

# Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen

*Andra Ebener<sup>1</sup>, Leon Jänicke<sup>1</sup>, Arne Arns<sup>2</sup>, und Jürgen Jensen<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau, [andra.ebener@uni-siegen.de](mailto:andra.ebener@uni-siegen.de)*

<sup>2</sup> *Universität Rostock, Professur Küstenschutz und Küstendynamik*

## 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 un stetiger Veränderungen (Bruchpunkte) ermöglicht es anschließend, kleinräumige anthropogene Maßnahmen einzelnen festgestellten Entwicklungen 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 Beitrag wird die kombinierte Anwendung von Trend-, Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalysen für die Separierung von gemeinsamen Entwicklungen und die Abschätzung des Beitrags von lokalen Systemänderungen erläutert. Beispielhaft für die Pegel Büsum, Cuxhaven Steubenhöft und Bremerhaven werden Möglichkeiten, Grenzen und Deutung der Ergebnisse erläutert.

## Schlagwörter

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

## Summary

*The tidal dynamics along the German North Sea coast have changed considerably since the middle of the 20<sup>th</sup> century. Various causes have led to the observed developments on different scales. Both large-scale developments (e.g. climate change and sea-level rise) and small-scale effects (e.g. morphological processes and anthropogenic influences) have contributed to these changes. In order to improve the understanding of the causes and their contribution to the observed changes, a method has been developed that allows to separate large-scale effects from the observed data. By combining different common statistical methods, time series are generated from the records of the tidal characteristics MLW, MHW and MTR, which only contain changes due to local and regional impacts. The detailed analysis of these local signals with regard to mean and abrupt changes will then allow to assign small-scale anthropogenic measures to individual developments and to estimate their impact. For this purpose, 21 tide gauge locations with a focus on the German Bight and additional two tide gauges on the Dutch and one tide gauge at the Danish coasts were investigated. This paper explains the combined application of trend, principal component and change point analyses for the separation of large-scale developments and the estimation of the contribution of small-scale system changes. Using the striking exemplary tide gauges Büsum, Cuxhaven Steubenhöft and Bremerhaven, the possibilities, limits and interpretation of the results are explained.*

## Keywords

*change point detection, German Bight, principal component analysis, local effects, North Sea, peak water levels, tidal dynamic, tidal water levels, tidal range, tidal regime, time series analysis*

## 1 Einleitung

Entlang der deutschen Nordseeküste wurden bereits 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) entlang der deutschen Nordseeküste aufgrund von ansteigenden mittleren Hochwasserständen (MThw) feststellen, während die Niedrigwasserstände (MTnw) nahezu unverändert blieben. Während über den Zeitraum von 1884 bis 1983 die MThw im Mittel um  $0,25 \pm 0,04$  m pro 100 Jahre angestiegen sind, hat sich dieser Anstieg deutlich beschleunigt und die MThw haben sich zwischen 1959 und 1983 bereits um  $0,64 \pm 0,15$  m pro 100 Jahre erhöht (Jensen und Führböter 1985). Weitere Untersuchungen beschreiben 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 konnten die Veränderungen der Tidedynamik aber auch anhand deren Eintrittszeiten sowie den Parametern Ebbe- und Flutdauer festgestellt werden (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).

Viele der einzelnen potentiellen Ursachen für die Tideänderungen sind gut verstanden und können qualitativ beschrieben werden. So können z. B. die Auswirkungen von Fahrrinnenvertiefungen in Ästuaren auf die Tideverhältnisse, in Form einer Erhöhung der Tidedynamik, oder die Veränderung durch den Bau von Tidewehren oder Sturmflutsperrwerken beschrieben werden (Malcherek 2010). Mithilfe von statistischen Methoden oder Modelluntersuchungen lassen sich zudem einzelne großräumige Einflüsse wie der Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf die Tidewasserstände in Küstenregionen abschätzen. Trotz der Möglichkeit, grundlegende Effekte zu beschreiben, lassen sich die einzelnen Auswirkungen aufgrund der vielfältigen, teils nicht-linearen Wechselwirkungen mit starker räumlicher und zeitlicher Variabilität vorhandener Einwirkungen nur schwer voneinander trennen (vgl. z. B. Idier et al. 2019, Arns et al. 2020). Zudem bleiben die Veränderungen aufgrund von wasserbaulichen Maßnahmen bpsw. in Modelluntersuchungen häufig unberücksichtigt (Weiße und Meinke 2017). Die Trennung der beteiligten Prozesse ist somit noch immer eine wesentliche Herausforderung, und eine umfassende Antwort auf die Frage, inwieweit einzelne bauliche Veränderungen an der Küste zum Wandel der Tidedynamik beigetragen haben, ist noch nicht gefunden. Die durchgeführten Analysen und Ergebnisse sollen zur Beantwortung dieser beiden Fragestellungen beitragen.

Angesichts der Frage, welche groß- und kleinskaligen Prozesse in welchem Maße zu den festgestellten Veränderungen beigetragen haben, wurde im Teilprojekt ALADYN-A (Förderkennzeichen: 03F0756A) ein Ansatz entwickelt, der eine separate Untersuchung von großräumiger und lokaler Entwicklung ermöglicht. In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Trennung von gemeinsamen Anteilen der Entwicklungen und lokalen Veränderungen der Tidedynamik, insbesondere des  $M_{Thb}$  als Differenz von  $M_{Tnw}$  und  $M_{Thw}$ , mithilfe verschiedener statistischer Verfahren vorgestellt. Zunächst wurden dazu die Änderungen der Tidewasserstände und des  $M_{Thb}$  in der Deutschen Bucht und an Pegelstandorten an der niederländischen und dänischen Küste analysiert. Aus den Wasserstandsaufzeichnungen von insgesamt 21 Tidepegeln in einem Zeitraum von 1935 bis 2015 wurden Zeitreihen des  $M_{Thb}$  abgeleitet. Veränderungen der mittleren Tidekennwerte wurden mittels linearer Trendschätzung, Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalysen untersucht. Darüber hinaus wird die Hauptkomponentenanalyse verwendet, um gemeinsame Entwicklungen 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 weiterentwickelt und anstelle der Untersuchung von ausschließlich gemeinsamen Veränderungen verwendet, um lokale Entwicklungen detailliert analysieren zu können. Dazu wurden die ersten Hauptkomponenten, die beim  $M_{Thw}$  und  $M_{Thb}$  bereits mehr als 90 % und beim  $M_{Tnw}$  über 70 % der Gesamtvarianz beschreiben, 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. Zur Veranschaulichung der entwickelten Methodik werden drei Beispiele vorgestellt, die sowohl Möglichkeiten als auch Grenzen aufzeigen.

## 2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Für die Untersuchungen der Veränderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht stehen Zeitreihen der Tidewasserstände sowie des MThb 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 Zeitreihenlänge nicht mindestens einem Nodaltidezyklus (18,61 Jahre, vgl. Kapitel 3.1) umfasst und sie daher nur eingeschränkt nutzbar für Trenduntersuchungen sind.

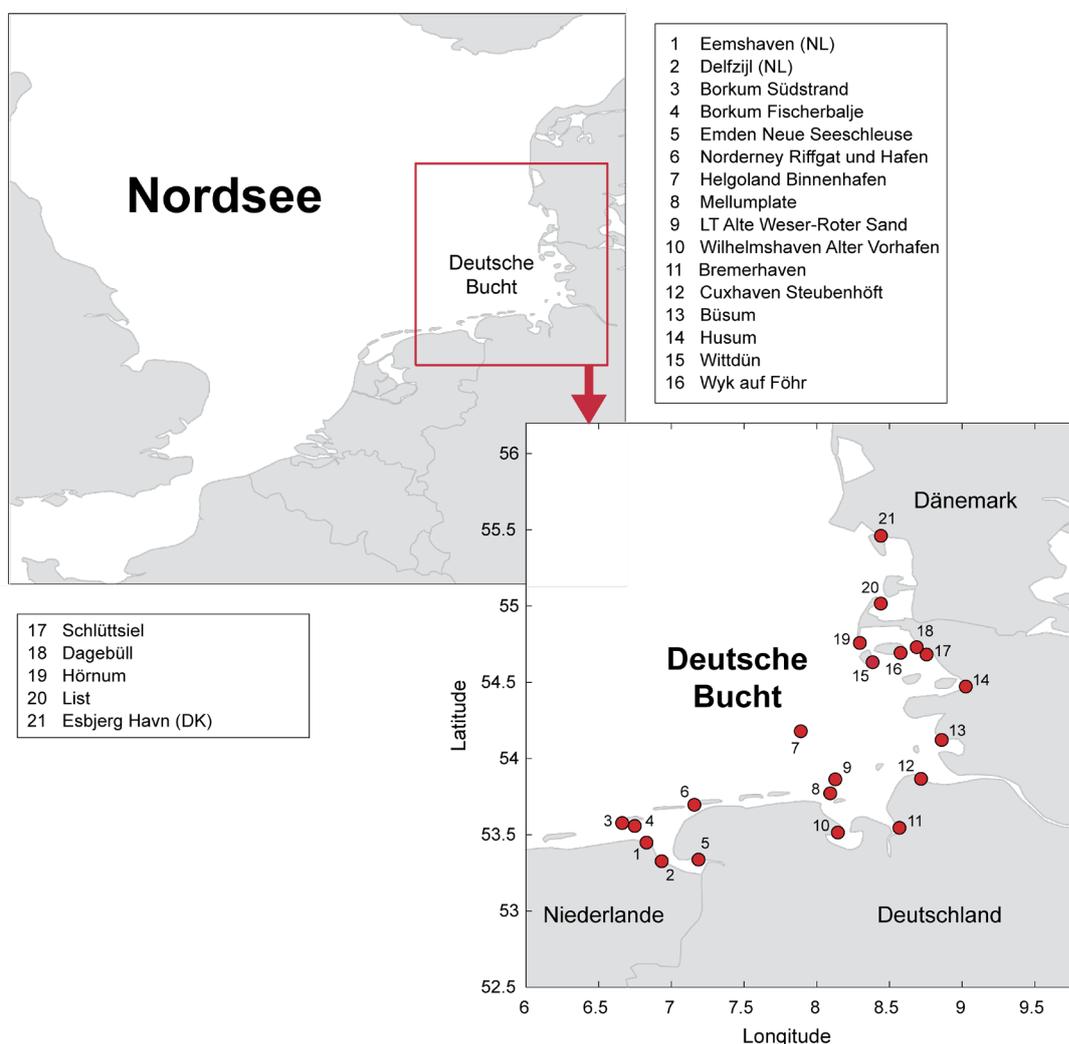


Abbildung 1: Verwendete Pegelstandorte innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die für die Pegelstandorte verfügbaren Datensätze wurden zu Beginn akquiriert und von der Wasserstraßen- 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. Die 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 Jahren bzw. 4-mal Nodaltidezyklus) gewählt. Innerhalb dieses Zeitraums werden die eingetretenen Ver­änderungen analysiert.

