

Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL)

Von JÜRGEN JENSEN, TORSTEN FRANK und THOMAS WAHL

Z u s a m m e n f a s s u n g

In dem vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse des KFKI-Forschungsvorhabens „AMSeL – Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“ vorgestellt. Auf Basis hochaufgelöster Pegelstandorte werden qualitativ hochwertige Mean Sea Level Zeitreihen generiert und analysiert. Gleichzeitig werden die hochaufgelösten Datenreihen für Analysen der Verweildauern der Tidewasserstände auf unterschiedlichen Höhenstufen herangezogen. Auf Basis der langjährigen Zeitreihen der Tidehoch- und Niedrigwasser werden Untersuchungen zu Tideketten (mehrere extreme Tidehoch- oder Tideniedrigwasser in Folge) durchgeführt. Die Ergebnisse der Mean Sea Level Untersuchungen deuten auf einen langfristigen Anstieg über die letzten ca. 170 Jahre hin. Eine Beschleunigungstendenz über die letzten Dekaden ist zu beobachten, kann jedoch nach heutigem Kenntnisstand unter Berücksichtigung aller verfügbaren Daten nicht als außergewöhnlich für die letzten 170 Jahren bezeichnet werden. Insgesamt können stärkere relative Anstiegsraten für die in Nord-Süd-Richtung verlaufende Küstenlinie (Schleswig-Holstein) als für die in Ost-West-Richtung verlaufende Küstenlinie (Niedersachsen) festgestellt werden, was zum Teil auf unterschiedlich stark ausgeprägte Vertikalbewegungen der Landoberfläche zurückzuführen ist. Aus dem Vergleich der Beobachtungen für die Deutsche Bucht mit Ergebnissen von großräumigeren Untersuchungen können Empfehlungen zur Berücksichtigung von Meeresspiegelszenarien im Rahmen regionaler Küstenschutzplanungen abgeleitet werden. Die Verteilung der Verweildauern der Wasserstände unterliegt ebenfalls regionalen Unterschieden. Während die Pegel der schleswig-holsteinischen Küste nördlich von Husum eine unimodale (eingipfelige) Verteilung mit Schwerpunkt der Verweildauern nahe dem mittleren Tidehochwasser aufweisen, zeigen die übrigen Pegel eine bimodal ausgeprägte Verteilung mit Maxima nahe mittlerem Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Die Trendentwicklung der durch Tideketten nicht unterschrittenen Scheitelhöhen bewegt sich auch für längere Ketten (bis zu 8 Tiden in ununterbrochener Folge) überwiegend über dem jeweiligen Trend der mittleren Tideniedrig- und Tidehochwasser sowie meist auch über dem Trend des Mean Sea Level. In den Jahren zwischen Mitte der 70er bis gegen Ende der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts ist ein gehäuftes Auftreten von Ketteneignissen zu beobachten.

S c h l a g w ö r t e r

Deutsche Bucht, Pegelzeitreihen, Mean Sea Level, Tideketten, Verweildauer

S u m m a r y

This final report focuses on presenting the results of the KFKI research project „AMSeL – Mean sea level and tidal analysis along the German North Sea coastline“. High frequency sea level data as well as tidal high and low water time series from selected tide gauges are used to construct and analyse high quality Mean Sea Level time series. At the same time, the high frequency data sets are used to analyse residence- or dwell-times of the tidal wave on different water level heights. Based on the long high and low water time series, successive highs and lows (i.e. specified number of extreme high or low waters in a row) are analysed. The results of the Mean Sea Level analyses point to a long term sea level rise over the last ap-

proximately 170 years. An acceleration could be observed over the last decades, but from today's knowledge and considering all available data sets it cannot be denoted as unusual. Higher relative rates of sea level rise could be observed for the coastline in north-south direction (Schleswig-Holstein) than for the coastline in east-west direction (Lower Saxony), which is partly due to different rates of vertical land movement. From comparing the results for the German Bight with those from studies on wider regional scales, recommendations how to consider sea level scenarios for regional coastal protection planning purposes can be made. Residence time distribution also shows a north to south development from unimodal distributions with the peak near mean tidal highwater along the Schleswig-Holstein coastline to a bimodal distribution at Husum and along the Niedersachsen coastline. Trends of sustained reached and exceeded peak water levels predominantly are higher than respective trends of mean tidal low and mean tidal high water as well as mostly higher than the trend of the Mean Sea Level. Between the mid-1970s and mid to late-1990s an elevated count of successive tidal high and low water events are observed.

Keywords

German Bight, tide gauge time series, Mean Sea Level, sequence of tides, residence time

Inhalt

| | |
|--|-----|
| 1. Einleitung..... | 61 |
| 2. Datengrundlage..... | 63 |
| 2.1 Untersuchungsgebiet und ausgewählte Pegel..... | 63 |
| 2.2 Verfügbare Datensätze und Datenaufbereitung..... | 65 |
| 2.3 Berücksichtigung von Pegeloffsets | 67 |
| 2.4 Abschließende Beurteilung der Qualität der verfügbaren Datensätze..... | 68 |
| 3. Methodisches Vorgehen..... | 70 |
| 3.1 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis hochaufgelöster Pegelraten | 70 |
| 3.2 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis von Scheitelwerten mittels des k-Wert Verfahrens... 72 | |
| 3.2.1 Problemstellung und Verfahrensbeschreibung | 72 |
| 3.2.2 Stationaritätstests | 73 |
| 3.2.3 Verifikation des k-Wert Verfahrens | 81 |
| 3.3 Ermittlung synthetischer Pegelzeitreihen | 84 |
| 3.4 Lineare Trendanalysen | 85 |
| 3.5 Nicht-lineare Trendanalysen | 86 |
| 3.6 Vertikale Landbewegungen | 91 |
| 3.7 Tideketten | 93 |
| 3.7.1 Begriffsbestimmung..... | 95 |
| 3.7.2 Häufigkeitsuntersuchung von Tnw- und Thw-Folgen..... | 97 |
| 3.8 Verweildauern..... | 100 |
| 3.8.1 Begriffsbestimmung..... | 100 |
| 3.8.2 Untersuchung der Verweildauern..... | 101 |
| 4. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht..... | 103 |
| 4.1 RMSL-Zeitreihen für die einzelnen Untersuchungspegel und ausgewählte synthetische Pegelzeitreihen..... | 103 |
| 4.2 Ergebnisse linearer Trendanalysen..... | 104 |
| 4.3 Ergebnisse nicht-linearer Trendanalysen | 107 |

| | |
|---|-----|
| 4.4 Vertikale Landbewegungen im Bereich der Deutschen Bucht | 113 |
| 4.5 Globale und regionale Meeresspiegeländerungen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung | 115 |
| 5. Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von Tideketten in der Deutschen Bucht | 122 |
| 5.1 Ergebnisse der Trenduntersuchung der maximalen Basishöhe der Tnw- und Thw-Ketten | 123 |
| 5.2 Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen | 127 |
| 5.3 Ereignisanzahl und Auftretensverteilung von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw- Folgen | 130 |
| 6. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der Verweildauern der Tidewasserstände in der Deutschen Bucht | 136 |
| 6.1 Ergebnisse der Verweildaueruntersuchungen der Pegel | 137 |
| 6.2 Verweildauern von Sturmfluten am Pegel Hörnum und Cuxhaven | 150 |
| 7. Fazit und weiterer Forschungsbedarf | 154 |
| 8. Danksagung | 157 |
| 9. Schriftenverzeichnis | 157 |

1. Einleitung

Ein Ansteigen des mittleren Meeresspiegels (MSL)¹ stellt eine der Hauptgefahren dar, der wir uns im Zuge eines sich erwärmenden Klimas ausgesetzt sehen. Derzeit leben weltweit ca. 200 Millionen Menschen in tief liegenden Gebieten und sind der potenziellen Gefahr von Überflutungen ausgesetzt. Aufgrund der Bevölkerungszunahme und der immer stärkeren Besiedlung der Küstengebiete wird diese Zahl in Zukunft weiter ansteigen und kann bis ca. 2080 eine Größenordnung von 800 Millionen erreichen (NICHOLLS, 2010). Gleichzeitig beeinflusst ein erhöhter MSL die in unregelmäßigen Abständen auftretenden Sturmfluten, was die Gefahr für Überflutungen entlang der betroffenen Küstenabschnitte ansteigen lässt. Aus diesem Grund hatten viele in der jüngsten Vergangenheit durchgeführte Untersuchungen regionale und besonders globale Änderungen des MSL zum Gegenstand. Dabei wurden sowohl die bisher mit Hilfe von Pegeln und Satelliten beobachteten Änderungen (z.B. CAZENAVE et al., 2008; CHURCH AND WHITE, 2006; CHURCH et al., 2008; DOMINGUES et al., 2008; HAIGH et al., 2009; HOLGATE, 2007; WAHL et al., 2010; WOODWORTH et al., 2008 and 2009; WÖPPELMANN et al., 2008 and 2009) analysiert, als auch Zukunftsszenarien mit Hilfe semiempirischer (RAHMSTORF 2007; VERMEER and RAHMSTORF, 2009; GRINSTED et al., 2009; JEVREJEVA et al., 2010) und numerischer Modellstudien (zusammengefasst in MEEHL et al., 2007) abgeleitet. Eine umfangreiche Recherche zur Literatur der letzten ca. 10 Jahre zu dem Thema wurde von GÖNNERT et al., (2009) durchgeführt, Hinweise auf ältere und nicht weniger interessante Arbeiten sind u.a. in JENSEN (1984) zu finden.

¹ Der Begriff „mittlerer Meeresspiegel“ beschreibt den Wasserstand, der sich aus der Mittelung hochaufgelöster Wasserstandsbeobachtungen über einen bestimmten Zeitabschnitt (z.B. Monat oder Jahr) ergibt. Im englischsprachigen Raum hat sich der Begriff „Mean Sea Level“ durchgesetzt, in der DIN 4049-3 findet sich der Begriff „mittleres Tidemittelwasser (MTmw)“.

