered by 25 cm. The discharge time series is artificial. It consists of discharges between approximately half to double of the mean discharge ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) at the tidal barrier, which roughly meets the late 19<sup>th</sup> century as well as today situation (Elsebach et al. 2007). The thin grey tide curve in the background displays the tide under present conditions. It is no observation data, but also modelled data from a simulation with the present bathymetry and exactly the same boundary conditions. The difference between the red and the thin grey lines demonstrates the drastic change in tidal regime between the two morphological states, as already displayed in Figure 2. The horizontal dark grey dashed lines represent the five yearly mean tidal values at the corresponding gauge station for the year indicated in the legends. The shaded range illustrates minimum and maximum values of the corresponding five year period. Further upstream, these ranges grow bigger, as influence from discharge grows with decreasing influence from the tides. The modelled results show the same behaviour. The tidal range at Große Weserbrücke is significantly smaller and the water level oscillates along with variations in discharge values around the historical mean values. In contrast, under present conditions (thin grey lines), discharge-differences are hardly notable close to the tidal barrier.



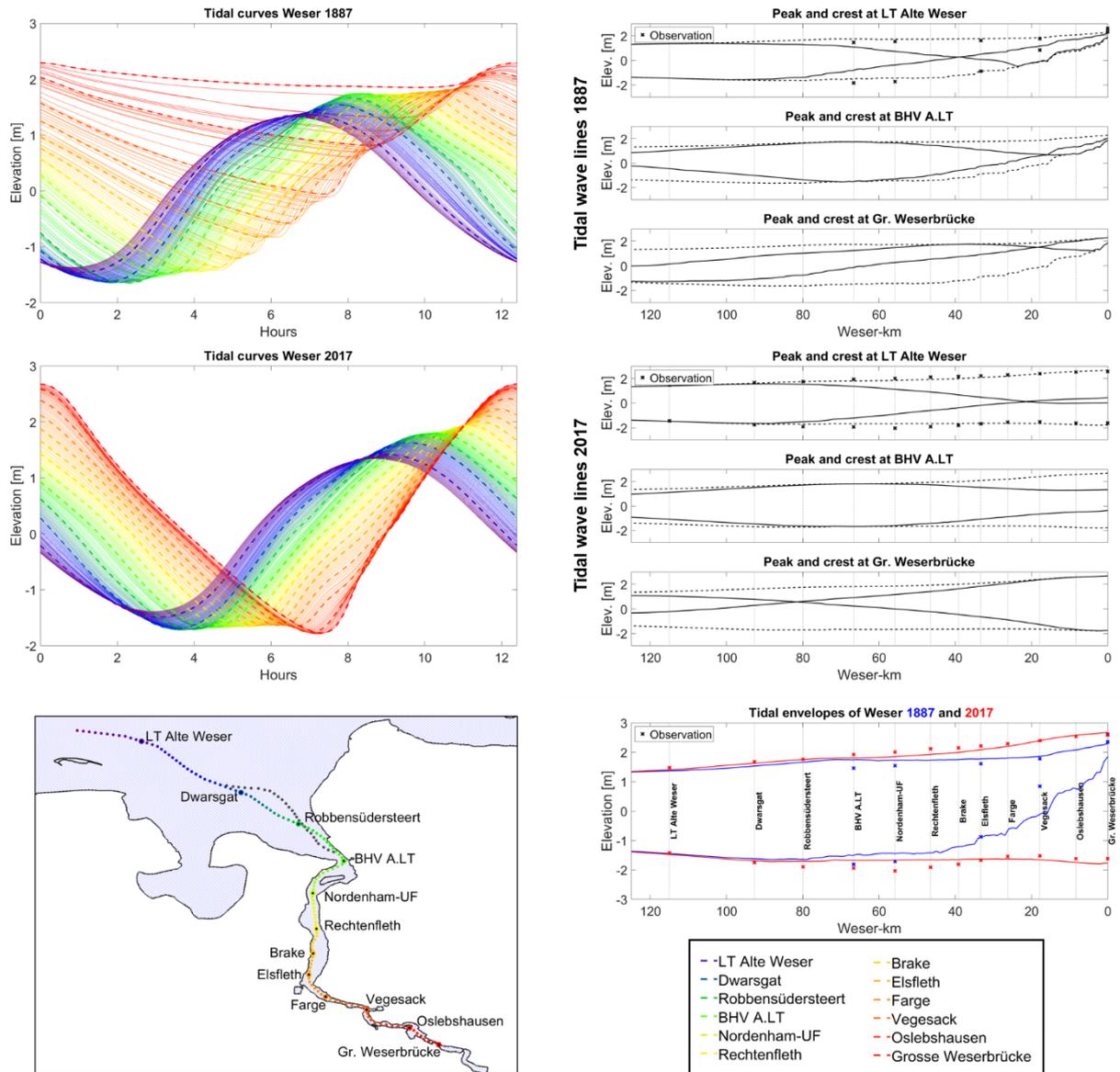
**Figure 13:** Comparison of simulated historical (red) and present (thin grey) tide to historical multiannual mean values (dashed grey lines and shaded areas) along the Weser estuary in upstream direction. Positions can be seen in Figure 14.