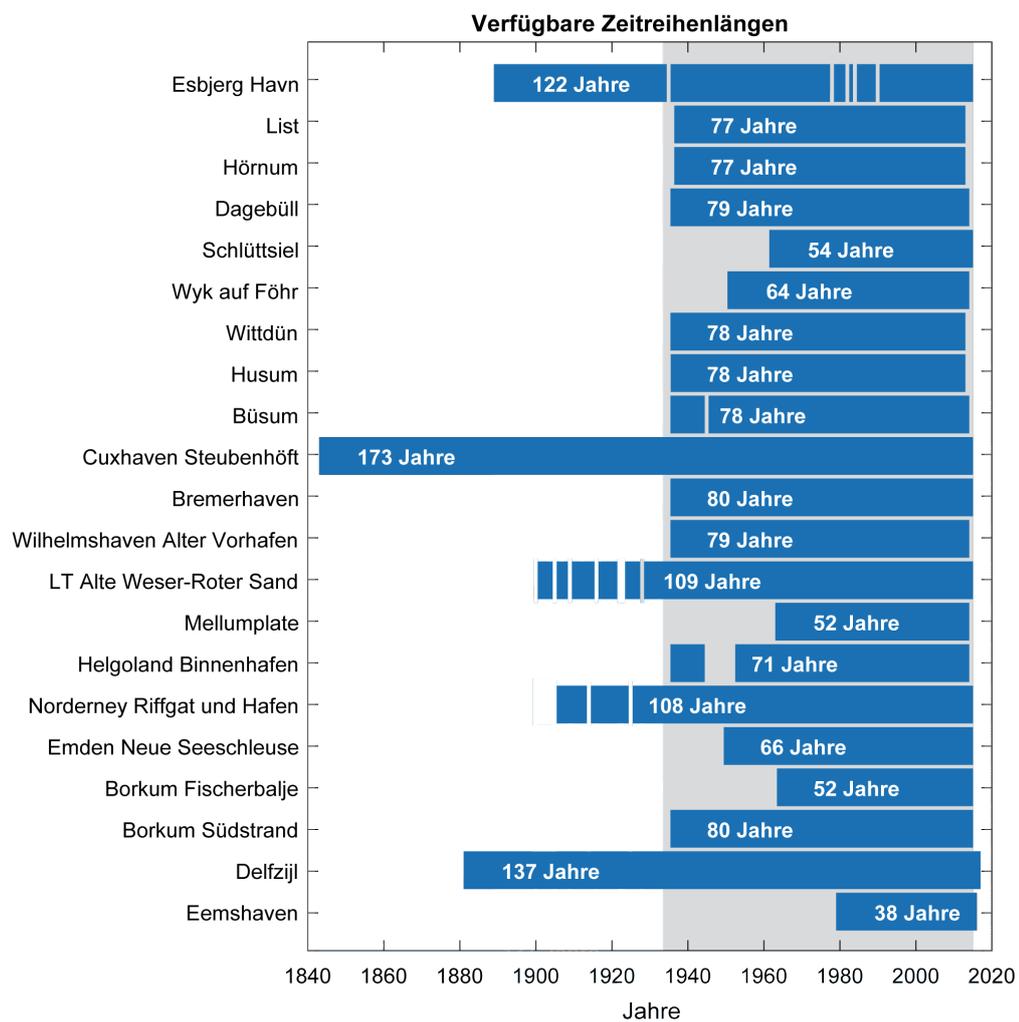


Abbildung 2: Daten­verfügbarkeit der jährlichen Tidekennwerte im Untersuchungsgebiet; in grau hinterlegt: Zeitraum mit hoher Daten­verfügbarkeit, im weiteren Verlauf verwendet als Untersuchungszeitraum der Hauptkomponenten- und Bruchpunktanalyse.

### 3 Methodik

Aus den zur Verfügung stehenden Zeit­reihen der amtlichen Scheitelwasserstände wurden zunächst die jährlichen Mittelwerte  $M_{Thw}$  und  $M_{Tnw}$  gebildet. Zusätzlich wurden Einzelwerte der Tidehubzeit­reihen nach der Definition der DIN 4049-3 ermittelt. Daraus

wiederum wurden Monatsmittel generiert und die MThb-Zeitreihen gebildet. Für alle in diesem Artikel vorgestellten Analysen und Ergebnisse wurden die jährlichen Mittelwerte verwendet.

Im Folgenden wird die im Rahmen des Projektes ALADYN 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 Tideparameter 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 unstetige Änderungen der Tidedynamik zu erkennen (im Folgenden auch als Bruchpunkte bezeichnet)
6. Vergleich und Diskussion der erfassten unstetigen Änderungen, z. B. mit historischen Baumaßnahmen
7. Beschreibung der Auswirkungen von den potentiellen Ursachen der festgestellten unstetigen Änderungen (Charakteristika der Zeitreihen vor und nach den festgestellten Bruchpunkten)

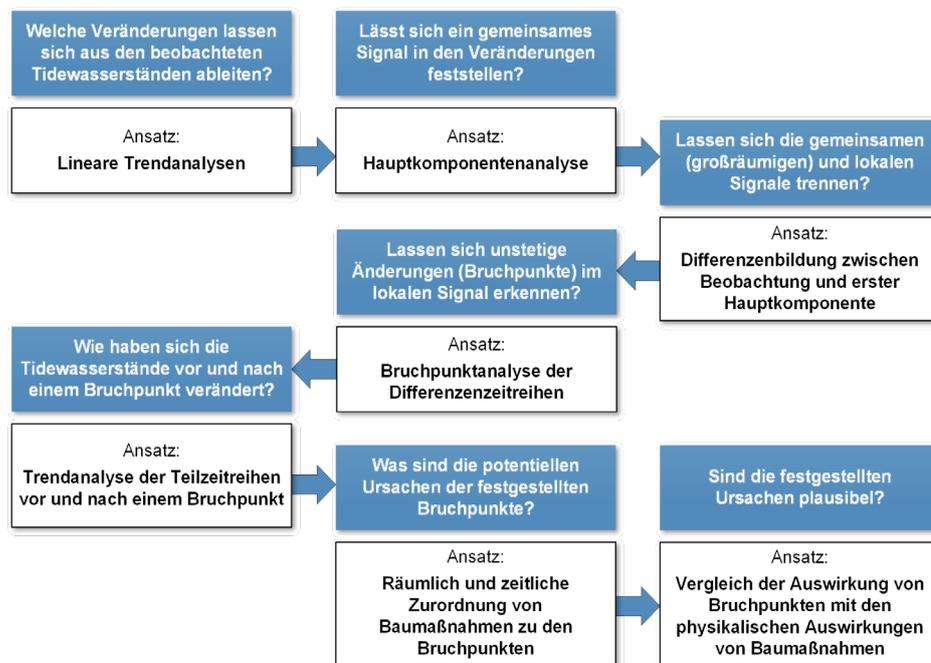


Abbildung 3: Schematische Darstellung der entwickelten Methodik zur Separierung von gemeinsamen und lokalen Veränderungen und der detaillierten Untersuchung von lokalen Effekten.

Alle durchgeführten Analysen werden im Folgenden näher erläutert.

### 3.1 Trendanalysen

Um die mittleren Änderungen (stetige 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.

Zunächst wurden 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. < 50 Jahre), 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. 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 sind dem Abschlussbericht (Ebener et al. 2020) zu entnehmen, in diesem Beitrag beziehen sich die Trendanalysen auf den längsten verfügbaren Zeitraum von 1940 bis 2013. Zu beachten ist im Folgenden, dass für den Untersuchungszeitraum grundsätzlich der Zeitraum 1935 bis 2015 gewählt wurde, dieser jedoch nur für die Trendanalyse aufgrund der Berücksichtigung der Nodaltide sowie der Datenverfügbarkeit auf den Zeitraum 1940 bis 2013 gekürzt werden musste.

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. Der Koeffizient  $a_0$  beschreibt den Wert  $y$  für den Fall, dass  $x$  den Wert Null annimmt, d. h. bei  $a_0$  schneidet die Trendgerade die  $y$ -Achse (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 sowie die zugehörigen Standardfehler 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. Zur Überprüfung der ermittelten Trends auf Signifikanz wurde der Mann-Kendall-Test durchgeführt (vgl. z. B. Salas 1993) und dafür ein 95 %iges Signifikanzniveau gewählt. Folglich wird ein linearer Trend als signifikant bezeichnet, wenn dieser mit einem 95 %igen Konfidenzintervall von Null abweicht.

### 3.2 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. (2021) und wird im Rahmen dieses Projekts zur Schließung von zeitlichen Lücken unseres Datensatzes innerhalb des Untersuchungszeitraums 1935 bis 2015 verwendet.

### 3.3 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, bei dem Beobachtungen durch mehrere

quantitative 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, PCs*) 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  $c_{1i}$  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:

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

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 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 wider. 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. (2021) einbezogen. Jänicke et al. (2021) stellen fest, dass die erste Hauptkomponente aus einem nordseeweiten Pegelkollektiv das Verhalten des MThb in der Deutschen Bucht beschreibt, während die zweite Hauptkomponente die Entwicklung des MThb 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 Abbildung 4 dargestellt, wurde eine hohes Bestimmtheitsmaß (hohe quadrierte Korrelation) der ersten Hauptkomponenten mit  $R^2 [PC1, PC1_{\text{Jänicke et al.}}] = 0,91$  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.

(2021) bestimmte zweite großräumige Signal, repräsentiert durch die PC2, keinem großräumig gemeinsamen Signal des MThb in der Deutschen Bucht entspricht. Dies entspricht unserer Annahme, dass ab der zweiten PC lokale Entwicklungen abgebildet werden und die Deutsche Bucht als ein eigenständiges System betrachtet werden kann.