Aus diversen Untersuchungen (z.B. CHURCH et al., 2004, 2008; MITROVICA et al., 2001, 2009) wird deutlich, dass es in der Vergangenheit räumlich gesehen signifikante Unterschiede in der Entwicklung des MSL gegeben hat. Neben der ungleichmässigen Verteilung von Schmelzwasser von Gletschern und Eisschilden, spielen in diesem Zusammenhang auch Gravitationseffekte, Ozeanzirkulation, ungleichmässige thermische Ausdehnung und Salinität eine Rolle. MILLER und DOUGLAS (2007) und WOODWORTH et al. (2010) zeigen, dass auch grossräumige Variationen des atmosphärischen Drucks zu berücksichtigen sind.

Da davon ausgegangen werden muss, dass sich die in der Vergangenheit beobachtete ungleichmässige räumliche Entwicklung auch in Zukunft fortsetzen wird, stellt sich für den Küstenschutz die Frage, welche Änderungen in dem jeweiligen Gebiet zu erwarten sind und auf welche Weise vorausschauend auf diese reagiert werden kann. Derzeit wird den im 4. Sachstandsbericht (AR4) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlichten Szenarien (siehe MEEHL et al., 2007) zur Entwicklung des MSL am meisten Beachtung geschenkt. Dies hat dazu geführt, dass entsprechende Sicherheiten (bzw. Klimazuschläge) bei Bemessungsfragen im Küstenraum berücksichtigt werden. Da es sich jedoch bei den IPCC-Szenarien um globale Szenarien handelt, werden die zu erwartenden regionalen Unterschiede in der Entwicklung in keiner Weise berücksichtigt. Regionale Studien zur Ableitung entsprechender Zukunftsszenarien sind daher unerlässlich und stellen eine grosse Herausforderung für die Wissenschaft in den nächsten Jahren dar. Zur Validierung der Modelle, die bei solchen Untersuchungen genutzt werden, sind qualitativ hochwertige und möglichst lange Beobachtungszeitreihen für das betrachtete Gebiet erforderlich.

Im Falle der Deutschen Bucht haben in der Vergangenheit diverse Studien zur Entwicklung unterschiedlicher Tideparameter (Tidehoch- und Niedrigwasser, Tidenhub etc.) stattgefunden (z.B. FÜHRBÖTER UND JENSEN, 1985; GÖNNERT et al., 2004; JENSEN, 1984; JENSEN et al., 1988; JENSEN et al., 1992; TÖPPE UND BROCKMANN, 1992). Eine detaillierte Analyse der Änderungen im MSL unter Verwendung der verfügbaren hochaufgelösten Datensätze ist hingegen bis heute nicht erfolgt (hochaufgelöst meint hier mind. stündliche Wasserstandswerte). Neben den hochaufgelösten Datensätzen, die mit Ausnahme weniger Pegel seit Ende der 1990er Jahre verfügbar sind, stehen häufig sehr lange und i.d.R. lückenlose Zeitreihen der Tidehoch- und Niedrigwasser zur Verfügung. Somit ist die Datenlage für den Bereich der deutschen Nordseeküste in einem weltweiten Vergleich insgesamt als sehr gut zu bezeichnen (WAHL et al., 2008). Im Rahmen des vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens „AMSeL – Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“ wurden erstmals die heute verfügbaren hochaufgelösten Datensätze in die verschiedenen Analysen einbezogen. Die wesentlichen Ergebnisse werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt. Neben den Untersuchungen zur langfristigen Entwicklung des MSL wurden auch weitergehende Analysen zu Tideketten und Verweildauern durchgeführt. Tideketten meint hier das Auftreten mehrerer besonders hoher oder auch besonders niedriger Tidehochwasser (Thw) bzw. Tideniedrigwasser (Tnw) in Folge. So besteht beispielsweise bei einer größeren Anzahl hintereinander auftretender hoher Tnw die Gefahr, dass die Binnenentwässerung nicht planmässig erfolgen kann und es bei entsprechenden zeitgleich auftretenden extremen Hochwasserabflüssen zu Überflutungen im Hinterland kommt (z.B. FRANK, 2007). Während für diese Art der Untersuchungen die langen Scheitelwertzeitreihen die Grundlage bilden, sind Analysen zu Variationen und Trends in den Verweilzeiten auf unterschiedlichen Höhenstufen nur auf Basis hochaufgelöster Datensätze möglich. Hieraus lassen sich Rückschlüsse darüber ziehen, ob Änderungen in der Form der Tidekur-

ve in der Vergangenheit zu beobachten waren und ob tendenziell damit zu rechnen ist, dass sich die Hauptlast des Wellenangriffs in Zukunft auf bisher weniger geschützte Abschnitte des Küstenschutzsystems verlagert.

Im vorliegenden Beitrag sind die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben AMSeL folgendermaßen strukturiert dargestellt: Im folgenden Kap. 2 wird eine Übersicht über das gewählte Untersuchungsgebiet und die verfügbaren Datensätze gegeben, die von Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und der Länder (LKN-SH) bereitgestellt und vor der weiteren Verwendung noch einmal einheitlich plausibilisiert wurden. In Kap. 3 werden die genutzten und teilweise im Rahmen des Projektes neu entwickelten Methoden zur Analyse des MSL, sowie der Tideketten und Verweildauern im Detail beschrieben. Im Anschluss sind in Kap. 4 die Ergebnisse der MSL-Analysen dargestellt, bevor die Kap. 5 und 6 die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu Tideketten und Verweildauern zusammenfassen. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und einer Darstellung des identifizierten weiteren Forschungsbedarfs zu den behandelten Themenfeldern.

Neben dem vorliegenden Beitrag wurde zu dem KFKI-Forschungsbericht AMSEL ein Abschlussbericht mit zwei Anhängen erstellt. Im Anhang 1 des Abschlussberichtes findet sich ein parallel zu diesem Beitrag entstandenes Pegelprotokoll mit detaillierten Informationen zu den genutzten Daten und deren Aufbereitung. Anhang 2 des Berichtes stellt für die untersuchten Pegel die Auswertungen zum Auftreten von Tideketten in grafischer Form hinsichtlich der Anzahl aufgetretener Ereignisse sowie der maximal erreichten Basishöhen zusammen. Im Folgenden wird an verschiedenen Stellen auf diese Anhänge verwiesen, obwohl diese aufgrund des Umfangs nicht Bestandteil des vorliegenden Beitrages sind. Der Abschlussbericht steht jedoch unter <http://www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/forschung/projekte/amsel/> zum freien Download zur Verfügung.

2. D a t e n g r u n d l a g e

Im Folgenden soll das dem AMSeL-Vorhaben zugrunde liegende Untersuchungsgebiet inklusive der für die Analysen berücksichtigten Nordseepegel im Detail vorgestellt werden.

2.1 U n t e r s u c h u n g s g e b i e t u n d a u s g e w ä h l t e P e g e l

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, beschränkt sich das Untersuchungsgebiet des AMSeL-Projektes auf die Deutsche Bucht, den süd-östlichen Teil der Nordsee. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Pegelstandorte bestand das Hauptziel darin, die gesamte deutsche Nordseeküste abzudecken und dabei ausschließlich Pegel zu berücksichtigen, von denen bekannt war bzw. im Vorfeld recherchiert wurde, dass ausreichend lange Zeitreihen für die geplanten Analysen zur Verfügung stehen.

Es wurden ursprünglich 18 Pegel für die Analysen ausgewählt, die relativ gleich verteilt entlang der deutschen Nordseeküste angeordnet sind. Nachdem alle für die ausgewählten Pegel verfügbaren Daten aufwendig recherchiert und akquiriert wurden, stellte sich anhand von verschiedenen Analysen heraus, dass einige der zunächst ausgewählten Pegelstandorte wegen anthropogener Beeinflussungen oder potentiell fehlerhafter Aufzeichnungen für die geplanten Untersuchungen unbrauchbar waren. Bei diesen, in Abb. 1 in blau dargestellten Pegeln, handelt es sich um die Pegel Tönning, Büsum, Bensorsiel, Schlüttsiel und Borkum.

Der Pegel Tönning wurde nicht weiter berücksichtigt, da sich hier durch den Bau des Eidersperrwerkes (Fertigstellung 1973) starke Beeinflussungen der Wasserstände ergeben haben, wodurch keine aussagekräftigen Ergebnisse bei den geplanten Analysen zu erwarten waren. Ähnliches gilt für den Pegel Büsum, dessen aufgezeichnete Wasserstände durch die Eindeichung der Meldorfer Bucht (Deichschluss 1978) nachweislich beeinflusst sind (MÜGGE und JENSEN, 1991). Die Standorte Benseriel und Schlüttsiel sind aufgrund der Sielbeeinflussung und der dadurch entstehenden Verformungen der Tidekurven besonders für MSL Untersuchungen ungeeignet und wurden daher für die im Projekt AMSeL durchgeführten Analysen nicht weiter berücksichtigt. Für den Pegel Borkum (Fischerbalje) sind bisher nicht erklärbare Differenzen in den hochaufgelösten Datensätzen identifiziert worden (siehe Pegelprotokoll bzw. Anhang 1 des Abschlussberichtes). Die übrigen, in Abb. 1 in rot dargestellten 13 Pegel, stellen nach dem heutigen Kenntnisstand lange und qualitativ hochwertige Beobachtungsdaten bereit und wurden daher für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen herangezogen.