Differences of the tidal regime not only at selected gauge stations but along a transect of the Weser river with a discretization of 1 km is demonstrated in Figure 14. The upper and middle left panels show synthesized mean tidal curves (for explanation see section 3) for every km of the tidal Weser river from km 0 to km 126 for historical (upper) and present (middle panel) morphological conditions. The positions are indicated in the lower left panel with the corresponding colour. The grey dots show the historical pathway of the main channel in the outer Weser before the Franzius' corrections. Tidal curves are plotted over time beginning with high water at km 0. The dashed lines represent positions approximately at gauge stations (see legend. Not all gauge stations were already in operation in 1887 – they serve as orientation in the plots).

The plots again reveal the change of the tidal regime. The tidal range increases especially further upstream. The tidal phases shift along the transect, as under historical conditions, the tidal wave took longer to reach from outer Weser to Bremen. Finally, the decrease of the water level gradient can be derived from the figures. Present tidal curves are closely grouped. The right panels show different tidal wave lines and envelope curves of high and low waters along the transect for historical (upper three panels) and present time (middle three panels) and in comparison (lower right panel). The small crosses show observation data.

Along the historical transect, simulated low water conditions remain significantly above the observed mean values, especially upstream of Vegesack. One reason for this is on the one hand the sparse bathymetrical information and chosen assumptions (no calibration over friction, same roughness parameters as in present run). Also the representation of the historical tributaries Och tum and Lesum might be problematic here. They are represented in the model with substitute systems, but their share of the tidal volumes that the rivers would withdraw from the Weser in historical times can only be roughly estimated. FRANZIUS 1888 stated, that before the corrections, upstream of Ochtum and Lesum only half of the tidal volume would progress to Bremen. This might explain, why the model is hardly able to rise low water crests according to observation data.

This means, that the numerical model still underestimates the tidal regime changes and results are a rather conservative estimate.

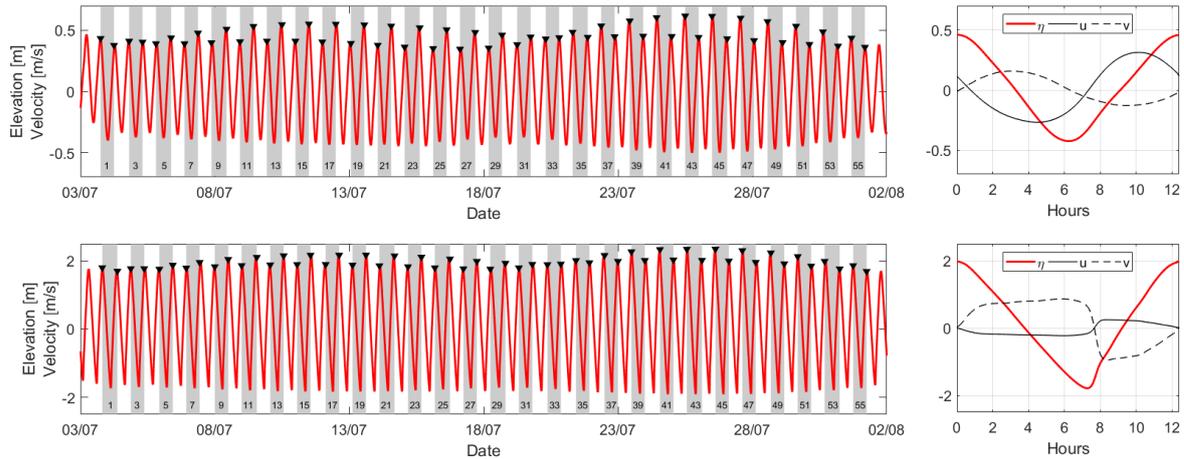


**Figure 14:** Modelled tidal curves, tidal wave lines and tidal envelope curves for the historical (1887) and present (2017) morphological state of the tidal Weser River from km 0 to km 126. Observation data provided by WSV.

### 3 Results

The computation of the synthesized mean tidal curves is similar to the evaluation of a tidal record with a so-called Auswerteharfe (HENSEN 1954). The simulations are carried out over a period of 32 days without atmospheric forcing. The first two days are omitted as ramp-up period. The remaining 30 days assure, that the simulation contains results of at least two spring-neap cycles with diurnal, fortnightly and monthly inequalities of the tide (compare left panels in Figure 15). For every computational node of the domain, peak values, i.e. tidal high waters, are detected. The first and last value are again omitted, leaving – in general – 56 tidal high waters. All values of the 55 tidal cycles between two consecutive tidal highs are interpolated on a grid of 12.4 hours with a discretization of six minutes. The average of all of these interpolations is the synthesized mean tidal curve of the corresponding computational node (compare right panels in Figure 15). The procedure can be repeated with other values like u- and v-velocities. This allows to derive different

hydrodynamic mean values for the whole domain like mean tidal high and low water values, flood and ebb phase durations, maximum flood and ebb velocities, residual currents and others.