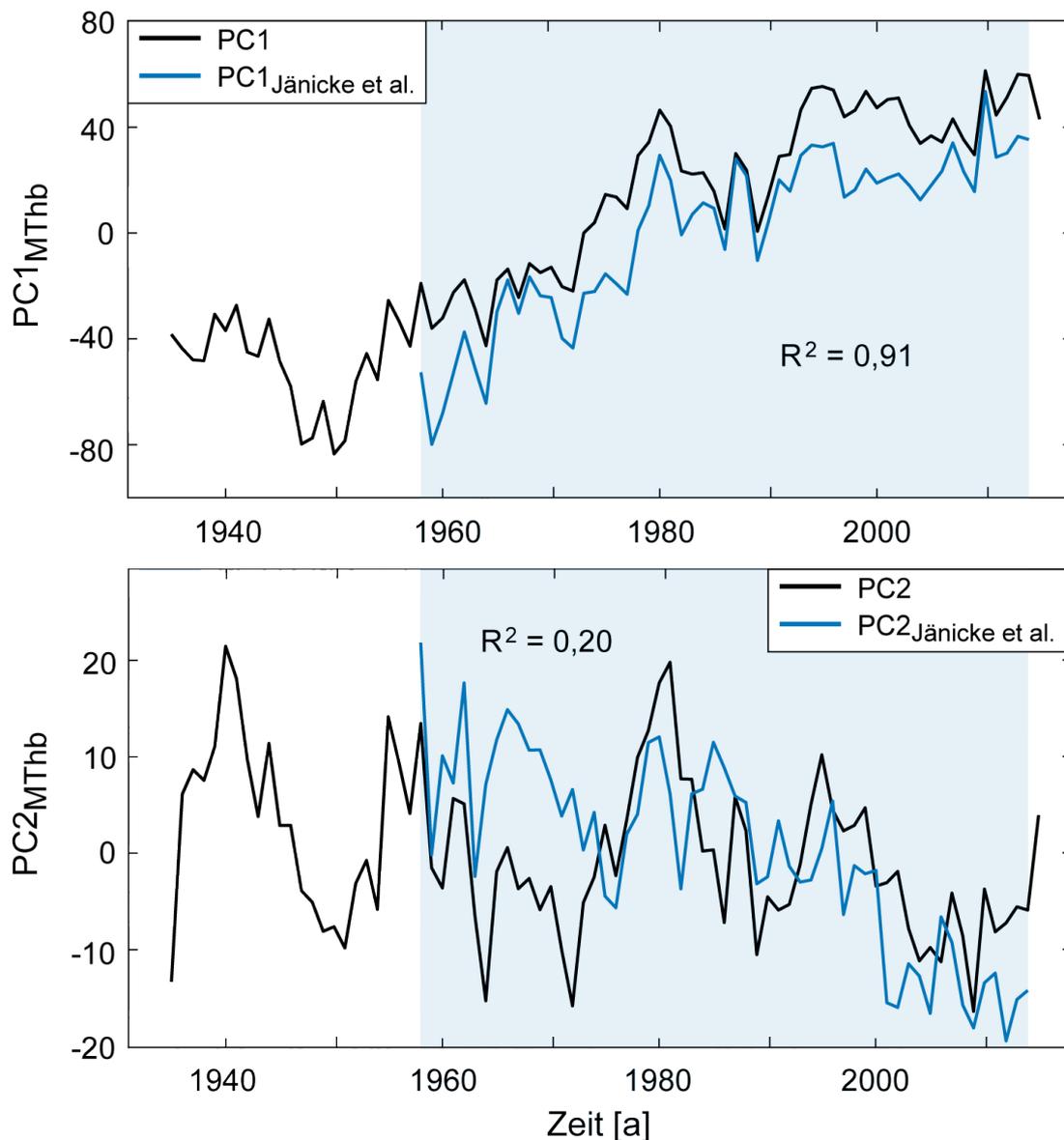


Abbildung 4: Zeitreihen der ersten beiden Hauptkomponenten, die aus den MThb-Zeitreihen der für diese Studien verwendeten Daten (schwarze Linien) und dem Datensatz (blaue Linien) von Jänicke et al. (2021) innerhalb der gemeinsamen Datenverfügbarkeit von 1958 bis 2014 errechnet wurden, sowie die Korrelation der jeweiligen ersten beiden Hauptkomponenten.

### 3.4 Extraktion des gemeinsamen Signals

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 abbildbare 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<sub>res</sub>) und MThw (MThw<sub>res</sub>) gebildet.

$$MThb_{res,i} = MThb_{obs,i} - PC1_{MThb,i} \quad (4)$$

mit:

i:	Pegelnummer
MThb <sub>res,i</sub> :	Differenzenzeitreihe des MThb ( <i>residual time series</i> ) [cm]
MThb <sub>obs,i</sub> :	Beobachtungszeitreihe des MThb ( <i>observed</i> ) [cm]
PC1 <sub>MThb,i</sub> :	Rekonstruktion auf Basis der PC1 [cm]

### 3.5 Bruchpunktanalyse

Weist eine Zeitreihe Inhomogenitäten auf, so kann durch die Bruchpunktanalyse der Zeitpunkt (Bruchpunkt) bestimmt werden, zu dem sich das Verhalten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit verändert hat (Straub 2004). In dieser Arbeit werden alle abrupten wesentlichen Änderungen des Trends, des Mittelwerts oder der Varianz, die als Bruchpunkt sichtbar werden, als unstetige Veränderungen bezeichnet. In diesem Fall liefert ein Bruchpunkt ein Indiz für eine kurzfristige Veränderung des Tidegeschehens. Mithilfe der Bruchpunktanalyse können die Zeitpunkte der Veränderung in einer gemessenen Zeitreihe detektiert werden, um anschließend deren Ursachen und Auswirkungen zu diskutieren. Instationaritäten in Wasserstandszeitreihen können vielfältige Ursachen und Ausprägungen aufweisen. Unstetige Änderungen 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 des *Bayesian change point algorithm* von Ruggieri (2012) können Unsicherheiten sowohl für die Anzahl als auch für die Lage der Bruchpunkte (BP) mit einem probabilistischen Ansatz geschätzt werden. Der Algorithmus ermöglicht es, 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* Bruchpunkte erkennt, die eigentlich nicht in der Zeitreihe enthalten sind (Ruggieri 2012). Wie bereits erwähnt, wird das Verfahren auf die Differenzenzeitreihen der Tideparameter nach Gleichung (4) angewendet. Um die Vergleichbarkeit zwischen den beobachteten Entwicklungen und den Ergebnissen der Bruchpunktanalyse gewährleisten zu können, wird die Bruchpunktanalyse nur auf Zeitreihen innerhalb des Untersuchungszeitraums 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 unstetige Änderungen zu. Betrachtet man hingegen die Differenzzeitreihe (vgl. Abbildung 5.b), lässt sich eine unstetige Änderung in der Mitte der 1970er Jahre vermuten. Zudem wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,6 % errechnet, dass die Differenzzeitreihe 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.

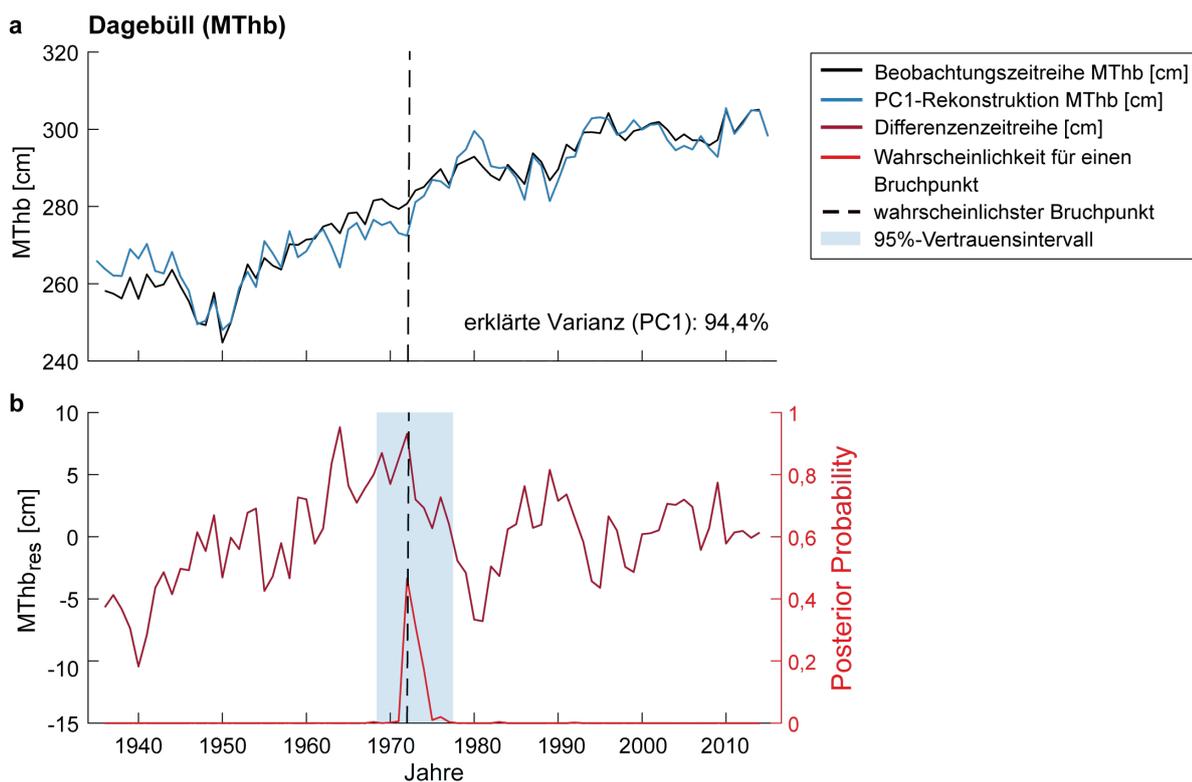


Abbildung 5: Darstellung der Bruchpunktanalyse mit vorausgegangener Hauptkomponentenanalyse am Beispiel des MThb am Pegel Dagebüll; (a) Die schwarze Linie beschreibt die Beobachtungszeitreihe MThb und die blaue Linie entspricht der Rekonstruktion auf Grundlage der ersten PC (b) Die dunkelrote Linie repräsentiert die Differenzzeitreihe. Der Wert der (roten) Kurve entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass zu dem jeweiligen Zeitpunkt ein Bruchpunkt vorhanden ist.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Mittlere Änderungen der Tidedynamik

Um die Änderungen der Tidedynamik zu beschreiben, wurden zunächst die linearen Trends der Beobachtungszeitreihen berechnet. Um die Bedeutung und die Unsicherheiten der berechneten linearen Trends zu bestimmen, wurden zusätzlich die Standardfehler (SE) berechnet. Die Entwicklung des MThb 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. Die Erhöhung des MThb aufgrund der zunehmenden Differenz zwischen den mittleren Tidewasserständen ist beispielhaft am Pegel Dagebüll (Abbildung 6, links) dargestellt. Die nächste Beobachtung lässt sich anhand des Beispiels Wilhelmshaven Alter Vorhafen (Abbildung 6, Mitte) beschreiben. Hier ist keine signifikante Veränderung im MTnw aufgetreten, während das MThw angestiegen ist. Auch diese Konstellation führt zu einem Anstieg des MThb, jedoch mit geringerer Ausprägung als im ersten Fall, da hier die ansteigende Differenz der Tidewasserstände lediglich aus dem steigenden Tidehochwasser herrührt. Der dritte Fall konnte lediglich am Pegel Büsum (Abbildung 6, rechts) beobachtet werden und enthält keine mittlere Änderung des MThb aufgrund des simultanen Anstiegs der Tidewasserstände und folglich keine Veränderung bezüglich deren Differenz.