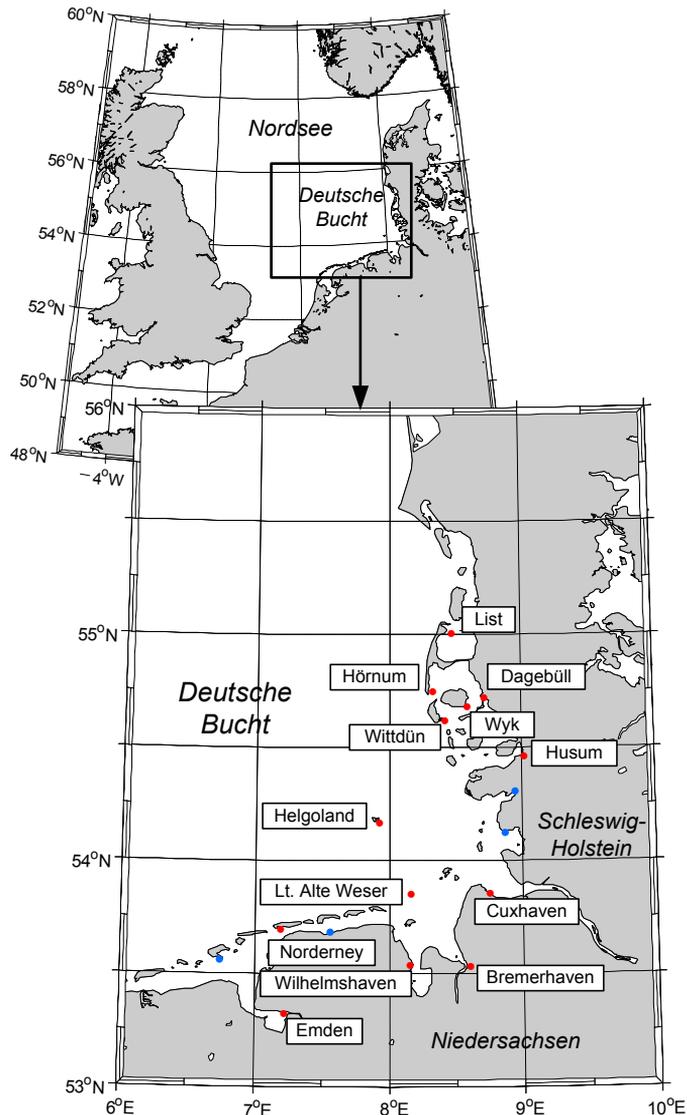


Abb. 1: Untersuchungsgebiet und für die Analysen ausgewählte Pegelstandorte

2.2 Verfügbare Datensätze und Datenaufbereitung

Wie oben bereits erwähnt, wurden die für die ausgewählten Pegel verfügbaren Datensätze recherchiert und von den Dienststellen der WSV bzw. der Länder für die geplanten Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Abb. 2 enthält eine Übersicht über die bereitgestellten Datensätze für die 13 Untersuchungspegel. Hierbei wird unterschieden zwischen hochaufgelösten Daten und Scheitelwerten der Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Hochaufgelöst bedeutet mind. stündliche Wasserstandswerte, wobei für alle Pegel ab Ende der 1990er Jahre sogar minutliche Beobachtungswerte verfügbar sind. Lediglich für die Pegel Helgoland, Cuxhaven und Wilhelmshaven standen vor Beginn der Arbei-

ten längere hochaufgelöste Zeitreihen zur Verfügung, wobei es sich dabei um halbstündliche und stündliche Werte handelte (näheres zur zeitlichen Auflösung der einzelnen Datensätze siehe Pegelprotokoll). Während der Projektlaufzeit wurden einige zusätzliche Daten digitalisiert und zur Reduktion der Unsicherheiten in die Analysen einbezogen. Für den Pegel Hörnum wurden die Daten der Jahre 1950, 1965, 1976 und 1987 durch den Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer in Hamburg (LSBG) digitalisiert und ebenso als minütliche Werte zur Verfügung gestellt, wie die durch den Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) digitalisierten Daten der Jahre 1951 und 1952 des Pegels Wyk.

Neben diesen hochaufgelösten Daten stehen, wie in Abb. 2 zu sehen ist, Zeitreihen der Tidehoch- und Tideniedrigwasserscheitel für die meisten Pegel lückenlos ab 1936/1937 zur Verfügung. Längere Zeitreihen stellen lediglich die Pegel Cuxhaven (ab 1843), Norderney (ab 1901) und Leuchtturm (Lt.) Alte Weser (ab 1903) bereit. Im Falle des Pegels Lt. Alte Weser sind vor 1930 einige Lücken vorhanden. Diese sind darauf zurückzuführen, dass für die betreffenden Jahre zwar grundsätzlich Daten zur Verfügung stehen, diese jedoch nicht ausreichen, um MSL-Jahreswerte entsprechend der in Kap. 3 beschriebenen Definition zu generieren.

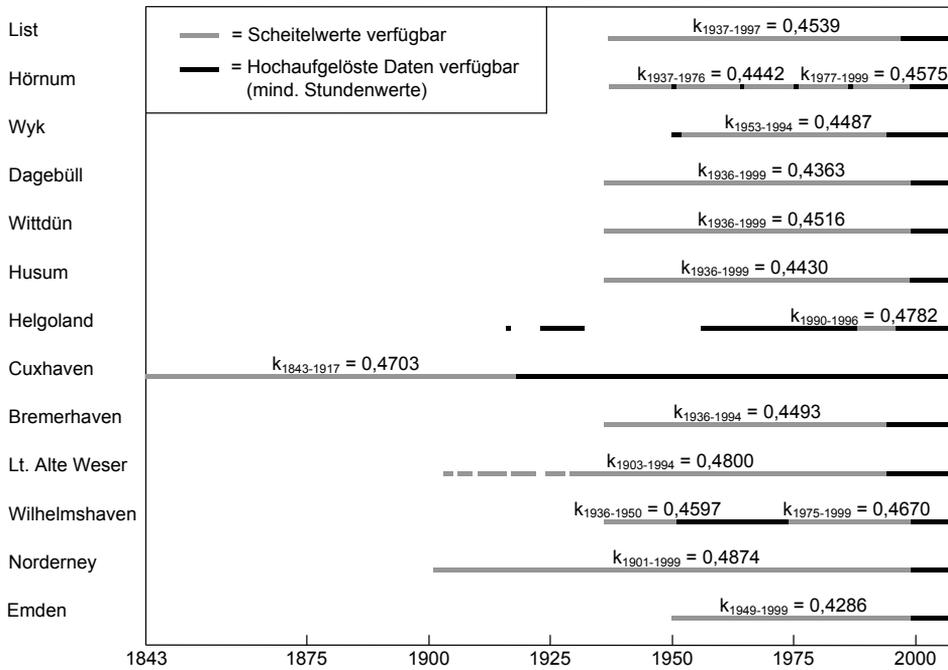


Abb. 2: Für die Analysen verfügbare Datensätze mit Unterscheidung zwischen hochaufgelösten Daten (mind. stündliche Werte) und Scheitelwerten (Thw und Trw) und k-Werte, die für die einzelnen Pegel auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt wurden

Näheres zu den ebenfalls in Abb. 2 dargestellten k-Werten (dimensionsloser Parameter der Tidekurvenverformung) für die einzelnen Untersuchungspegel und die verschiedenen Zeiträume ist Kapitel 3.2 zu entnehmen.

Zur Sicherstellung einer (zumindest näherungsweise) einheitlichen Qualität der akquirierten Daten, wurde zunächst eine zusätzliche und einheitliche Plausibilisierung durchgeführt. Das hierfür genutzte Programm wurde am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) entwickelt und auf alle verfügbaren Datensätze gleichermaßen angewendet. Dabei wurde nach folgenden Auffälligkeiten in den Zeitreihen der hochaufgelösten Daten und der Scheitelwerte gesucht:

- Grenzwertüberschreitungen, wobei sich die Grenzwerte an den höchsten Tidehochwassern (HHThw) und niedrigsten Tideniedrigwassern (NNTnw) aus den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern (DGJ) orientieren.
- Zeiträume, in denen der Wasserstand sehr lange (> 60 Minuten) einen konstanten Wert angenommen hat.
- Datenlücken (in den Ursprungsdatensätzen häufig mit dem Wert -777 gekennzeichnet).

Im Falle einer Warnung wurden die entsprechenden Zeiträume in den Originaldatensätzen visuell geprüft und ggf. gelöscht. So wurden beispielsweise Tiden, die eine Lücke > 60 Minuten aufweisen, entfernt. D.h. die vorhandene Lücke wurde bis zu den umgebenden Tnw erweitert.

Die Ergebnisse der Plausibilisierung bzw. eine Übersicht der gelöschten Zeiträume für die einzelnen Datensätze enthält das Pegelprotokoll. Weitere aufwendige Tests zu kleineren ungewöhnlichen Verformungen einzelner Tidekurven sind nicht durchgeführt worden, da diese Einzelfälle die hier im Wesentlichen genutzten Jahreswerte nicht beeinflussen.

2.3 Berücksichtigung von Pegeloffsets

Im Rahmen des KFKI-Forschungsverbundvorhabens *IKÜS – Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik*, welches im Jahr 2008 abgeschlossen wurde, wurden detaillierte Untersuchungen zu höhenrelevanten Messverfahren im Bereich der deutschen Nordseeküste durchgeführt. Dabei hat sich der Teil IKÜS-B, bearbeitet durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), intensiv mit dem Thema „Pegel/Pegellagen“ befasst. Hierbei wurde festgestellt, dass es in der Vergangenheit teilweise zu Fehlinterpretationen der Pegelvorschrift (LAWA und BMV, 1997) gekommen ist, welche durch die Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und das Bundesministerium für Verkehr (BMV) veröffentlicht wurde. Dies hat sich in Form von manuellen Verschiebungen der Pegellatten und somit Änderungen in den Sollhöhenunterschieden zwischen Pegelnullpunkt und den (repräsentativen) Pegelfestpunkten geäußert. Im Rahmen von IKÜS wurden die geodätischen Pegelinformationen sehr aufwendig aufbereitet, so dass rückwirkend eine konstante Beziehung zwischen Pegelnullpunkt und repräsentativem Pegelfestpunkt hergestellt werden kann. Faktisch bedeutet dies, dass Korrekturen (im Folgenden als Offsets bezeichnet) an die verfügbaren Wasserstandszeitreihen anzubringen sind, um diese entsprechend zu homogenisieren. Detailliertere Informationen zu der beschriebenen Problematik, den genutzten Verfahren zur Aufbereitung der erforderlichen Daten und eine umfangreiche Ergebnisdarstellung sind IKÜS (2008) oder WANNINGER et al. (2009) zu entnehmen.