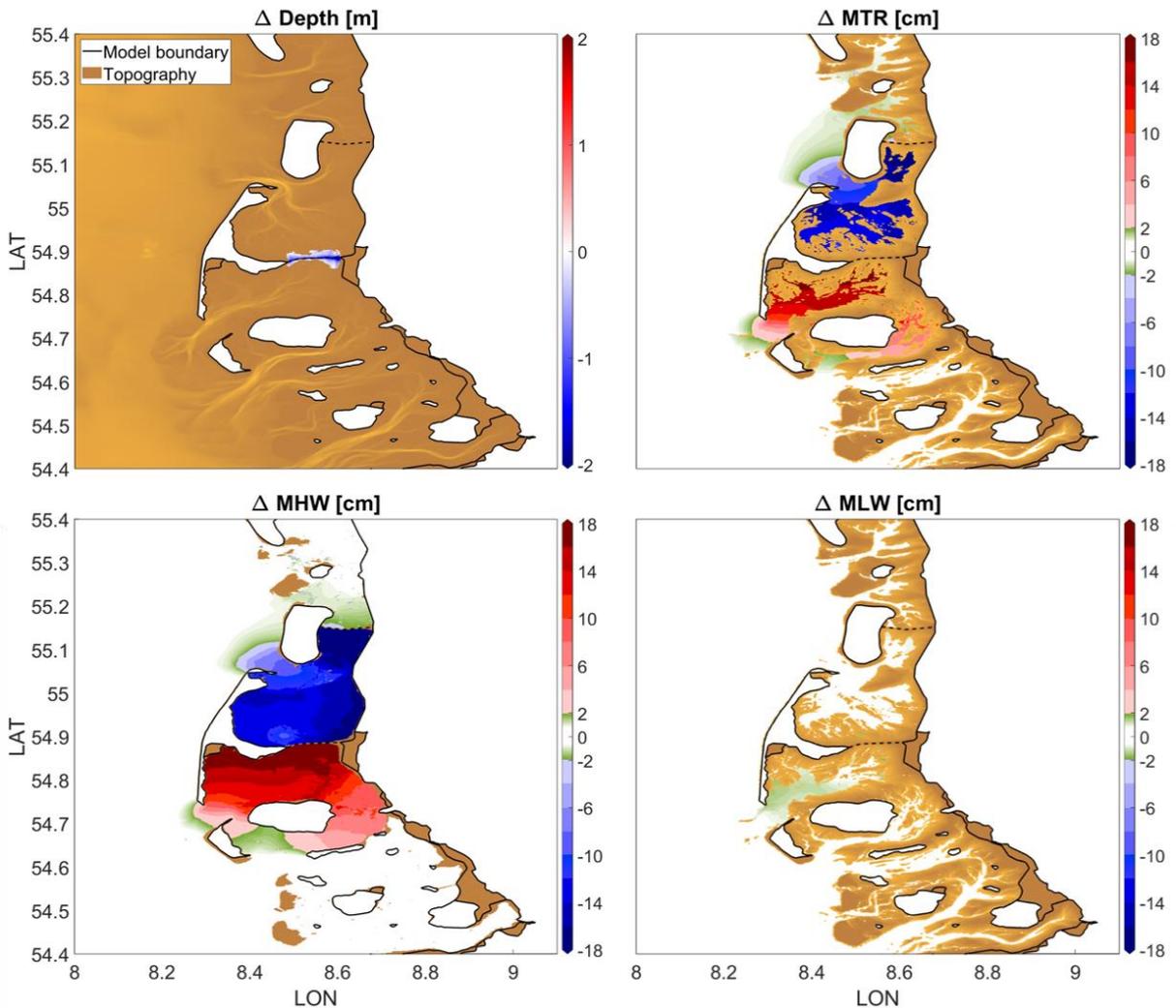


**Figure 15:** Left panels: Simulated tidal record (red) over 30 days for an arbitrary point in the North Sea (top) and near Weener, Ems (bottom). Black markers indicate tidal peaks, small integers indicate tide numbers. Right panels: Synthesized mean tidal curves for elevation (red),  $u$ - (black) and  $v$ -velocity (dashed) derived from the 55 tidal cycles in the left panel.

Before showing results for the Ems and Weser estuary, the evaluation process shall be demonstrated in a first small scale example. The Hindenburgdamm, built in the 1920's, connects the island of Sylt with the mainland. Figure 16 shows how this dam influences the tidal characteristics in the area around Sylt. The bathymetry has only been changed around the dam in the slightly blue shaded area in the upper left panel. All other bathymetry remains the same as do the boundary conditions. Consequently, the figure does not show, how the real tidal characteristics have changed since the construction of the dam, but rather illustrate the sensitivity for the present morphological condition with and without the Hindenburgdamm.

The anti-clockwise rotating tidal wave propagates in northward direction at Sylt and thus is dammed behind the island. Consequently, the dam increases the tidal range (top right panel) and tidal high waters (bottom left panel) in the southern tidal basin and decreases them in the northern tidal basin. As the dam is positioned on the watershed divide between the two basins, there is no effect on low water conditions (bottom right panel).

Due to the strongly implicit character of the model, which enables the cross-scale approach in the first place, small numerical disturbances, i.e. caused from the wetting and drying algorithm, can propagate far off their place of origin, as Courant numbers are large. These disturbances can be observed in remote places of the domain, which cannot be related to local morphological changes. No explicit disturbances of this kind are shown in the results of the following figures, but since the wetting/drying-induced noise can be found up to two centimeters in range and cannot unambiguously be differentiated from the physical effect, all differences within this range, regardless of their vicinity to the morphological changes, are shaded differently in green colour.