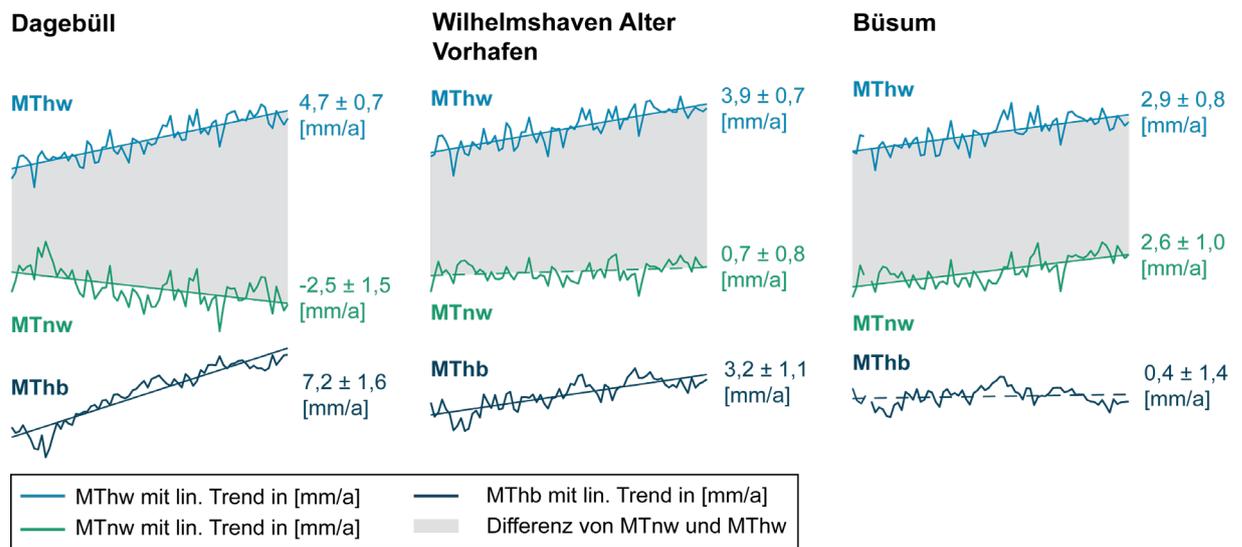


Abbildung 6: Exemplarische Entwicklung von MThw (hellblau) und MTnw (grün) sowie des MThb (dunkelblau) an den Tidepegeln Büsum, Dagebüll und Wilhelmshaven Alter Vorhafen in der Deutschen Bucht. Lineare Trends im Zeitraum von 1940 bis 2013 in [mm/a]. Durchgängige Linien: signifikante Trends; gestrichelte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

Die Vergleichbarkeit der linearen Trends und der zugehörigen Unsicherheiten ist durch die unterschiedliche Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Aus diesem Grund wurde die Trendanalyse auf den gemeinsamen Zeitraum 1940 bis 2013 angewendet (siehe Tabelle 1). Während sich das MThw im gesamten Untersuchungsgebiet signifikant um 2,2 bis 4,9 mm pro Jahr erhöht hat, konnten steigende sowie abnehmende und stagnierende MTnw während des Untersuchungszeitraums beobachtet werden. Ähnlich wie bei der Entwicklung des MThw sind auch die MThb zwischen 1,3 und 7,2 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- $\sigma$ -Standardfehler der Tideparameter im Untersuchungsgebiet innerhalb des gemeinsamen Zeitraums 1940 bis 2013 in [mm/a]; rot: negative lineare Trends, dunkelgrau: nicht signifikanter linearer Trend.

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 Südstrand	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 (siehe 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  $2,9 \pm 0,6$  mm/a und des MThb von  $2,5 \pm 1,1$  mm/a und an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste einen größeren mittleren Anstieg des MThw von  $4,0 \pm 0,7$  mm/a 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	MThb
	Ø Trend [mm/a]	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

## 4.2 Identifizierung des gemeinsamen Signals

Mithilfe der PCA werden die ersten beiden gemeinsamen Hauptkomponenten der Tidekennwerte aller zur Verfügung stehenden Pegelzeitreihen bestimmt. Untersucht wurden die jährlichen Mittelwerte MTnw, MThw und MThb. Abbildung 7 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.

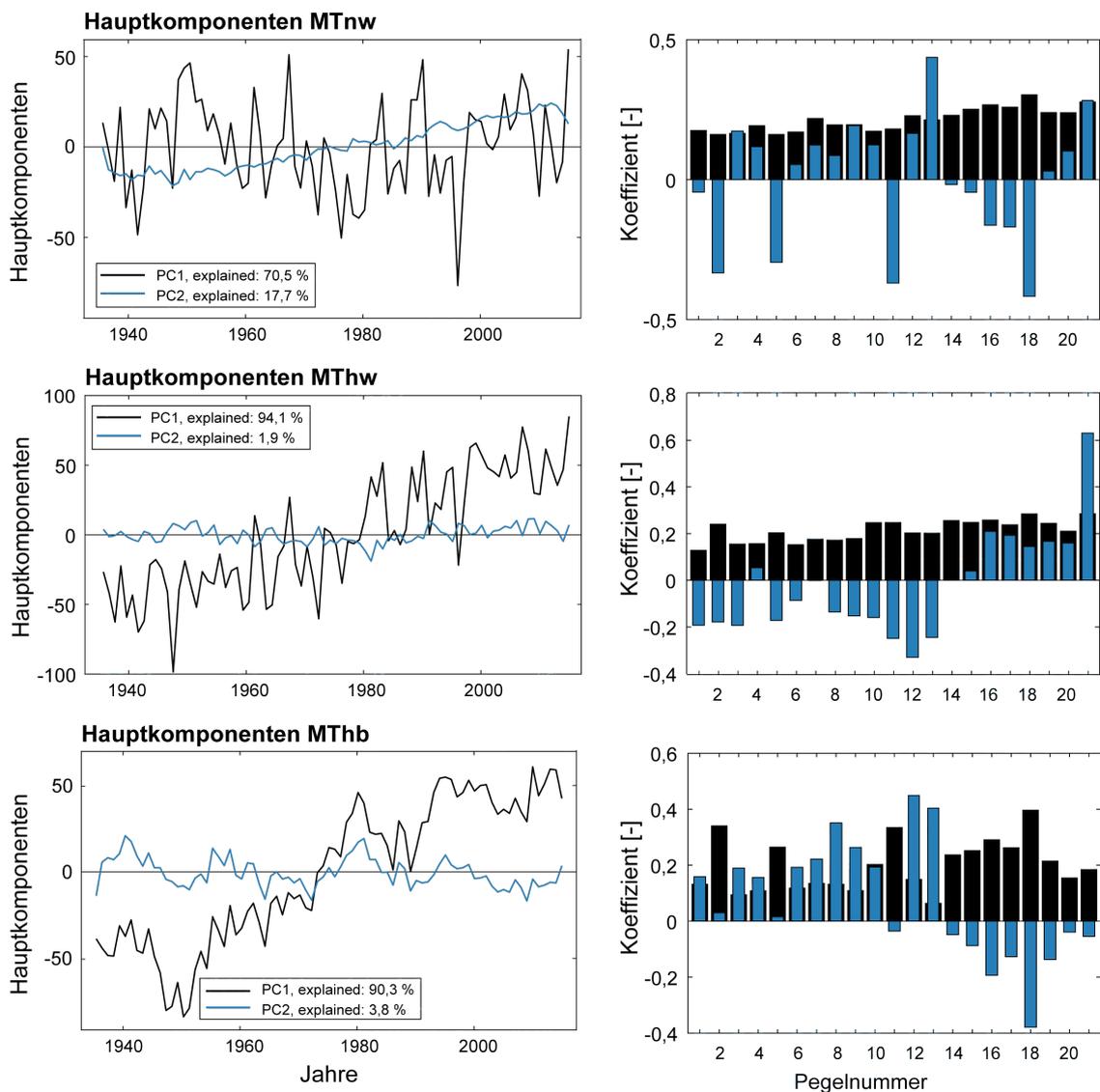


Abbildung 7: Linke Spalte: Die ersten beiden Hauptkomponenten (PC) für die MTnw-, MThw- und MThb-Zeitreihe aller betrachteten Tidepegel; rechte Spalte: Koeffizienten der ersten beiden PCs aller betrachteten Tidepegel, schwarze Balken: Koeffizienten PC1 und blaue Balken: Koeffizienten PC2.

Die Koeffizienten der PC1 des MTnw fallen ausnahmslos positiv aus und weisen lediglich eine leicht variierende Ausprägung auf. 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 auch in den Beobachtungszeitreihen kein gemeinsamer linearer Trend im MTnw 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 PC2 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		
	MTnw	MThw	MThb
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 Hauptkomponente 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 den 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 verursachen hingegen eine Dämpfung dieses Anstiegs. An der Küste Schleswig-Holsteins wiederum wird der gesamtweitliche 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.