Für das Projekt AMSeL wurden die in IKÜS ermittelten Offsets berücksichtigt, um eine möglichst hohe Qualität bei den für die Analysen genutzten Daten zu erzielen. Da auch im IKÜS-Projekt ausgewählte Pegel untersucht wurden, wobei andere Ansprüche und Zielsetzungen im Vordergrund standen, stehen entsprechende Ergebnisse nicht für alle, jedoch die meisten der hier gewählten Un-

tersuchungspegel zur Verfügung. Diese sind: Emden, Norderney, Bremerhaven, Wilhelmshaven, Cuxhaven, Helgoland, Hörnum und Dagebüll.

Für die Aufbereitung der Wasserstandsdaten im AMSeL-Projekt wurden die ermittelten Offsets (siehe IKÜS, 2008) nicht in vollem Umfang berücksichtigt. Da die Offsets millimetergenau ermittelt wurden, die Wasserstandszeitreihen jedoch zentimetergenau zur Verfügung stehen, wurden nur Offsets > 1 cm berücksichtigt. Hierdurch wird vermieden, dass ohnehin in den Wasserstandszeitreihen vorhandene Rundungsfehler ggf. noch einmal vergrößert werden. Entsprechend aufbereitete Tabellen und Grafiken mit den berücksichtigten Offsets sind im Pegelprotokoll enthalten. Es kann festgehalten werden, dass die Auswirkungen durch das Anbringen der Offsets für die meisten Untersuchungspegel sehr gering sind. Hierdurch wird die Annahme gestützt, welche zwangsläufig zu treffen war und davon ausgeht, dass die Auswirkungen für die hier genutzten aber nicht in IKÜS untersuchten Pegel ebenfalls gering wären, wenn entsprechende Offsets zur Verfügung stehen würden. Eine Ausnahme stellt der Pegel Norderney dar, für den teilweise Offsets in einer Größenordnung von 5 cm über längere Zeiträume hinweg ermittelt wurden.

2.4 Abschließende Beurteilung der Qualität der verfügbaren Datensätze

Wie in der Einführung bereits erwähnt wurde, ist die Verfügbarkeit von Wasserstandszeitreihen für die Deutsche Bucht im weltweiten Vergleich als sehr gut zu beurteilen. Dies betrifft sowohl die Dichte des betriebenen Messnetzes, als auch die Gesamtlänge der verfügbaren Zeitreihen und deren Vollständigkeit (für die meisten Pegel sind keinerlei oder nur kurze Lücken vorhanden). Im Vergleich zu anderen europäischen Küstenanrainern (z.B. England) ist die Verfügbarkeit von lange zurückreichenden hochaufgelösten Daten (mit Ausnahme weniger Pegel, wie z.B. Cuxhaven) hingegen als mittelmäßig zu bezeichnen. Analoge Pegelschriebe über lange Zeiträume (für die meisten Pegel mind. ab ca. 1935) liegen jedoch in den entsprechenden Dienststellen vor. Dadurch besteht grundsätzlich die Möglichkeit, längere hochaufgelöste Zeitreihen im Nachhinein zu digitalisieren. Dabei handelt es sich um einen zeitaufwendigen und dementsprechend kostenintensiven Arbeitsaufwand, der wie die folgenden Analysen zeigen werden, jedoch einen Mehrwert bzw. eine deutliche Qualitätsverbesserung der Untersuchungsergebnisse erwarten lässt.

Insgesamt sind die hier berücksichtigten Datensätze hinsichtlich ihrer Qualität differenziert zu beurteilen. Bei allen Datenreihen kann nach 1935 von einer sehr guten Qualität ausgegangen werden. Diese Annahme gründet sich zum Einen auf die Tatsache, dass seit 1935 Aufzeichnungen über regelmäßige Höhenkontrollen der Pegelfestpunkte vorliegen (WANNINGER et al., 2009). Zum Anderen zeigen Analysen, die im Rahmen früherer Untersuchungen (z.B. JENSEN, 1984; SCHÖNFELD und JENSEN, 1991) und auch im Rahmen des AMSeL-Projektes durchgeführt wurden, einen sehr starken Zusammenhang zwischen den einzelnen Zeitreihen ab 1935. Für den Zeitabschnitt vor 1935 stehen überhaupt nur für 4 Pegel Daten zur Verfügung, wobei es sich für Helgoland nur um wenige Jahre handelt, für die Stundenwerte aus Digitalisierarbeiten vorliegen. Somit können für den Zeitabschnitt vor 1935 bei Trendanalysen nur die Pegel Cuxhaven, Lt. Alte Weser und Norderney genutzt werden (siehe Kap. 3.4). Für alle drei Pegel ergeben sich für den genannten Zeitabschnitt gewisse Unsicherheiten, die auf das Fehlen von detaillierten Informationen zu den verschiedenen Höhenbezügen zurückzuführen sind.

Im Falle des Pegels Norderney zeigen die Ergebnisse des IKÜS-Projektes, dass zur Homogenisierung der Zeitreihe viele Offsets anzubringen sind, die signifikante Auswirkungen auf die Gesamtzeitreihe haben. Aufgrund des Fehlens detaillierter Informationen für den Zeitabschnitt vor 1935 konnten in IKÜS keine Offsets für diese Zeitspanne ermittelt werden. Dadurch ergibt sich für die im AMSeL-Projekt genutzten Datenreihen des Pegels Norderney eine Unsicherheit für die Zeitspanne von 1901 bis 1935.

Im Falle des Pegels Lt. Alte Weser stammen die Daten vor 1964 ursprünglich vom Pegel Roter Sand und wurden mittels einer Regressionsbeziehung (siehe JENSEN et al., 1988) auf den Pegel Lt. Alte Weser übertragen. Gleichzeitig finden sich im Stammbuch des Pegels Roter Sand Hinweise auf u.U. stattgefunden und nicht eindeutig erfasste Verschiebungen des Pegelnullpunktes zu unterschiedlichen Zeiträumen vor 1935. Eine Überprüfung, ob solche Verschiebungen stattgefunden haben und wenn ja zu welchen Zeitpunkten und in welchem Umfang konnte bisher nicht belastbar erfolgen. Grundsätzlich lassen die Untersuchungen von DANGENDORF (2010) zur Detektion von Bruchpunkten in Wasserstandszeitreihen, bei entsprechender Weiterentwicklung, jedoch darauf hoffen, dass eine ggf. erforderliche Homogenisierung der Zeitreihe in Zukunft erfolgen kann. Für die hier durchgeführten Analysen ergibt sich zunächst wiederum eine Unsicherheit für den Zeitabschnitt vor 1935.

Für den Pegel Cuxhaven liegen Daten ab 1843 vor, wobei Stundenwerte aus aufwendigen Digitalisierarbeiten (veranlasst durch Dipl.-Ozean. Ralph Annusch, i.R., ehemals BSH) ab 1918 verfügbar sind. Für den Zeitabschnitt 1855 bis 1912 ermitteln LASSEN et al. (1984) auf Basis der Auswertung von historischen Nivellements eine Bauwerkssetzung des Leuchtturms Cuxhaven, an dem eine eingehauene Kerbe zur Höhenkontrolle des Pegelnullpunktes herangezogen wurde. Auf Grundlage der Ergebnisse geben SIEFERT und LASSEN (1985) Korrekturfunktionen für unterschiedliche Zeiträume zwischen 1855 und 1900 an, die an die Daten aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern zur Homogenisierung angebracht werden sollen. Von JENSEN et al. (1988) (KFKI-Vorhaben zur „Wasserstandsentswicklung in der Deutschen Bucht“) wurden die genannten Korrekturen in einem späteren Vorhaben mit Beteiligung von Herrn Prof. Siefert in der projektbegleitenden Gruppe jedoch nicht berücksichtigt. Zudem weisen LASSEN et al. (1984) darauf hin, dass Lentz, dessen Nivellement aus dem Jahr 1855 u.a. Grundlage für die Bestimmung der Senkungsraten war, selbst Zweifel an der Richtigkeit der von ihm ermittelten Höhen geäußert hat. Ohne die Berücksichtigung dieses Nivellements würden sich andere Senkungsraten ergeben, die zu berücksichtigen wären. Des Weiteren ist fraglich, ob die aus den Nivellements ermittelten Höhenunterschiede in vollem Umfang auf lokale Setzungen im Bereich des Leuchtturmes zurückzuführen sind. Aus den veröffentlichten Ergebnissen wird nicht eindeutig, ob nicht teilweise auch die Unterschiede in den großräumigeren Vertikalbewegungen zwischen den Ausgangspunkten der Nivellements (Bremen und Hamburg) und dem Bereich Cuxhaven in den Messungen erfasst wurden. Eine Korrektur der Pegelzeitreihen um diesen Anteil an Vertikalbewegungen wäre nicht korrekt, da hier die Analyse des relativen MSL (RMSL) im Vordergrund steht und auch keine Korrektur der restlichen Zeitreihe (nach 1900) erfolgt. Durch Anbringen der Korrekturen wären die Daten von 1843 bis 1855 nicht länger nutzbar, da für diese Zeitspanne keinerlei Informationen aus weiteren Nivellements vorliegen. Aufgrund dieser Ausführungen wurde beschlossen, die von SIEFERT und LASSEN (1985) empfohlenen Korrekturen im AMSeL-Projekt nicht zu berücksichtigen. Wie die Erläuterungen zeigen, ergibt sich auch hierdurch eine Unsicherheit, die in diesem Fall den Zeitabschnitt 1843 bis 1900 betrifft. Da der Pegel Cuxhaven der einzige Pegel ist, für

den Daten von vor 1900 verfügbar sind, sind die im späteren Verlauf dargestellten Ergebnisse besonders für diesen Zeitabschnitt entsprechend zu bewerten.