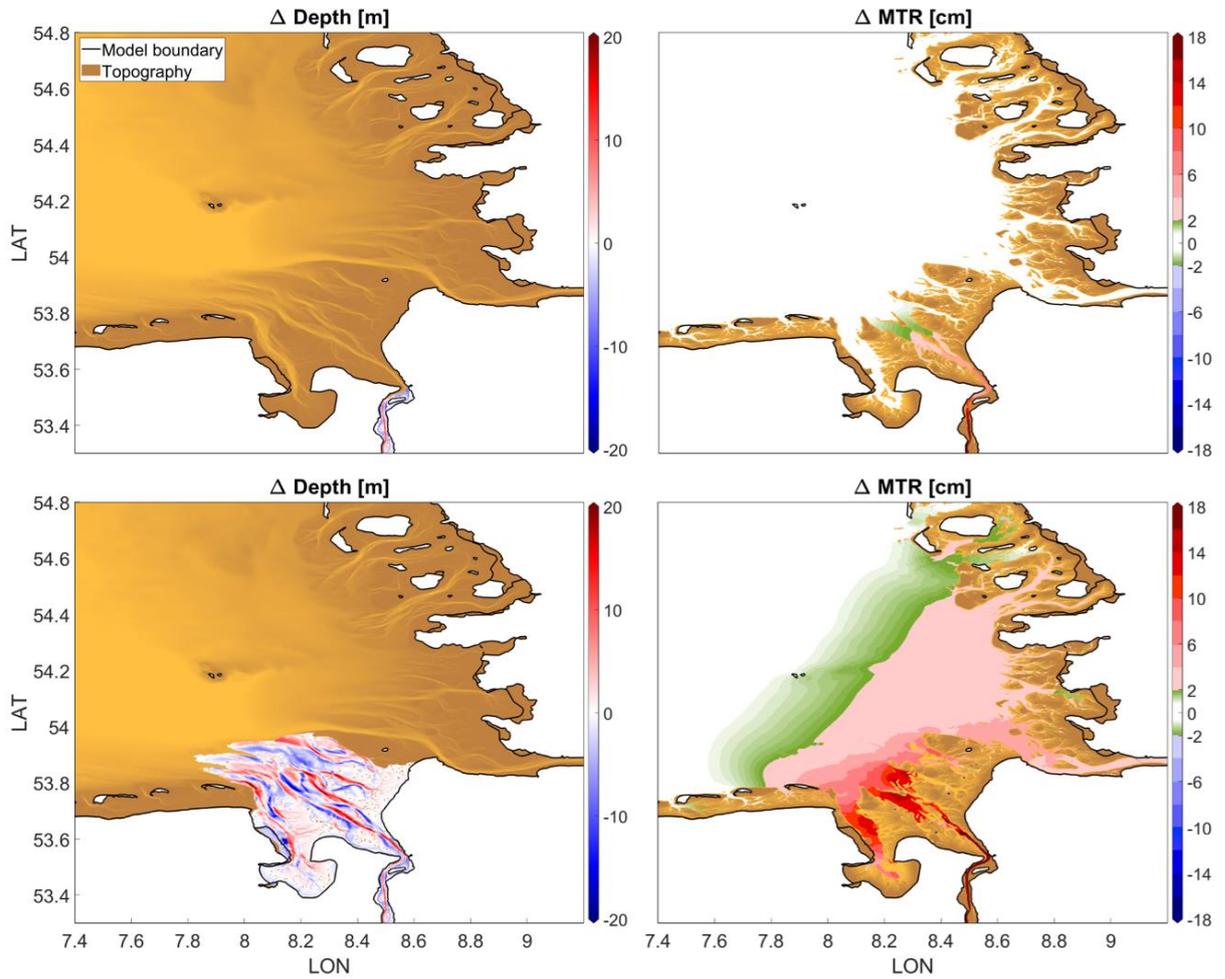


**Figure 16:** Model differences of bathymetry (top left), mean tidal range (top right), mean tidal high (bottom left) and low (bottom right) water conditions for the control run minus the setup without the Hindenburgdamm.