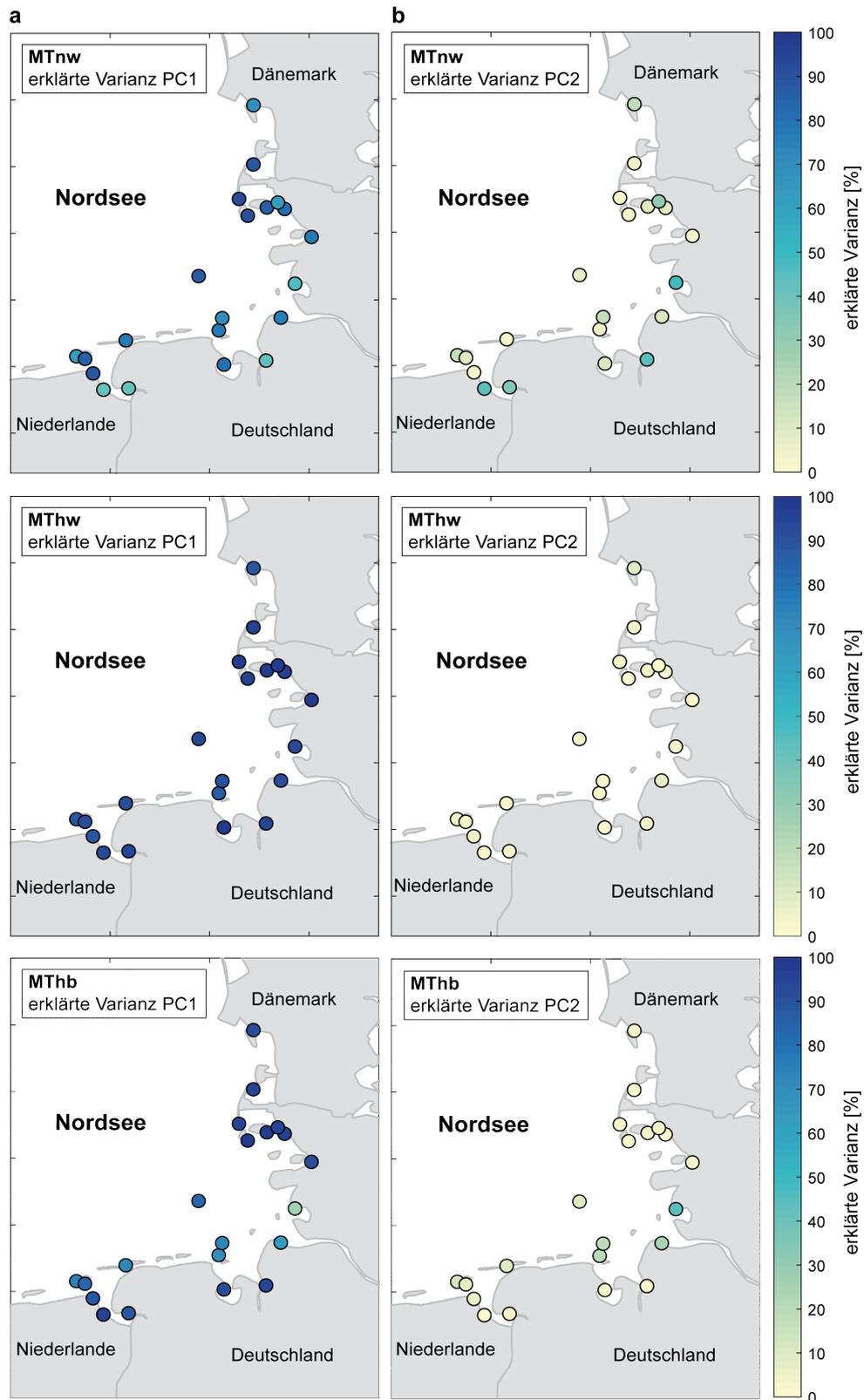


Abbildung 8: Räumliche Verteilung der erklärten Varianz der ersten beiden Hauptkomponenten des MTnw, MThw und MThb entlang der Nordseeküste. (a) Erklärte Varianz in [%] der PC1 und (b) erklärte Varianz in [%] der PC2 an den untersuchten Pegelstandorten.

In Abbildung 8 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 Untersuchungsgebiet verläuft. Während rund 94 % der Variabilität bereits durch die erste Hauptkomponente abgebildet wird, werden nur noch etwa 2 % 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 haben und diese Abweichungen vom gemeinsamen Signal eher lokal beschränkt sind.

### 4.3 Anwendungsbeispiele

Veränderungen im MThb lassen sich bereits mithilfe der Entwicklung der MThw und MTnw beschreiben. Aus diesem Grund werden nachfolgend für die Pegel Büsum, Cuxhaven Steubenhöft und Bremerhaven exemplarisch die Entwicklungen und Bruchpunkte aller drei untersuchten Tideparameter (MTnw, MThw und MThb) sowie deren Differenzzeitreihen gemeinsam betrachtet. Weiterhin wird der Einfluss von detektierten Bruchpunkten untersucht. Hierzu wurden zusätzlich Trendanalysen der Zeitreihensegmente vor und nach einem signifikanten Bruchpunkt durchgeführt. Abschließend werden potentielle Ursachen der Bruchpunkte diskutiert und physikalische Begründungen herausgearbeitet. Eine wesentliche Hilfestellung bei der Zuordnung von detektierten Bruchpunkten zu durchgeführten Baumaßnahmen liefert der im Rahmen des Projekts angefertigte Baumaßnahmenkatalog vom Projektpartner LKN.SH (Lehmann 2018). Hier wurde eine Zusammenstellung und Katalogisierung von für das Projekt signifikanten Baumaßnahmen an der SH-Küste erstellt. Zusätzlich wurden die sich durch signifikante Bruchpunkte identifizierten Teilzeitreihen hinsichtlich linearer Trends untersucht. Im Weiteren aufgeführt und auch in der graphischen Darstellung der Zeitreihen abgebildet sind nur signifikante lineare Trends der Teilzeitreihen (Definition Signifikanz vgl. Kapitel 3.1). Teilzeitreihen ohne signifikante mittlere Änderung werden nicht dargestellt. Die detaillierten Untersuchungen und Auswertungen der anderen verwendeten Pegelstandorte sind in ausführlicher Form dem Abschlussbericht (Ebener et al. 2020) zu entnehmen.

#### 4.3.1 Büsum

Der Pegel Büsum im Norden der Meldorfer Bucht weist als einziger Tidepegel im Untersuchungsgebiet keinen signifikanten Trend im MThb über den gesamten Untersuchungszeitraum auf (vgl. Abbildung 9). Die Ursache ist, dass beide mittleren Tidewasserstände eine Zunahme in ähnlicher Größenordnung erfahren haben und sich die Differenz der beiden Größen folglich nicht wesentlich erhöht hat. 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 Differenzzeitreihe 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 sinkt das MThb in den Folgejahren des Bruchpunkts bis zum Ende des Untersuchungszeitraums 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 Differenzzeitreihen 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 1990 für das MThw und etwas früher um 1970 im MTnw. Im Fall beider Tidewasserstände liegen die Peaks, wenn auch nur geringfügig, unterhalb der 95%igen Vertrauensgrenze. Dennoch können diese Ausschläge ein Indiz auf eine lokale Beeinflussung sein, und die erhöhte Wahrscheinlichkeit in den 1970er Jahren unterstreicht das Vorhandensein des Bruchpunkts im MThb im gleichen Zeitraum. Potentieller Auslöser dieser Veränderung 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 Speicherkoooge 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.

Trotz der erhöhten Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt in den 1990er Jahren im MThw kann diese nicht als signifikanter Bruchpunkt gedeutet werden. Dennoch wurde nach einer möglichen Ursache für den Peak gesucht. Es konnte jedoch keine Baumaßnahme oder ähnliches ermittelt werden, die sich dem Peak durch räumliche und zeitliche Nähe zuordnen ließe und anschließend durch die beobachtete Entwicklung nach dem Peak plausibilisiert werden könnte. Dieses Beispiel zeigt allerdings auch die Grenzen des Verfahrens auf. So können in den Zeitreihen Unstetigkeiten enthalten sein, für die keine konkreten Ursachen identifiziert werden können. Grund dafür kann z. B. eine mangelhafte Informationsgrundlage zu durchgeführten Baumaßnahmen sein. Zudem besteht die Möglichkeit, dass auftretende Bruchpunkte nicht zeitgleich mit den durchgeführten Maßnahmen eintreten. Aber auch andere Ursachen lassen sich nicht ausschließen, die im Rahmen der durchgeführten Analysen nicht detailliert untersucht und plausibilisiert werden konnten. Dazu können u. a. morphologische Prozesse und Entwicklungen gehören, deren Kippunkt erst Jahre später erreicht wird. Insbesondere in einem solch komplexen hydraulischen System wie dem der Nordsee kann nicht davon ausgegangen werden, dass kontinuierliche Änderungen von groß- und kleinräumigen Randbedingungen auch immer direkte Systemreaktionen 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 stetig und unterliegen zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen. Aus diesem Grund können ggf. küstenhydrologische Auswirkungen sichtbar werden, denen keine konkrete Ursache durch offensichtliche geographische oder zeitliche Nähe zugeordnet werden kann.