Aus Korrelationsanalysen zwischen den drei Pegeln (Lt. Alte Weser, Norderney und Cuxhaven) für die Zeitspanne 1900 bis 1935 konnten trotz der erwähnten Unsicherheiten starke und signifikante Zusammenhänge ermittelt werden. Dies begründet die Entscheidung, hier nicht auf die historischen und wertvollen Informationen der wenigen langen Pegelzeitreihen zu verzichten.

3. Methodisches Vorgehen

Im Folgenden sollen die im Rahmen des AMSeL-Projektes genutzten und teilweise neu- bzw. weiterentwickelten Verfahren und Methoden im Detail vorgestellt werden. Zunächst wird die Art und Weise erläutert, mit der die zu analysierenden MSL-Zeitreihen generiert wurden, bevor intensiver auf die Analyseverfahren (für MSL, Verweildauern und Tideketten) eingegangen wird.

3.1 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten

Ziel ist es, für die ausgewählten Pegel möglichst lange und qualitativ hochwertige MSL-Zeitreihen zu generieren. Bei alleiniger Berücksichtigung der hochaufgelösten Daten würden für die meisten Pegel lediglich Zeitreihen mit einer Länge von ca. 10 Jahren zur Verfügung stehen. Wie aus Abb. 3 zu erkennen ist, kann der MSL, der dem mittleren Tidemittelwasser (MTmw) entspricht (DIN 4049-3), als Schwerelinie der Tidekurve, jedoch ausschließlich auf Basis solcher hochaufgelöster Daten ermittelt werden. Auf Basis der Scheitelwerte können lediglich Zeitreihen des mittleren Tidehalbwassers (MT^{1/2}w) generiert werden, die, wie anhand der späteren Analysen zu erkennen sein wird, besonders im Bereich der Deutschen Bucht deutliche Unterschiede zum MSL aufweisen können. Es wurde daher eine Methode genutzt bzw. weiterentwickelt, die es ermöglicht MSL-Zeitreihen und MT^{1/2}w-Zeitreihen zu kombinieren, ohne dabei die Analyseergebnisse zu verfälschen. Bevor diese Methode im nachfolgenden Kapitel im Detail erläutert wird, soll hier kurz beschrieben werden, auf welche Weise und unter Berücksichtigung welcher Definitionen MSL-Zeitreihen aus hochaufgelösten Daten im Rahmen des AMSeL-Projektes generiert wurden.

Liegen hochaufgelöste Datensätze vor, errechnet sich der MSL als arithmetisches Mittel aller registrierten Werte über einen bestimmten Zeitabschnitt. Dabei können Stundenwerte oder noch höher aufgelöste Datensätze genutzt werden (IOC, 2002; PUGH, 2004). Alternativ können Filterverfahren (z.B. Doodson X0 Filter) zum Einsatz kommen, um den Tideeinfluss zu eliminieren und anschließend den MSL-Wert für den betrachteten Zeitabschnitt (z.B. Monat) zu berechnen (IOC, 2002). Beim Umgang mit Datenlücken wurden im AMSeL-Projekt die Definitionen des Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL, <http://www.psmsl.org/>) berücksichtigt, auf dessen Datenbank für die meisten international durchgeführten MSL-Untersuchungen zurückgegriffen wird.

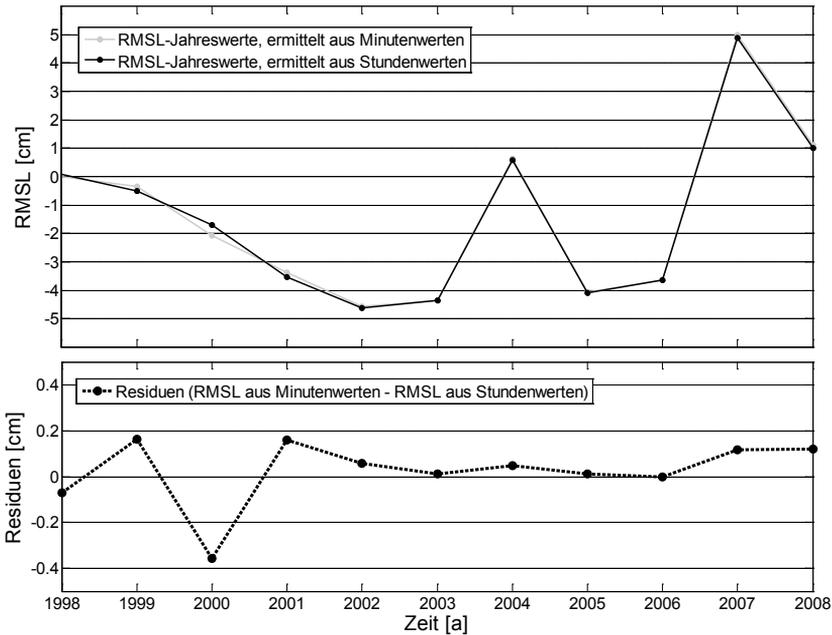


Abb. 4: Unterschied zwischen RMSL-Jahreswerten, die aus Minutenwerten bzw. Stundenwerten generiert wurden

3.2 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis von Scheitelwerten mittels des k-Wert Verfahrens

Entsprechend der Informationen aus dem vorherigen Kapitel können RMSL-Zeitreihen (Landsenkungen nicht berücksichtigt) für alle in Abb. 2 dargestellten Zeiträume mit hochaufgelösten Daten ermittelt werden. Im Folgenden wird die Methodik beschrieben, die verwendet wurde, um auch die langen Scheitelwertzeitreihen für die geplanten Analysen nutzbar zu machen.

3.2.1 Problemstellung und Verfahrensbeschreibung

Wie aus Abb. 3 zu entnehmen ist, können MSL-Zeitreihen nicht durch alleinige Berücksichtigung von Scheitelwerten generiert werden. Die in der Abbildung dargestellte Differenz zwischen MSL (aus hochaufgelösten Daten) und $MT^{1/2w}$ (aus Scheitelwerten) wurde bereits von LENTZ (1879) beschrieben und ergibt sich aufgrund von Verformungen der Tidewelle im Flachwasserbereich. Die Größe der Differenz zwischen MSL und $MT^{1/2w}$ ist stark abhängig von der Topographie des lokalen Küstenvorfeldes und damit sehr pegelspezifisch. Im Bereich der Deutschen Bucht ist der Effekt aufgrund der vergleichsweise geringen Wassertiefen im Küstennahbereich sehr stark ausgeprägt. Aus Vergleichsuntersuchungen im AMSeL-Projekt ergaben sich Differenzen zwischen MSL und $MT^{1/2w}$ von ca. 3 cm (Norderney) bis ca. 23 cm (Emden).

Einen Ansatz zur Berücksichtigung dieser Differenzen durch die Ermittlung und Einbeziehung so genannter k-Werte beschreibt LASSEN (1989). Der k-Wert ist dabei ein dimensionsloser Parameter, der einen Rückschluss darüber zulässt, wie stark die Tidekurve an einem bestimmten Pegel verformt

ist. Nach LASSEN (1989) errechnet sich der k -Wert für eine bestimmte Zeitspanne über folgende Gleichung:

$$k = \frac{(MThw - MSL)}{MThb} \quad (1)$$

Wobei $MThw$ gleich der Zeitreihe des mittleren Tidehochwassers und $MThb$ gleich der Zeitreihe des mittleren Tidehubs ist. Im Falle einer symmetrischen Tidekurve ergibt sich demnach ein k -Wert von 0,5. Je stärker der k -Wert nach unten abweicht, desto stärker die Verformung der Tidekurve am betrachteten Pegelstandort. Da auch der MSL in die Ermittlung der k -Werte einfließt, können beispielsweise k -Monatswerte ausschließlich für diejenigen Zeiträume ermittelt werden, für die hochaufgelöste Daten zur Verfügung stehen.

Nach der obigen Gleichung lässt sich der MSL für einen bestimmten Pegelstandort bei bekanntem k -Wert und verfügbarer Scheitelwerte über folgende Beziehung ermitteln:

$$MSL = MThw - k \cdot MThb \quad (2)$$

Um über diese Beziehung im vorliegenden Fall lange zurückreichende $RMSL$ -Zeitreihen aus den Scheitelwerten zu generieren (um diese mit den $RMSL$ -Zeitreihen aus den hochaufgelösten Daten zu kombinieren) muss die Annahme getroffen werden, dass der k -Wert keinen signifikanten zeitabhängigen Änderungen unterworfen ist und eine konstante Größe für einen betrachteten Standort darstellt. Da diese Annahme ohne weitere Untersuchungen nicht belastbar getroffen werden kann, wurden im Rahmen des $AMSeL$ -Projektes zunächst k -Monatswertzeitreihen für alle Zeiträume mit hochaufgelösten Daten ermittelt, die anschließend mit Hilfe verschiedener Tests auf Stationarität geprüft wurden (siehe Kap. 3.2.2). Durch Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit ergibt sich für die Bestimmung des k -Wertes nach Gleichung (1) folgende Beziehung:

$$k(t) = \frac{(MThw(t) - MSL(t))}{MThb(t)} \quad (3)$$

Wobei $MThw(t)$ gleich der Zeitreihe des monatlichen $MThw$, $MSL(t)$ gleich der Zeitreihe des monatlichen MSL und $MThb(t)$ gleich der Zeitreihe des monatlichen $MThb$ ist.