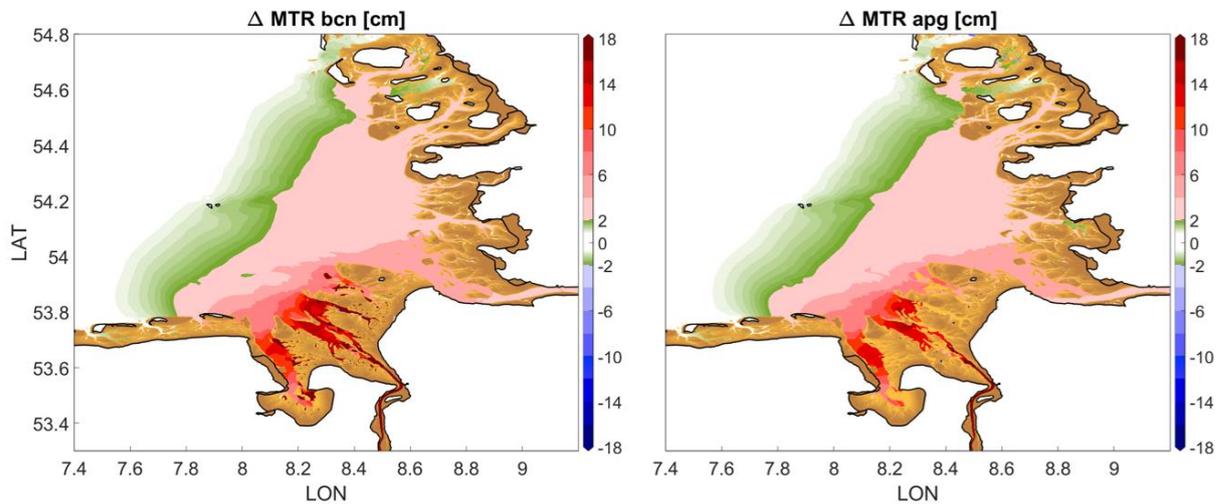
For the Weser estuary we compare two different historical setups in Figure 17. In the first setup, the bathymetry has only been changed in the lower Weser estuary, i.e. from Bremerhaven up to Bremen. In the second setup also the historical states of the outer Weser and Jade have been considered in the simulation.

The right panels show the modelled differences of the mean tidal range between the present and the two corresponding historical states and how far the changes reach outside of the region with changed bathymetry. The reader should be aware, that River Elbe is included with its present topography for both runs.

Whereas for the first (upper) setup changes, mainly due to low water decrease, are found up to Dwarsgat (position indicated in Figure 14) changes of the second (bottom) setup influence the tide far beyond the margins of the changed bathymetry up to the coast of Schleswig-Holstein to small extends of a few centimeters. The influence of the changed topography is stronger notable in the anticlockwise net-direction of the tidal wave propagation.

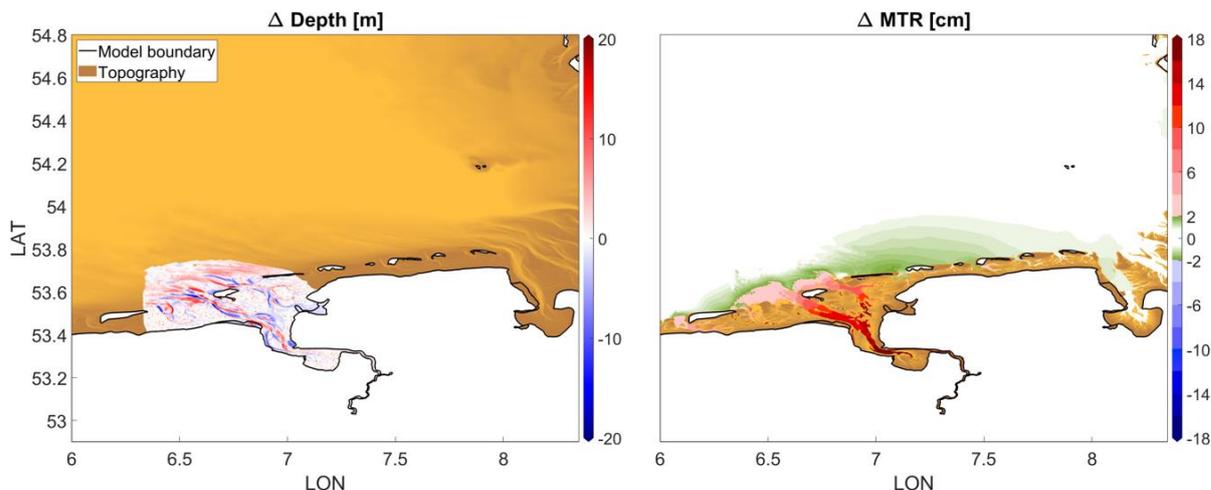


**Figure 17:** Model differences of bathymetry (left) and mean tidal range values (right) for the control run minus the setup of the historical lower Weser estuary (top) and minus the setup of the historical lower & outer Weser and Jade estuaries (bottom) respectively.



**Figure 18:** Model differences of mean tidal range for the control run minus the setup of the historical lower & outer Weser and Jade estuaries in baroclinic mode (left) and evaluated for only half of the simulation period (in this case, the slightly higher apogean spring-neap-cycle, right).