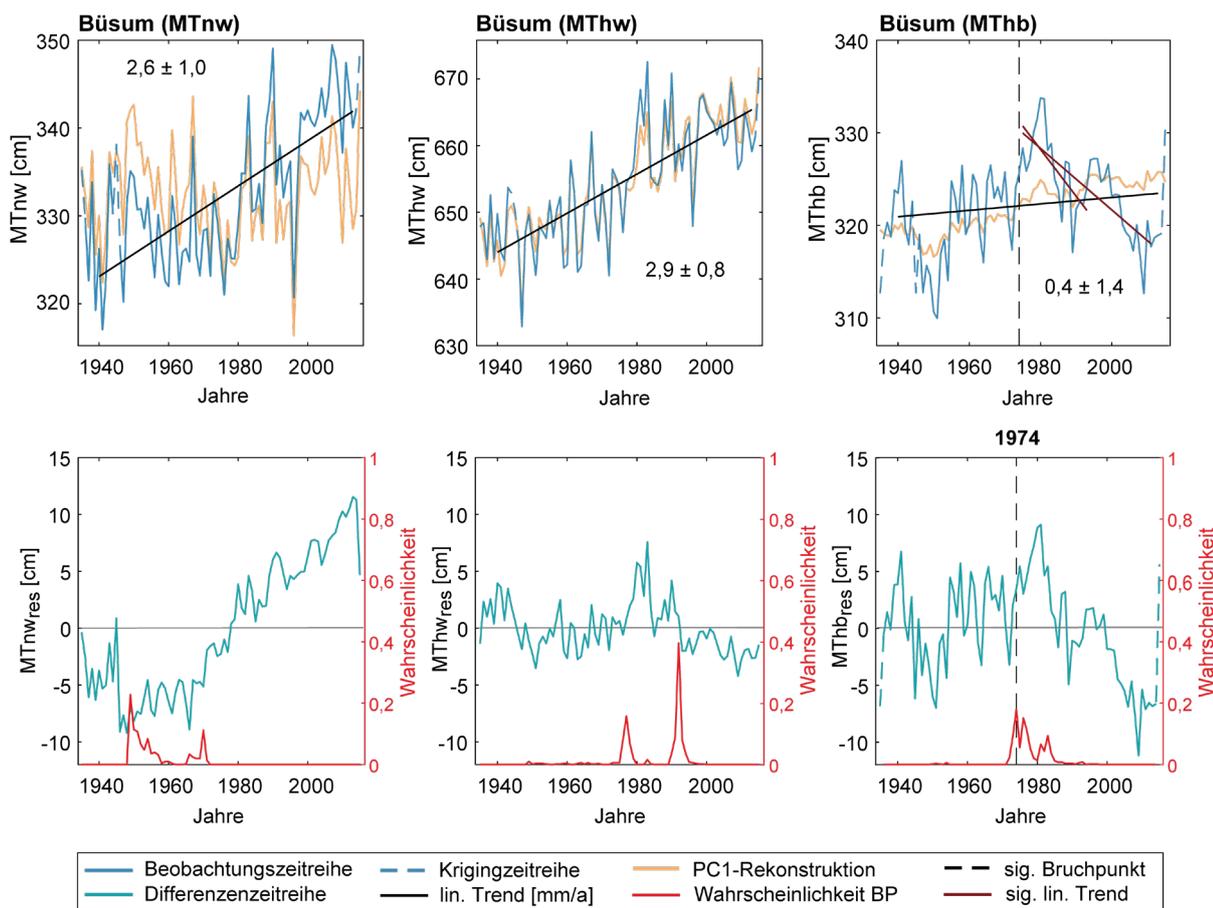


Abbildung 9: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Büsum.

### 4.3.2 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 10 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 unstetige 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, da 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.

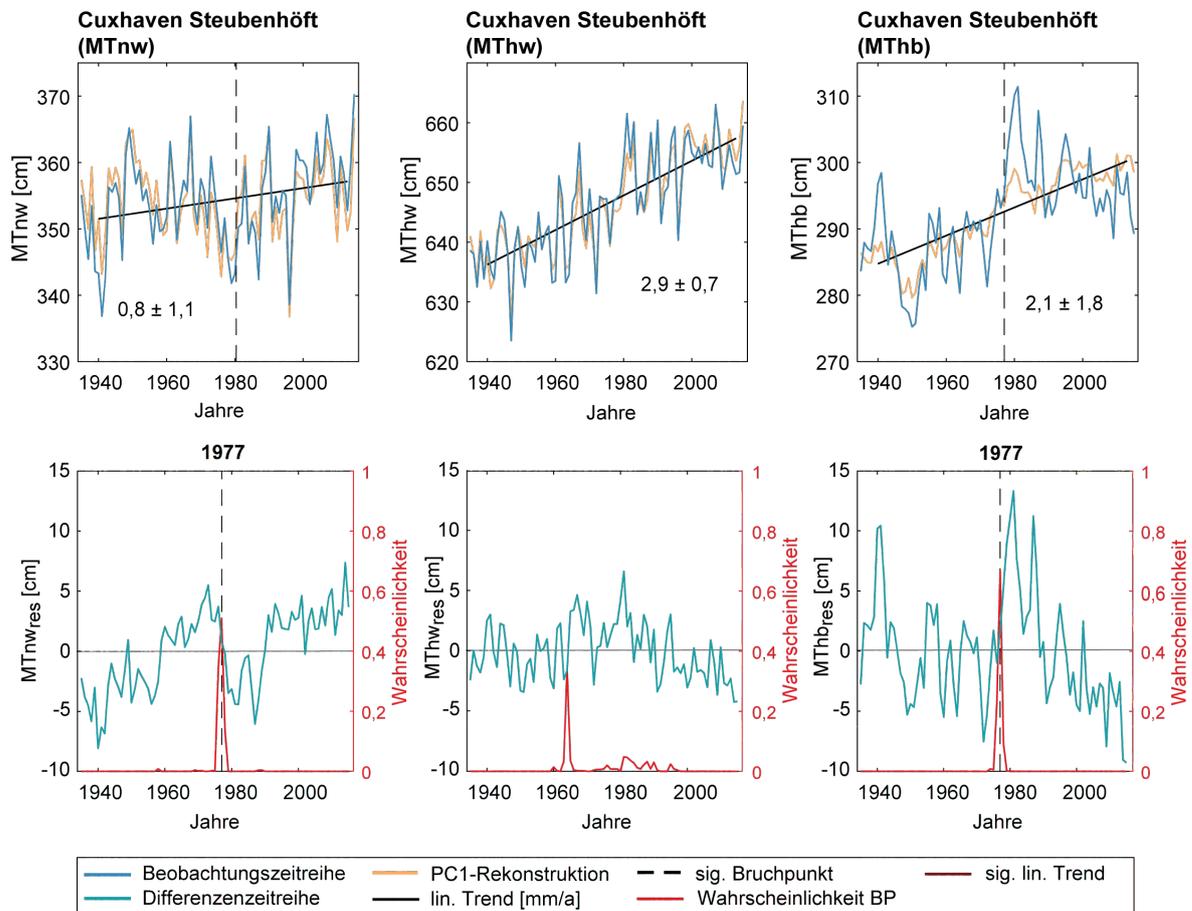


Abbildung 10: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft.

Als potentielle Ursache der un stetigen Veränderung in den späten 1970er Jahren des MTnw und MThb ist der Ausbau der Unterelbe von 1974 bis 1978 zu nennen (FGG Elbe 2007). Grundsätzliche Effekte von Vertiefungsmaßnahmen in Ästuaren sind abfallende MTnw und ansteigende MThw, somit in Folge auch erhöhte MThb. Dabei verursacht eine Vertiefung eine geringere Dämpfung der einschwingenden Tidewelle und es wird mehr Energie in das Ästuar transportiert. Die Absenkung des MTnw ist dabei meist wesentlich größer als der simultane Anstieg des MThw, da die ausbaubedingte relative Veränderung im MTnw i. d. R. wesentlich größer ist als im Fall des MThw (vgl. u. a. Niemeyer 1999, Malcherek 2010). Abbildung 10 zeigt, dass das Absinken des Niedrigwassers einen signifikanten Bruchpunkt zur Folge hat; im MThw lässt sich dies jedoch nicht als statistisch relevante un stetige Änderung feststellen.

### 4.3.3 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 11). 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 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.

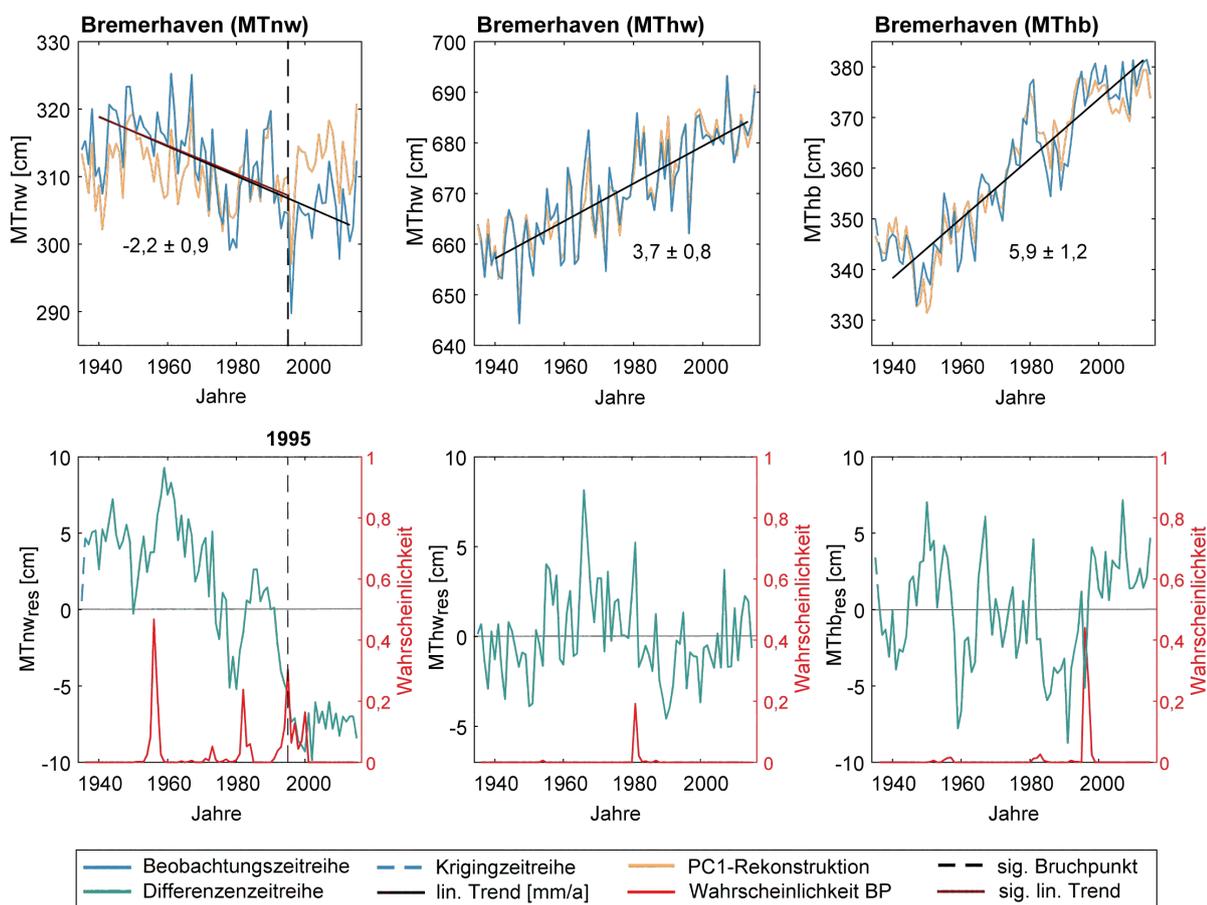


Abbildung 11: Kombinierte Trend- und Bruchpunktanalyse der Beobachtungs- und Differenzenzeitreihen der Tideparameter MTnw, MThw und MThb am Pegel Bremerhaven.