3.2.2 Stationaritätstests

Wie oben erwähnt, wurden im Rahmen des $AMSeL$ -Projektes verschiedene Testverfahren angewendet, um zu prüfen, ob die aus den hochaufgelösten Daten ermittelten k -Monatswertzeitreihen als stationär angenommen werden können. Ist dies der Fall, kann der mittlere k -Wert eines Pegels genutzt werden, um lange zurückreichende $RMSL$ -Zeitreihen aus den Scheitelwerten zu generieren. Im umgekehrten Fall müssen identifizierte Instationaritäten der k -Werte bei der Generierung von

RMSL-Zeitreihen berücksichtigt werden. Nach SALAS (1993) gilt eine Zeitreihe als stationär, wenn sie frei von Trends, Sprüngen und Periodizitäten ist. Um dies nachzuweisen, wurden hier insgesamt drei verschiedene statistische Testverfahren, so genannte Stationaritätstests genutzt. Dabei handelt es sich um einen 2-dimensionalen Kolmogorov-Smirnov-Test, einen Sliding-Window-Test und den Mann-Kendall-Test. Die einzelnen Testverfahren werden im Folgenden kurz erläutert und die jeweiligen Ergebnisse anhand einer ausgewählten Zeitreihe detailliert und im Anschluss im Gesamtüberblick dargestellt. Für nähere Informationen zu den genutzten Testverfahren wird auf MUDERSBACH (2010) und die darin erwähnten Literaturquellen verwiesen.

Beim 2-dimensionalen Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test) wird geprüft, ob ausgewählte Stichproben signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer kumulierten Wahrscheinlichkeiten bezogen auf eine als Referenzzeitreihe definierte Stichprobe aufweisen. Da hier immer nur eine einzelne k-Monatswertzeitreihe auf Stationarität geprüft werden soll, werden die ersten (bzw. letzten) 12 Monate als Referenzzeitreihe definiert und anschließend mit denjenigen Zeitreihen verglichen, die sich beim Verschieben des 12-monatigen Zeitfensters um je einen Monat ergeben. Da die Ergebnisse in diesem Fall relativ stark von den statistischen Eigenschaften der Referenzzeitreihe abhängen, wird der Test beidseitig durchgeführt, d.h. einmal bilden die ersten 12 Monatswerte die Referenzzeitreihe und einmal die letzten. Als Vergleichsgröße wird die maximale Differenz D_{ks} zwischen den kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen des jeweils betrachteten Zeitfensters und der Referenzzeitreihe ermittelt. Die Nullhypothese H_0 besagt dabei, dass die beiden zu vergleichenden Zeitreihen identisch sind. Sie wird beim Überschreiten festgelegter Signifikanzniveaus (in Abhängigkeit einer gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit und der Zeitfensterlänge) verworfen. Die Gegenhypothese H_1 besagt, dass die beiden zu vergleichenden Zeitreihen unterschiedlich sind. Im vorliegenden Fall werden viele 12-monatige Stichproben der verfügbaren k-Wert-Zeitreihe mit der Referenzzeitreihe (die ersten oder letzten 12 Monate) verglichen, wobei die Nullhypothese in einigen Fällen angenommen und in anderen verworfen wird. Die noch offene Frage besteht darin, ab welchem Anteil an Verwerfungen der Nullhypothese (Ablehnungsrate) eine Zeitreihe belastbar als instationär bezeichnet werden kann. Eine auf Monte-Carlo-Simulationen basierende Methode zur Bestimmung von Grenzwerten der Ablehnungsraten, bei deren Überschreiten Instationarität angenommen wird, ist in MUDERSBACH (2010) beschrieben. Dabei wurden Grenzwerte für die Ablehnungsraten im Bereich 20-30% in Abhängigkeit der Zeitfensterlänge und der Gesamtlänge der Zeitreihe ermittelt. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen, bei denen das in MUDERSBACH (2010) beschriebene Vorgehen auf Basis von k-Wert-Zeitreihen wiederholt wurde, wurden ähnliche Ablehnungsraten ermittelt. Einer konservativen Abschätzung folgend, wurde festgelegt, dass eine k-Wert-Zeitreihe beim Überschreiten einer Ablehnungsrate von 20% als instationär zu bezeichnen ist. Aus Abb. 5 ist zu erkennen, dass sich für die k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven von 1950 bis 1974 unterschiedliche Ergebnisse ergeben, je nachdem welches Zeitfenster als Referenz herangezogen wird. Liegt das Referenzzeitfenster am Anfang der Stichprobe, so ist die Ablehnungsrate $< 20\%$ und die Zeitreihe wird als stationär angenommen. Umgekehrt, wird die Ablehnungsrate von 20% überschritten, wenn das Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe liegt. Allein auf Basis dieser Ergebnisse, ist die Entscheidung, ob die zugrunde liegende Zeitreihe als stationär oder instationär anzunehmen ist, nur schwierig zu treffen. Um eine belastbare und objektive Entscheidung treffen zu können sind weitere Tests erforderlich.

Eine ähnliche, auf gleitenden Zeitfenstern basierende Vorgehensweise wie beim KS-Test wird auch beim Sliding-Window-Test genutzt (Abb. 6). In diesem Fall werden die Mittelwerte für die

Referenzstrichproben (die ersten bzw. letzten 12 Monatswerte) inklusive der 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Anschließend werden die Mittelwerte für die gleitenden 12-monatigen Zeitfenster berechnet und geprüft, wie groß der Anteil ist, der sich innerhalb der Konfidenzintervalle des Mittelwertes des Referenzzeitfensters befindet.

Auch hierzu wurden von MUDERSBACH (2010) umfangreiche Analysen basierend auf Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, mit deren Hilfe Grenzwerte für die Ablehnungsraten bzw. Überschreitungsraten bestimmt wurden. Demnach wird eine Zeitreihe als instationär angenommen, wenn die Überschreitungsrate $> 60\%$ ist. Auch dieser Wert konnte mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen auf der Basis von k-Wert-Zeitserien im Rahmen des AMSeL-Projektes bestätigt werden. Die Ergebnisse des Sliding-Window-Tests mit einer Zeitfensterlänge von 12 Monaten (Pegel Wilhelmshaven, 1950 bis 1974) sind in Abb. 6 dargestellt, wobei diese auch hier von der Lage des Referenzzeitfensters abhängen. Liegt das Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe, ergibt sich eine Überschreitungsrate $< 60\%$, liegt es am Ende ist die Überschreitungsrate $> 60\%$ und die Zeitreihe als instationär zu bewerten.

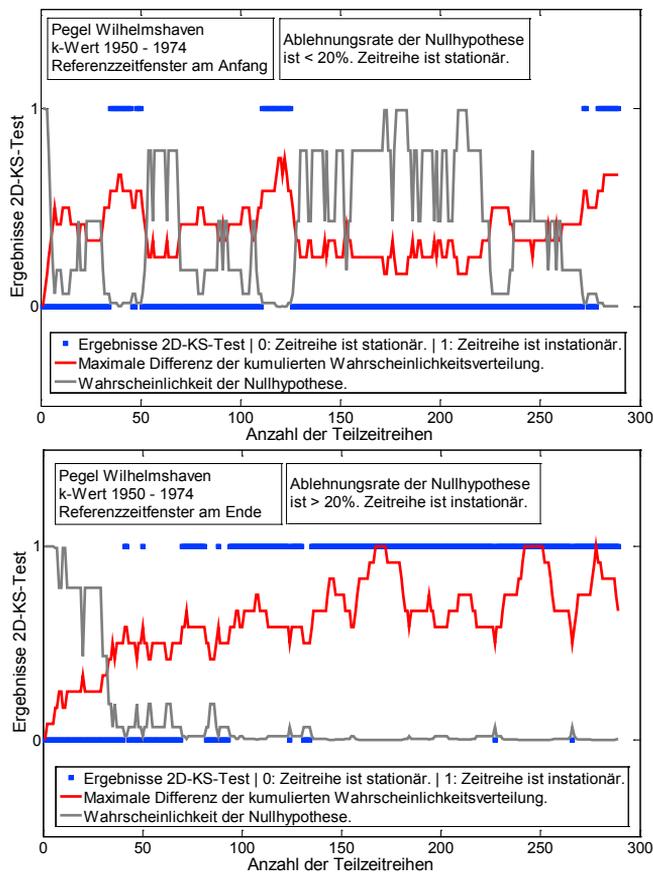


Abb. 5: Ergebnisse des KS-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitabschnitt 1950-1974 unter Berücksichtigung 12-monatiger gleitender Zeitfenster; oben: Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe; unten: Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe

Als weiterer und letzter Test wurde der Mann-Kendall-Test (MANN, 1945) auf alle zur Verfügung stehenden k-Wert-Zeitreihen angewandt. Bei diesem Test wird geprüft, ob ein signifikanter Trend in der zugrunde liegenden Zeitreihe vorhanden ist. Dabei wird das Maß τ der Abhängigkeit zwischen einzelnen Datenpaaren ermittelt und über eine Teststatistik geprüft, ob dieses Maß als signifikant zu bezeichnen ist. Abb. 7 zeigt wiederum die Ergebnisse des Tests für die k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitabschnitt 1950 bis 1974. In der Grafik ist die berücksichtigte Zeitreihe inkl. der linearen Trendfunktion dargestellt, wobei der ermittelte Trend im vorliegenden Fall gemäß Mann-Kendall-Test als signifikant zu bezeichnen ist. Würde man auf Basis dieses Tests entscheiden, wäre die Zeitreihe demnach als instationär anzunehmen.