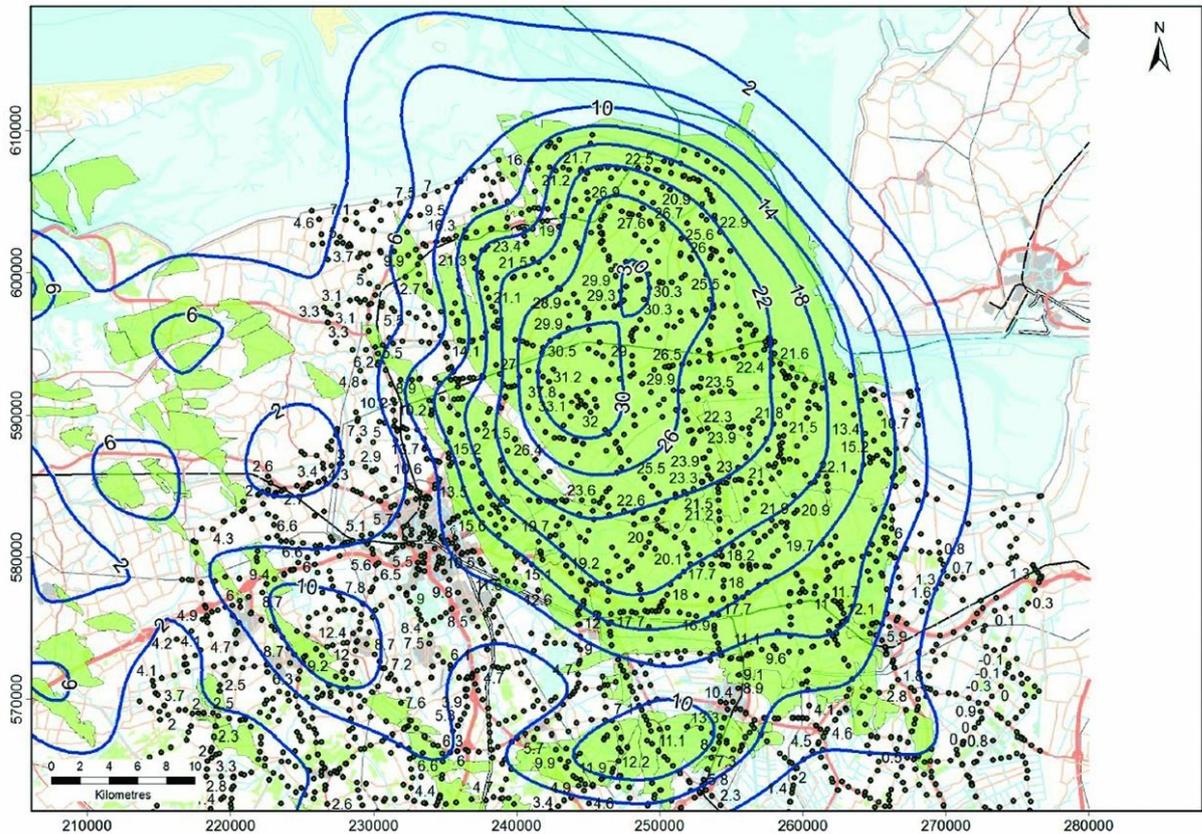
Also the evaluation of the Ems river, where the bathymetry has been changed for lower and outer Ems estuary, an anti-clockwise shift of the differences is found (Figure 19, right panel). Even though changes above two centimeters seem to remain mainly within the area of changed bathymetry here.



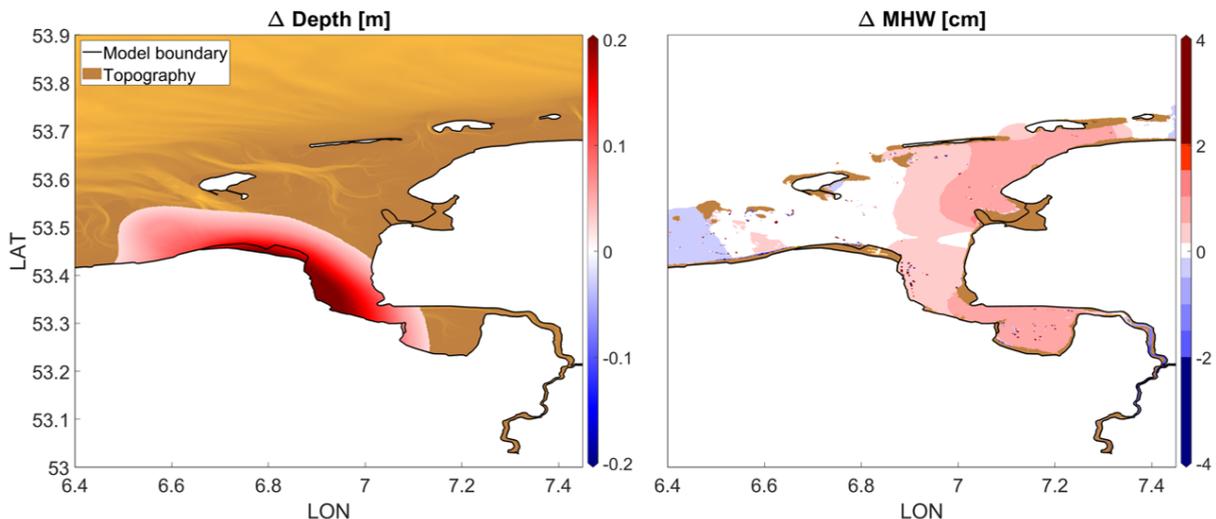
**Figure 19:** Model differences of bathymetry (left) and mean tidal range values (right) for the control run minus the setup of the historical lower & outer Ems estuary.