Betrachtet man die Entwicklung des groß- und des kleinräumigen Signals vor und nach dieser un stetigen 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 un stetige 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%igen Vertrauensgrenze nicht als signifikanter Bruchpunkt betrachtet werden kann. 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 un stetigen Änderung des MTnw im Jahr 1995 lässt sich zeitlich und räumlich der SKN-14 m Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998 bis 1999 zuordnen, bei dem die Außenweser sowohl vertieft als auch verbreitert wurde und das Buhnensystem 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 solcher Strombaumaßnahmen plausibilisieren. Eine reine Vertiefung von Ästuaren führt zu einer geringeren Dämpfung der in ein Ästuar einschwingenden Tidewelle. Die Folge ist eine Zunahme des MThb, der insbesondere durch eine starke Absenkung des MTnw hervorgerufen wird. Aber auch ansteigende MThw sind eine wesentliche Folge von Fahrrinnenvertiefungen (vgl. u. a. Niemeyer 1999, Malcherek 2010). Nach dem Bruchpunkt im Jahr 1995 sind deutlich reduzierte MTnw festzustellen, wodurch sich auch ein Peak der Wahrscheinlichkeit für einen Bruchpunkt im lokalen Signal des MThb ausprägt, aber mit der gewählten 95%igen Vertrauensgrenze keinem signifikanten Bruchpunkt entspricht. Ebenso lässt sich keine signifikante un stetige Veränderung im MThw feststellen, sodass die Vertiefungen wie erwartet weniger Einfluss auf das MThw gehabt haben. Während also die lokalen Vertiefungsmaßnahmen der Außenweser das MTnw am Pegel Bremerhaven stark beeinflusst haben, scheint das MThw vordergründig durch gemeinsame Entwicklungen aufgrund von großräumigen Einflüssen geprägt zu sein.

#### 4.4 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 12 abgebildet. Hier ist zu erkennen, dass die Verteilung der wahrscheinlichsten Lage von enthaltenen Bruchpunkten stark über das Untersuchungsgebiet variiert. Es lässt sich lediglich ein relativ nah beieinander liegendes 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 un stetige Veränderung des MThb aufweisen. Jedoch ist nach den pegelspezifischen Auswertungen (vgl. Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) eine gemeinsame Ursache dieser Änderung nahezu ausgeschlossen bzw. nicht zu erkennen. Alle weiteren Pegel, die in einem gemeinsamen Zeitraum un stetige 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.

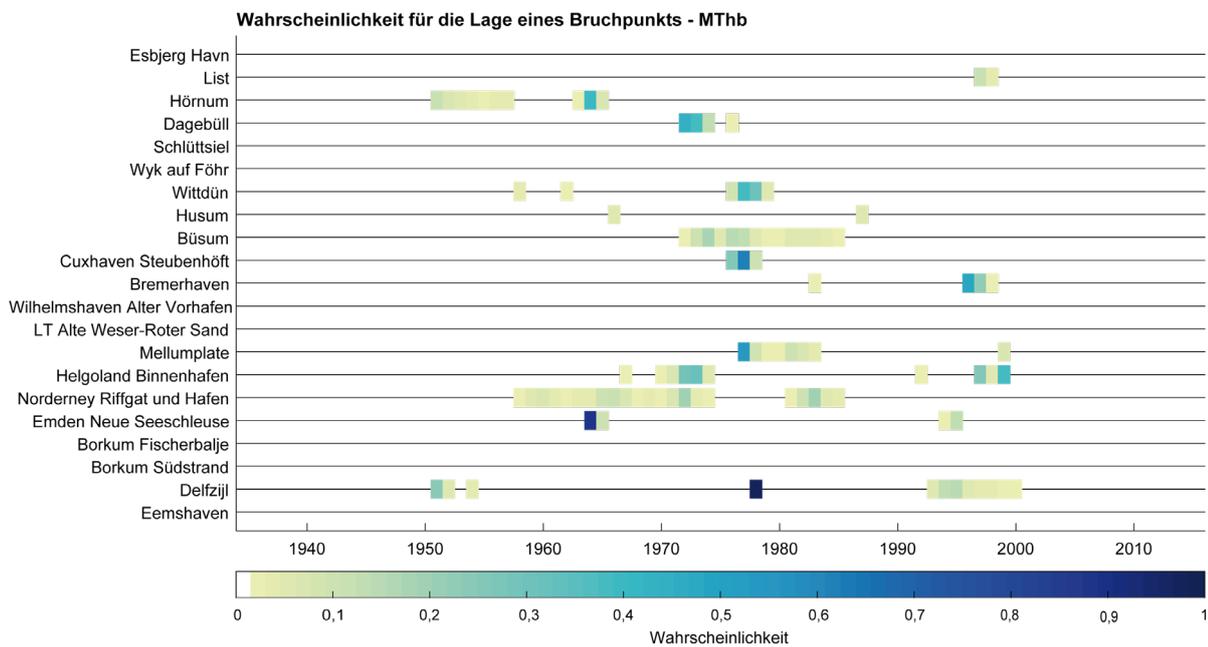


Abbildung 12: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MThb im Zeitraum 1935 bis 2015.

Auch bei der Betrachtung der Übersichten für die Bruchpunkte der beiden Tidewasserstände (vgl. für MTnw: Abbildung 13 und MThw: Abbildung 14) 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 un stetigen 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.

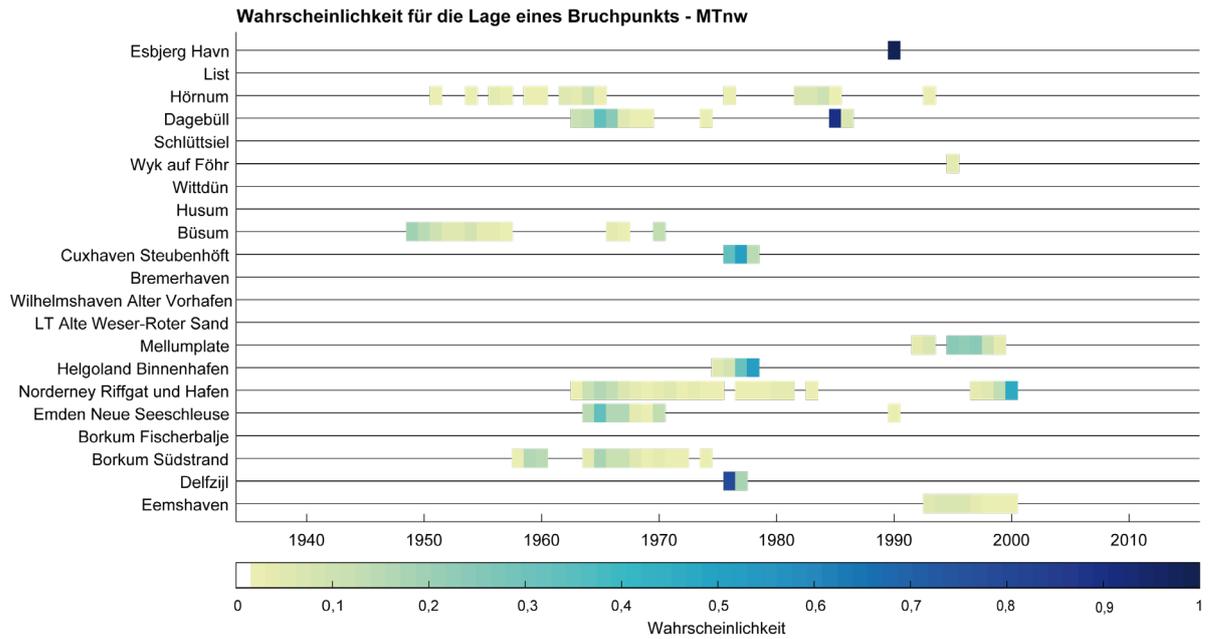


Abbildung 13: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MTnw im Zeitraum 1935 bis 2015.

Es scheinen also keine zeitlichen und räumlichen Muster der unstetigen 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 zugrunde liegende These, dass die Auswirkungen von einzelnen kleinräumigen (Bau-) Maßnahmen räumlich sehr begrenzt zu sein scheinen und die Änderungen der Tideparameter lokal stark variieren.

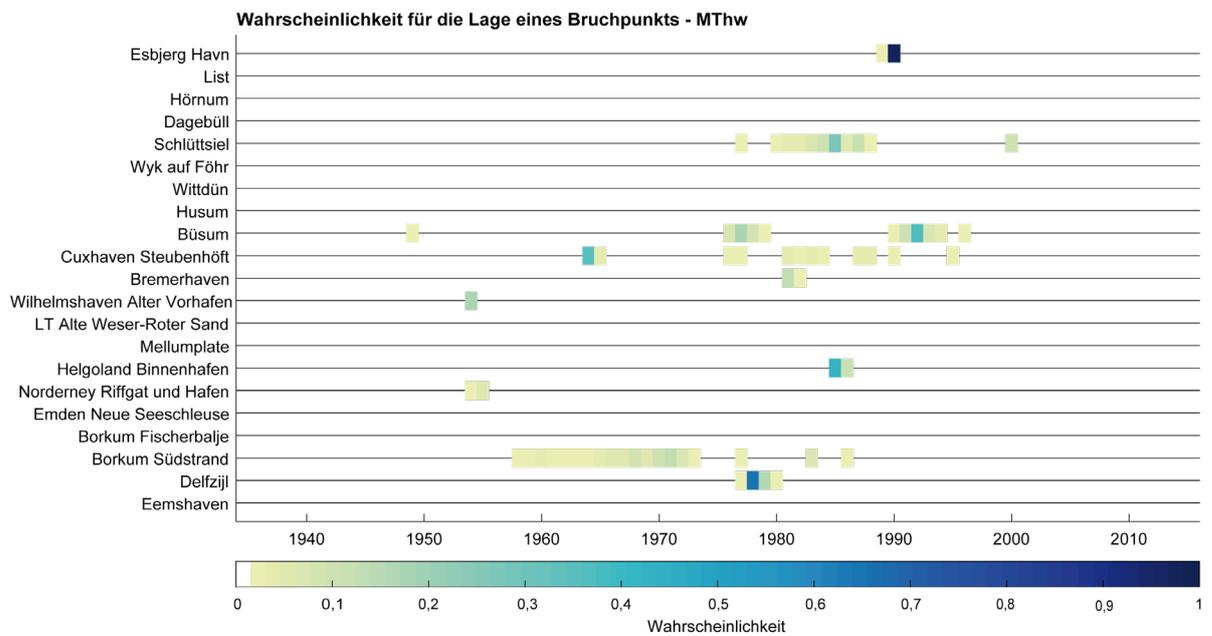


Abbildung 14: Wahrscheinlichkeiten der Bruchpunkt-Zeitpunkte der Differenzzeitreihen des MThw im Zeitraum 1935 bis 2015.