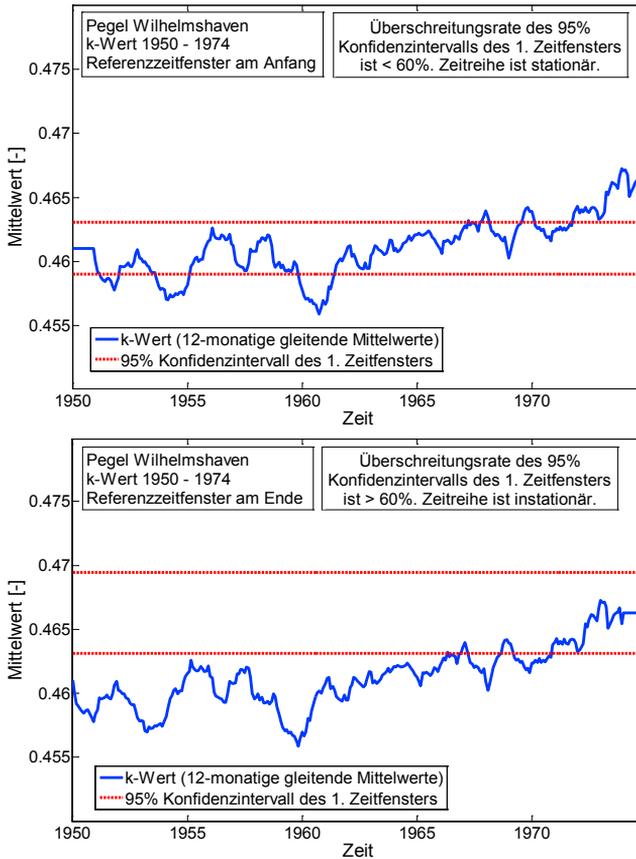


Abb. 6: Ergebnisse des Sliding-Window-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und die Zeitspanne 1950-1974 unter Berücksichtigung 12-monatiger gleitender Zeitfenster; oben: Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe; unten: Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe

Betrachtet man alle für die k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven (1950 bis 1974) erzielten Ergebnisse der Stationaritätstests, so deuten drei der Tests auf Instationarität und zwei auf Stationarität der Zeitreihe hin. Nach MUDERSBACH (2010) sollte in diesem Fall eine Entscheidung entweder auf Basis des mehrheitlichen Ereignisses getroffen werden oder der Bearbeiter nimmt eine Gewichtung der verwendeten Tests vor. Gleichzeitig werden für eine schnelle Entscheidungsfindung in der Praxis der Mann-Kendall-Test und der Sliding-Window-Test empfohlen. Bei ausschließlicher Berücksichti-

gung dieser beiden Tests würde das Ergebnis im Falle Wilhelmshaven zwei zu eins zu Gunsten der Instationarität lauten. Dementsprechend wurde die Entscheidung getroffen, dass die hier für Beispielzwecke herangezogene k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven für die Zeitspanne 1950 bis 1974 als instationär anzusehen ist (siehe auch Tab. 1), was für die spätere Ermittlung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der Scheitelwerte zu berücksichtigen ist (siehe unten).

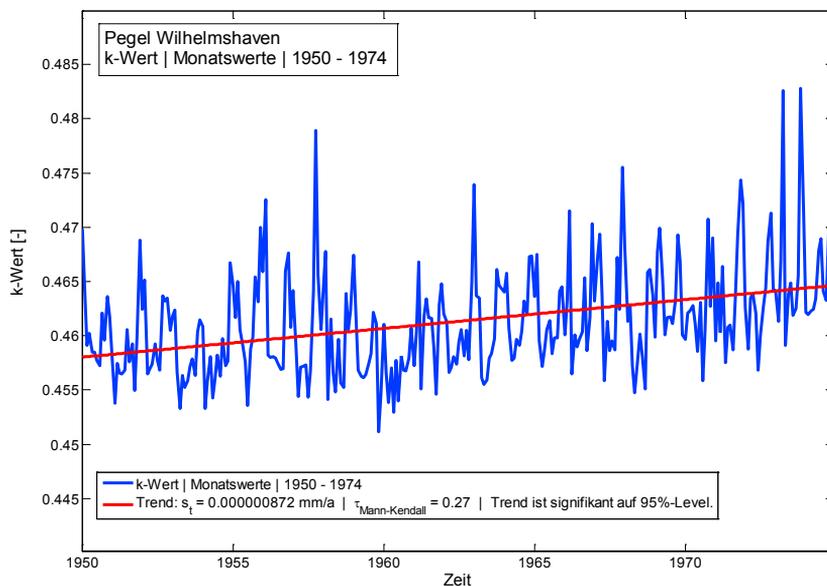


Abb. 7: Ergebnis des Mann-Kendall-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitabschnitt 1950-1974

Tab. 1 enthält eine Gesamtübersicht über die Ergebnisse, die bei den Stationaritätstests aller hier berücksichtigten Pegel und den unterschiedlichen Zeiträumen erzielt wurden. Grundsätzlich wurde die Entscheidung, ob eine Zeitreihe als stationär oder instationär anzunehmen ist, auf Basis der mehrheitlichen Ereignisse getroffen. Diesem Ansatz folgend sind alle weiteren hier analysierten Zeitreihen als stationär anzunehmen. Das bedeutet, dass ein mittlerer k-Wert aus allen Monatswerten berechnet und zur Generierung langer RMSL-Zeitreihen nach Gl. 2 genutzt werden kann.

Die Hauptunsicherheit in der beschriebenen Vorgehensweise besteht darin, dass für die meisten Pegel lediglich geprüft werden kann, ob der k-Wert über die letzten ca. 10 Jahre hinweg als stationäre Größe an dem betrachteten Ort angenommen werden kann. Wie am Beispiel Wilhelmshaven zu erkennen ist, kann es jedoch in der Vergangenheit (i.d.R. durch bauliche Eingriffe) zu Änderungen im k-Wert gekommen sein, die in diesen Fällen nicht erfasst werden. Die Digitalisierung weiterer historischer Daten in hochaufgelöster Form kann dazu beitragen, diese Unsicherheit maßgeblich zu reduzieren. Die Ergebnisse in Kap. 3.2.3 deuten darauf hin, dass die Anwendung der hier gewählten Vorgehensweise unter Berücksichtigung von auf Stationarität geprüften k-Werten gerechtfertigt ist. Es werden bessere Ergebnisse erzielt, als es der Fall wäre, wenn alternativ ausschließlich mit Tidehalbwasserzeitreihen gearbeitet würde.

In Abb. 2 sind die k-Werte dargestellt, welche für die verschiedenen Pegel ermittelt und zur Generierung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der Scheitelwerte herangezogen wurden. Wie aus den

vorangegangenen Analysen hervorgeht, wurde instationäres Verhalten der k-Werte am Pegel Wilhelmshaven festgestellt, was bei der Ermittlung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der Scheitelwerte zu berücksichtigen ist.

Dazu wurde die Zeitreihe von 1950 bis 1974 mit Hilfe des Standard-Normal-Homogeneity Tests (SNHT), einem Verfahren zur Detektion von Bruchpunkten in Zeitreihen, auf Sprünge hin untersucht. Näheres zu dem Testverfahren und dessen Anwendbarkeit im Zusammenhang mit Wasserstandszeitreihen der Deutschen Bucht ist in DANGENDORF (2010) zu finden. Die Ergebnisse in Abb. 8 deuten auf zwei Sprünge in der betrachteten Zeitreihe hin, die für die weiteren Analysen von Bedeutung sind. Diese traten im August 1972 und im September 1963 auf, wobei letzterer zumindest zeitlich mit der Ausbaggerung des Hafens 1959 bis 1963 in Verbindung gebracht werden kann (www.wsa-wilhelmshaven.de).

Tab. 1: Übersicht über die für die Untersuchungspegel und unterschiedlichen Zeiträume erzielten Ergebnisse der Stationaritätstests der k-Wert-Zeitreihen

| Pegel | Zeitraum | Mann-Kendall | Kolmogorov-Smirnov | | Sliding-Window | | Beurteilung des Verhaltens d. Zeitreihe |
|---------------|-----------|--------------|--------------------|------|----------------|------|---|
| | | - | Anfang | Ende | Anfang | Ende | |
| Bremerhaven | 1994-2008 | o | x | x | x | x | stationär |
| Cuxhaven | 1918-2008 | x | o | x | x | x | stationär** |
| | 1997-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| Dagebüll | 1997-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| Emden | 2000-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| Helgoland | 1952-1990 | o | x | x | x | x | stationär** |
| | 1997-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| Hörnum | 1999-2008 | x | x | x | x | x | stationär* |
| Husum | 1999-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| List | 1996-2008 | o | x | x | x | x | stationär |
| LT Alte Weser | 1994-2008 | x | o | x | x | x | stationär |
| Norderney | 2000-2009 | x | x | x | o | x | stationär |
| Wilhelmshaven | 1950-1974 | o | x | o | x | o | instationär* |
| | 2000-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| Wittdün | 1999-2008 | x | x | x | x | x | stationär |
| Wyk | 1994-2008 | x | x | x | x | x | stationär |

x = stationär; o = instationär

* Siehe zusätzliche Erläuterung im Text

** Siehe zusätzliche Informationen im Pegelprotokoll

Abb. 9 zeigt die gesamte k-Monatswertzeitreihe für Wilhelmshaven und die mittleren k-Werte, welche sich für unterschiedliche Zeiträume (gewählt nach Auswertung des SNHT) ergeben. Demnach wurde für die Generierung von RMSL-Zeitreihen aus den Scheitelwerten von 1975 bis 1999 ein mittlerer k-Wert von $k = 0,4670$ verwendet (siehe Abb. 2). Dieser ergibt sich aus der Mittelung der verfügbaren k-Monatswerte von August 1972 bis 2008 (siehe Abb. 9). Für die Zeitspanne vor 1950

wurde ein mittlerer k-Wert von $k = 0,4597$ zur Generierung von RMSL-Zeitreihen genutzt (siehe Abb. 2), welcher sich aus der Mittelung der k-Monatswerte von 1950 bis September 1963 ergibt (siehe Abb. 9).