Part of the research project was to analyse effects that are caused from land subsidence due to gas extraction from the gas field of Groningen, as subsidence, in this case manmade, influences the relative sea level directly (FOKKER et al. 2018). The Groningen gas field is located close to the Ems estuary and is supposed to be the largest onshore gas field in Western Europe (NAM B.V. 2016). Figure 20 shows measured and modelled subsidence values of the Ems-Dollard region from 1972 – 2013, that were collected within the continuous monitoring process of the gas field (NAM B.V. 2015). It can be seen, that the subsidence reaches into the Ems estuary, even though only with small absolute values ranging from approximately two to 22 cm, mostly in the area of Paapsand, a tidal flat west of the navigational channel of the Ems. Subsidence from neighbouring German gas fields is not included, as there is no monitoring program collecting data. Besides that, output volumes from the German gas fields are significantly smaller than those from the Groningen gas field (LBEG 2018).

The subsidence values were transferred into a TIN and subtracted from the depth of the model-grid, in order to simulate differences to the control run.



**Figure 20:** Measured and modelled subsidence values in the Ems-Dollard region for the period 1972 -2013. Green areas show gas fields, black dots measured subsidence at benchmarks and blue lines contour-lines of modelled subsidence (NAM B.V. 2016).



**Figure 21:** Model differences of bathymetry (left) and mean tidal range values (right) for the control run minus the setup of subsidence values from gas extraction in the gas field of Groningen. Mind the different scale in comparison to the other figures.

The results show, that the influence from gas extraction in the Groningen gas field on single tidal characteristics in the Ems estuary remains small in comparison to the impact it has on the vertical land movement. The major part of the differences is below one cm (Figure 21, right panel). The figure only shows results for mean tidal high water conditions, because the greatest subsidence occurs in areas that fall dry during low water.

## 4 Summary

The setup and application of a cross-scale numerical model to analyse the influence of morphodynamical and man-made changes in the estuarine zones of the Lower Saxonian coast on tidal dynamics in adjacent regions was introduced.

Reproductions of morphological states of past and present times have been used to evaluate differences of the tidal regimes and visualize the reach of these changes into unmodified regions of the model. The results show, that local changes of the bathymetry can influence the tidal regime even far offside the place of action, especially in the leeward direction of the tidal wave propagation.

The results give an estimate of the contribution of historically large estuarine river construction measures to tidal regime changes. The lack of historical data requires several assumptions in the model and boundary conditions to be made.

The results give a good impression of the man-made contribution to observed long term trends in mean high- and low-water measurements, which is a new and relevant contribution to the interpretation of those data in the context of mean sea level rise and climate change driven effects.

## 5 Acknowledgements

We would like to thank our project partners from the Research Institute for Water and Environment at the University of Siegen and the Institute of Coastal Research at the Helmholtz-Zentrum Geesthacht for the collaboration and their contributions.

Furthermore we would like to thank all providers of software and data that was used to produce the presented results (Table 5 in Section 6).

ALADYN-C is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the reference 03F0756C.

An abridged version of this technical report will also be published under the following reference: HUBERT, K. WURPTS, A. & BERKENBRINK, C. (under revision): Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics (ALADYN-C). In: Die Küste.

## 6 Software and Data providers

**Table 5:** Software and data from providers other than NLWKN, that was used to produce the results presented in this report.

<b>Software</b>	<b>Application</b>
Aquaveo SMS 11.1	Preprocessing
ESRI ArcMap 10.5.1	Preprocessing
Mathworks Matlab R2018a	Preprocessing / Postprocessing
SCHISM v5.6.1* (ZHANG et al. 2016)	Simulation
*compiled with Intel icc17.0.4, mvapich2.2 and netcdf-c4.6.2 and run on a workstation with intel xeon processors on a CentOS 7.2 environment	
<b>Data Provider</b>	<b>Data</b>
British Oceanographic Data Centre (BODC)	Tide gauge data for validation
German Meteorological Service (DWD)	Forecast model data (ICON) for validation and boundary conditions
EasyGSH-DB	Bathymetry
EMODnet	Bathymetry
FES Global Tides	Tidal parameters for boundary conditions
German Federal Waterways and Shipping Administration (WSV)	Tide gauge and other hydrological data for validation and boundary conditions
Hamburg Port Authority (HPA)	Tide gauge and other hydrological data for validation and boundary conditions
Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM B.V.)	Values of land subsidence
Rijkswaterstaat	Tide gauge data for validation
Schleswig-Holstein Agency for Coastal Defence, National Park and Marine Conservation (LKN.SH)	Historic and present dyke and coastal lines of Schleswig-Holstein

## 7 References

- ATELJEVICH, E; ZHANG, Y. & NAM, K. (2014): Hydraulic Structures in SELFE. California Department of Water Resources.
- BUND: Fahrwasservertiefungen der Unter- und Außenweser. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Landesverband Bremen. Request: Nov. 2018  
[http://archiv.bund-bremen.net/fileadmin/bundgruppen/bcmslvbremen/naturschutz/weservertiefung/Weservertiefungen\\_UEbersichtstabelle.pdf](http://archiv.bund-bremen.net/fileadmin/bundgruppen/bcmslvbremen/naturschutz/weservertiefung/Weservertiefungen_UEbersichtstabelle.pdf)
- DWD: ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model, Deutscher Wetterdienst, Offenbach