## 5 Zusammenfassung

An der deutschen Nordseeküste ist es seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu großen Veränderungen der Tidedynamik bzw. Ausprägung der Gezeiten gekommen. Die Entwicklungen spiegeln sich insbesondere in einem Anstieg des MThb wieder, wobei an der Küste Schleswig-Holsteins größere 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 in der Deutschen Bucht liefert ein erstes Indiz für die Beeinflussung des Tidegeschehens durch lokale Maßnahmen/Einflüsse an unterschiedlichen Küstenabschnitten. 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 morphologische Entwicklungen verursacht werden. Die vorgestellte Methodik der Kombination verschiedener statistischer Verfahren ermöglicht es, diese beiden genannten Komponenten an den untersuchten Pegelstandorten im Untersuchungsgebiet zu trennen. Die zugrunde gelegte These 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 diese Pegel gleichzeitig auch unter dem Einfluss kleinräumiger und lokaler Effekte stehen.

Einer der wesentlichen Schritte der Methodik zur Separierung der klein- und großräumigen Signale in jeder Pegelzeitreihe ist die sog. Hauptkomponentenanalyse (PCA). Es wurde davon ausgegangen, dass die erste Hauptkomponente (PC1), 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 (PC1) abgebildet, wohingegen das MTnw nur zu 70 % durch PC1 repräsentiert wird. Dies bedeutet, dass MThw und MThb signifikant stärker von großräumigen Einflüssen beeinflusst werden. Zudem weisen die Zeitreihen des MTnw räumlich variierende erklärte Varianzen der niedrigeren PCs auf, und nur rund 70 % lassen sich bereits über das gemeinsame Signal beschreiben. Regionale Entwicklungen und räumlich begrenzte Systemveränderungen bilden sich also in den höheren PCs ab. Für jeden Pegelstandort lässt sich also zusätzlich zu den Beobachtungszeitreihen über eine Rekonstruktion mit der ersten Hauptkomponente sowohl das gemeinsame Signal ermitteln als auch über Differenzbildung aus der Zeitreihen eliminieren.

Nachdem das gemeinsame Signal aus jeder Aufzeichnungszeitreihe separiert wurde, konnten nun die lokalen Effekte über die Differenzzeitreihen detaillierter untersucht werden. 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. Des Weiteren können die linearen Trends der Teilzeitreihen betrachtet werden, 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 eingetretenen Änderung nach einem 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. Anhand von drei Beispielen 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 un stetige Veränderung, vorwiegend, aber nicht ausschließlich im MTnw, sichtbar. So sorgte die Vertiefung Elbe im Zeitraum von 1974 bis 1978 für eine un stetige Veränderung von MTnw und MThb am Pegel Cuxhaven Steubenhöft. Zudem führte der Ausbau der Außenweser in den Jahren 1998/99 zu einem Bruchpunkt an dem Pegel Bremerhaven. Auch die Eindeichungsmaßnahmen der Meldorfer Bucht zwischen 1969 und 1978 lassen sich sehr deutlich im MThb des Pegels Büsum erkennen und beschreiben durch ansteigendes MTnw und stagnierendes MThw. Weitere Umbaumaßnahmen wie bspw. Hafenumbaumaßnahmen am Pegel Delfzijl, ein Pegelversatz am dänischen Pegel Esbjerg und die Umstellung des Pegels Norderney Hafen auf Norderney Riffgat in den 1960er Jahren konnten mithilfe des vorgestellten Verfahrens detektiert werden (vgl. Ebener et al. 2020). An einigen anderen Pegeln wie bspw. Helgoland Binnenhafen und Dagebüll wurden ebenfalls ein bzw. zwei Bruchpunkte detektiert, die jedoch keiner Baumaßnahme oder einem lokalen Effekt zugeordnet werden können. Dies muss jedoch nicht zwingend auf einen Fehler im Verfahren hinweisen, sondern auch mangelhafte Informationsgrundlagen zu durchgeführten historischen Baumaßnahmen machen es unmöglich, 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. Darunter können bspw. morphologische Prozesse fallen 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 Systemreaktionen verursachen. Wie auch bei dem Prinzip der Kippunkte im Klimasystem (vgl. u. a. Lenton et al. 2008) können die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung zahlreichen nichtlinearen Wechselwirkungen unterliegen. Aus diesem Grund können ggf. Auswirkungen von Einflüssen wie bspw. anthropogene Maßnahmen sichtbar werden, denen keine eindeutige Ursache zugeordnet werden können.

Auch wenn das vorgestellte Verfahren zur Trennung von großräumigen und lokalen Anteilen der Entwicklung in den Zeitreihen der Tidekennwerte Schlussfolgerungen auf die

Wirkung von vereinzelt Baumaßnahmen zulässt, ist die weitere Entwicklung von optimierten Verfahren zur Quantifizierung der Auswirkungen unerlässlich. Weiterentwickelte oder neue Verfahren könnten 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 – bspw. ozeanographische Prozesse – anteilig zu den Entwicklungen beigetragen haben. 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 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.

## 6 Danksagung

Das Verbundprojekt ALADYN wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 vom BMBF im Projekt Küstenmeerforschung des Rahmenprogramms Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA 3) durch den Projektträger Jülich gefördert. (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0758A). Wir bedanken uns für die gute Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit der Projektbegleitenden Gruppe, bestehend aus Sylvin Müller-Navarra, Volker Neeman, Thomas Strotmann, Frank Thorenz und Norbert Winkel.

Die im Rahmen des von der DFG geförderten Vorhabens TIDEDYN (Förderkennzeichen: 290112166) erzielten Ergebnisse konnten für die Entwicklung der statistischen Methodik genutzt werden und hatten hinsichtlich der Zielsetzung von ALADYN sehr positive Synergieeffekte zur Folge.

## 7 Literaturverzeichnis

Abdi, H.; Williams, L. J.: Principal component analysis. In: WIREs Comp Stat, 2 (4), 433–459, <https://doi.org/10.1002/wics.101>, 2010.

Arns, A.; Wahl, T.; Wolff, C.; Vafeidis, A. T.; Haigh, I. D.; Niehüser, S.; Jensen, J.: Non-linear interaction modulates global extreme sea levels, coastal flood exposure, and impacts. In: Nature Communications, 11, Article number: 1918, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15752-5>, 2020.

Bartels, J.: Gezeitenkräfte, Handbuch der Physik, Bd. XLVIII, 1952.

Cowtan, K.; Way, G. R.: Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140, 1935–1944, <https://doi.org/10.1002/qj.2297>, 2014.

Cressie, N.: The origins of kriging. In: Mathematical Geology., 22, 3, 239–252, 1990.

Dangendorf, S.; Jensen, J.: Untersuchungen zur Detektion von Instationaritäten in küstenhydrologischen Zeitreihen. In: *Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, CoastDoc Seminar 2010, Heft 2*, 2011.

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: Analyses of observed tidal dynamics; Abschlussbericht zum KFKI-Projekt ALADYN (03F0756A), 2020.

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

Haigh, I. D.; Pickering, M. D.; Green, J. A. M.; Arbic, B. K.; Arns, A.; Dangendorf, S.; Hill D.; Horsburgh, K.; Howard, T.; Idier, D.; Jay, D. A.; Jänicke, L.; Lee, S. B.; Müller, M.; Schindelegger, M.; Talke, S. A.; Wilmes, S.-B.; Woodworth P. L.: 'The Tides They Are A-Changin': A comprehensive review of past and future non-astronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications. In: *Review of Geophysics*, 58, 1, <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>, 2020.

Idier, D.; Bertin, X.; Thompson, P.; Pickering, M. D.: Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding: Mechanisms and Contributions to Sea Level Variations at the Coast In: *Surveys in Geophysics*, 40, 1603–1630, <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5>, 2019.

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: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, <https://doi.org/10.1029/2020JC016456>, 2021.

Jensen, J.; Mügge, H.-E.; Visscher, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste*, 47, 135–161, 1988.

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

Jensen, J., Frank, T.; Wahl, T.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). In: *Die Küste*, 78, 59–163, 2011.

Jolliffe I. T.: *Principal Component Analysis*, Springer Series in Statistics, <https://doi.org/10.1007/b98835>, 2002.

Krige, D. G.: 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, 1951.

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

Malcherek, A.: Tidedynamik in Ästuaren. In: Malcherek, A.: *Gezeiten und Wellen*. 81–109, [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9764-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9764-0_5), 2010.

Mawdsley, R. J.; Haigh I. D.: Spatial and Temporal Variability and Long-Term Trends in Skew Surges Globally. In: *Front. Mar. Sci.*, 3, 29, <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00029>, 2016.

Niemeyer, H. D.: Change of mean tidal peaks and range due to estuarine waterway deepening; 26th International Conference on Coastal Engineering; Copenhagen, Denmark; <https://doi.org/10.1061/9780784404119.251>, 1999.

Rigor, I. G.; Colony, R. L.; Martin S.: Variations in surface air temperature observations in the arctic. In: *J. Clim.*, 13, 1979–1997, 2000.

Ruggieri, E.: A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. In: *Int. J. Climatol.*, 33, 2, 520–528, <https://doi.org/10.1002/joc.3447>, 2012.

Salas, J. D.: Analysis and Modelling of Hydrologic Time Series. In: Maidment, D. R. (Ed.): *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York; 1993.

Şanal, Z.: *Mathematik für Ingenieure, Grundlagen – Anwendungen in Maple*. 2015.

Schönfeld, W.; Jensen, J.: Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln. Zwischenbericht zum KFKI-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“. In: *Die Küste*, 52, 191–204, 1991.

Schubert, R.; Rahlf, H.: Hydrodynamik des Weserästuars. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 86*, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 49–53, 2003.

Straub, H.: Langzeitverhalten von hydrologischen Größen. KLIWA-Symposium 2004. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe, 2004.

Vierfuß, U.: Realisierte Strombaumaßnahmen an der Weser, Grundlagen für Strombau-Konzeptionen an Tideästuarien. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg, 2003.

Wahl, T.; Jensen, J.; Frank, T.: 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.

Weiß, R., Meinke, I.: Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang; In: *Klimawandel in Deutschland*; Springer Spektrum; <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3>, 2017.