- ELSEBACH, J.; KAISER, R. & NIEMEYER, H. D. (2007): Identifikation von erheblich veränderten Gewässerbereichen in der Tideweser. Untersuchungsbericht der NLWKN Forschungsstelle Küste 05/2007, Norderney (unpublished).
- Easy GSH-DB: Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht (EasyGSH-DB). Request: Apr. 2018. <https://mdi-de.baw.de/easygsh/>
- EMODnet: European Marine Observation Data Network. Request: Jan. 2017. <http://www.emodnet.eu/bathymetry>
- FES: Finite Element Solution Global Tide Model 2014. FES2014 was produced by Noveltis, Legos and CLS Space Oceanography Division and distributed by Aviso, with support from Cnes. Request: Okt. 2017. <http://www.aviso.altimetry.fr/>
- FOKKER, P.A.; VAN LEIJEN, F.J.; ORLIC, B.; VAN DER MAREL, H. & HANSEN, R.F. (2018): Subsidence in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences* 97-3, 129-181, doi:10.1017/njg.2018.9.
- FRANZIUS, L. (1888): Die Korrektion der Unterweser. Bremische Deputation für die Unterweser-korrektion, Bremen, 1888.
- HERRLING, G. & NIEMEYER, H. D. (2007a): Reconstruction of the historical tidal regime of the Ems-Dollard estuary prior to significant human changes by applying mathematical modeling. HARBASINS Report. <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70706>
- HERRLING, G. & NIEMEYER, H. D. (2007b): Long-term Spatial Development of Habitats in the Ems-Dollard Estuary. HARBASINS Report. <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70709>
- HERRLING, G. & NIEMEYER, H. D. (2008): Comparison of the hydrodynamic regime of 1937 and 2005 in the Ems-Dollard estuary by applying mathematical modeling. HARBASINS Report. <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70703>
- HERRLING, G.; ELSEBACH, J. & RITZMANN, A. (2014): Evaluation of Changes in the Tidal Regime of the Ems-Dollard and Lower Weser Estuaries by Mathematical Modelling. *Die Küste*, 81.
- HENSEN, W. (1954): Modellversuche für die untere Ems. Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau. Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover. Hannover.
- HOMEIER, H.; STEPHAN H.-J. & NIEMEYER, H.D. (2010): Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. Berichte der Forschungsstelle Küste. Band 43/2010, Norderney.
- HUBERT, K. WURPTS, A. & BERKENBRINK, C. (2019): Modelling the Impact of Estuarine and Coastal Morphological Changes on Tidal Dynamics in the German Bight. In: E-proceedings of the 38<sup>th</sup> IAHR World Congress September 1-6, 2019, Panama City, doi:10.3850/38WC092019-0799.
- HPA (2017): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet Teil III 2014. Hamburg Port Authority, Hamburg.
- LANG, A.W. (1973): Historisches Seekartenwerk der Deutschen Bucht. Nr 78 Grapow, Jade-, Weser- und Elbmündungen, Berlin 1870. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster.
- LBEG (2018): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2017. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.

- NAM B.V.(2015): Bodemdaling door aardgaswinning. NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe. Status rapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen.
- NAM B.V. (2016): Winningsplan Groningen Gasveld 2016. Request: Okt. 2017.  
[https://www.nam.nl/algemeen/mediatheek-en-downloads/winningsplan-2016/\\_jcr\\_content/par/textimage\\_996696702.stream/1461000524569/1d3f1162f0dbba3f15b8bbc2c7087224fb413ee1/winningsplan-groningen-2016.pdf](https://www.nam.nl/algemeen/mediatheek-en-downloads/winningsplan-2016/_jcr_content/par/textimage_996696702.stream/1461000524569/1d3f1162f0dbba3f15b8bbc2c7087224fb413ee1/winningsplan-groningen-2016.pdf)
- NIEMEYER, H.D. (2000): Prüfung der Sturmflutsicherheit in Brake zwischen Weserlust und Haus Linne. NLÖ Forschungsstelle Küste, Norderney, (unpublished).
- NLWKN (2018): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser- und Emsgebiet 2015. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden.
- PORTAL TIDEWESER: Weseranpassung. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung. Request: Jul. 2019. <https://www.kuestendaten.de/Tideweser/DE/Projekte/Weseranpassung/Weseranpassung-node.html>
- SCHUREMAN, P. (1940): Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Special Publications No. 98. U.S. Department of Commerce, 1940.
- SEE- UND OZEANHANDBÜCHER (1958): Nr. 2006 Nordsee, östlicher Teil. Von Hanstholm bis Terschelling. Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- VERBOOM, G.K.; DE RONDE J.G. & VAN DIJK, R.P. (1991): A fine grid tidal flow and storm surge model of the North Sea. Continent. Shelf Res. Vol. 12.
- WSV: German Federal Waterways and Shipping Administration
- ZHANG, Y.; ATELJEVICH, E.; YU, H-C.; WU, C-H.; & YU, J.C.S. (2015): A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. Ocean Modelling, 85, 16-31.
- ZHANG, Y.; YE, F.; STANEV, E.V.; GRASHORN, S. (2016): Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102, 64-81.