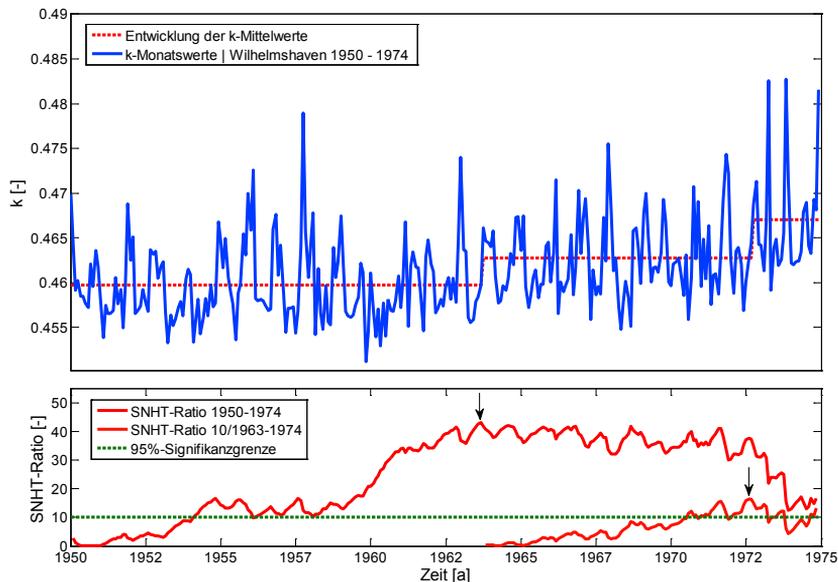


Abb. 8: Ergebnis des SNHT für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und die Zeitspanne 1950-1974

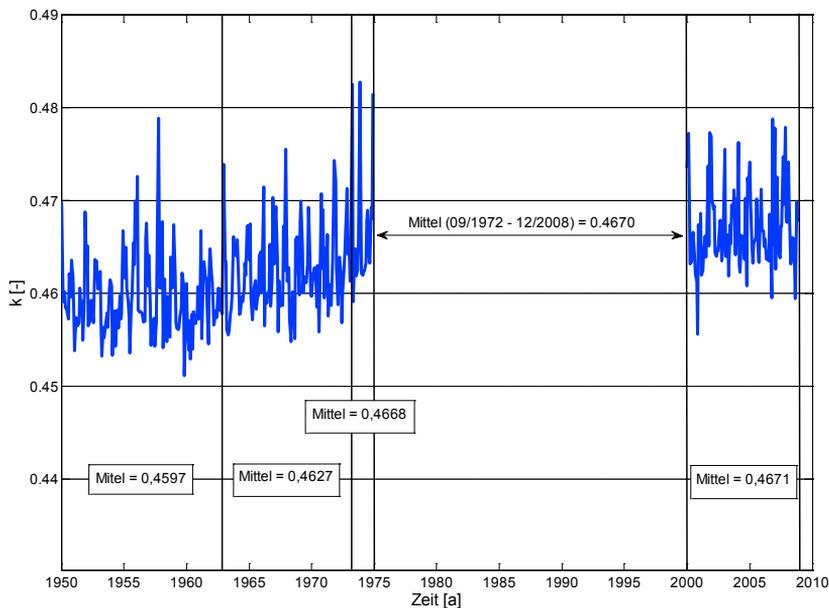


Abb. 9: Mittlere k-Werte für unterschiedliche Zeiträume am Pegel Wilhelmshaven

Neben Wilhelmshaven, ist der Pegel Hörnum der zweite Pegel, für den entsprechend der Abb. 2 unterschiedliche mittlere k -Werte für verschiedene Zeiträume berücksichtigt wurden. Wie oben erwähnt, wurden für diesen Pegel kürzlich die Daten für einzelne Jahre digitalisiert. Für diese einzelnen kurzen Zeiträume wurden keine Stationaritätstests durchgeführt, sondern visuell überprüft, ob sich ähnliche k -Werte ergeben, wie für die letzten ca. 10 Jahre. In Abb. 10 sind alle für den Pegel Hörnum ermittelten k -Monatswerte dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die k -Werte für die Jahre 1950, 1965 und 1976 auf einem niedrigeren Niveau liegen, als die k -Werte für spätere Zeiträume (1987 und 1999 bis 2008). Für die Generierung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der verfügbaren Scheitelwerte wurde ein mittlerer k -Wert von $k = 0,4442$ für den Zeitabschnitt 1937 bis 1976 und von $k = 0,4575$ für den Zeitabschnitt 1977 bis 1999 berücksichtigt (siehe auch Abb. 2). Zeitlich kann die Veränderung des k -Wertes, die zwischen 1977 und 1987 stattgefunden hat, mit dem Bau einer Mole im Hafenbereich (1974 bis 1978) in Verbindung gebracht werden. Ob dies der tatsächliche Grund für die festgestellten Änderungen ist, kann hier auf Basis der verfügbaren Daten nicht abschließend geprüft werden.

Mit Ausnahme der hier diskutierten Pegel Hörnum und Wilhelmshaven, zeigt Abb. 2 für alle anderen Pegel nur einen einzigen mittleren k -Wert, der jeweils als stationär über die gesamten betrachteten Zeiträume angenommen wurde. Diese Annahme wurde basierend auf den Ergebnissen der Stationaritätstests getroffen, welche in Tab. 1 in der Gesamtübersicht dargestellt sind. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, wurden für die Pegel Helgoland und Cuxhaven einige Auffälligkeiten bzgl. der k -Werte bzw. der zugrunde liegenden Daten festgestellt. Diese haben jedoch nicht dazu geführt, dass unterschiedliche k -Werte für unterschiedliche Zeiträume berücksichtigt wurden und werden daher an dieser Stelle nicht vertiefend erläutert. Detaillierte Informationen sind den entsprechenden Abschnitten des Pegelprotokolls (bzw. Anhang 1 des Abschlussberichtes) zu entnehmen.

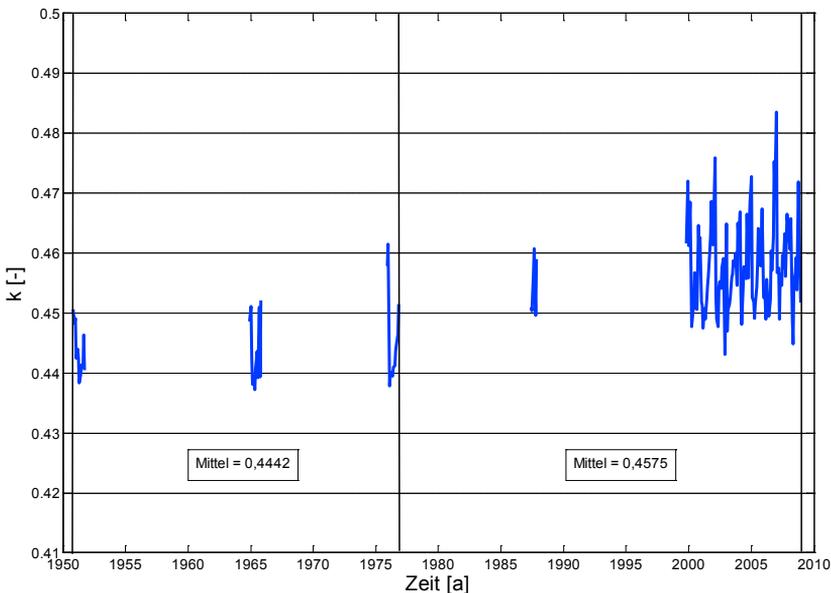


Abb. 10: Mittlere k -Werte für unterschiedliche Zeiträume am Pegel Hörnum

Mit den bis hierher dargestellten Ergebnissen und den entsprechenden Erläuterungen im Pegelprotokoll, konnten für alle Untersuchungspegel lange RMSL-Zeitreihen generiert werden, die im Folgenden für die verschiedenen Analysen genutzt werden. Obwohl auch für alle Pegel RMSL-Monatswerte generiert wurden, beschränken sich die Analysen zunächst auf die berechneten RMSL-Jahreswerte.

3.2.3 Verifikation des k-Wert Verfahrens

Bevor im nächsten Schritt die verschiedenen zur Anwendung gebrachten Analyseverfahren vorgestellt werden, soll hier der Nachweis erbracht werden, dass die oben beschriebene Vorgehensweise zur Generierung von langen RMSL-Zeitreihen zur Reduzierung der Unsicherheiten bei den späteren Analysen beiträgt.

Als alternative Vorgehensweise hätten lange relative Tidehalbwasserzeitreihen (aus Mittelung der Scheitelwerte) und/oder kurze RMSL-Zeitreihen (aus Mittelung der hochaufgelösten Daten) separat in den Analysen berücksichtigt werden können. Eine einfache Vermischung der beiden Parameter würde in jedem Fall zu falschen Ergebnissen und Rückschlüssen führen. Oben wurde bereits erwähnt, dass für die Untersuchungspegel Differenzen zwischen den beiden Parametern im Bereich 3 bis 23 cm, je nach Pegel, festgestellt wurden. Es steht außer Frage, dass ein Sprung von 23 cm, der bei der Vermischung der beiden Parameter im ungünstigsten Fall entstehen kann, die Ergebnisse (z.B. von linearen Trendanalysen) stark verfälschen würde. Bei alleiniger Berücksichtigung der meist kurzen Zeiträume mit hochaufgelösten Daten wären keine Rückschlüsse über die langfristige Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht möglich. Eine zusätzliche Einbeziehung der Scheitelwerte ist daher unerlässlich.

Abb. 11 zeigt beispielhaft den Vergleich von verschiedenen Zeitreihen für den Pegel Cuxhaven und den Zeitabschnitt 1918 bis 2008, für den sowohl Scheitelwerte als auch hochaufgelöste Daten vorliegen. Zunächst wurde die „wahre“ RMSL-Zeitreihe auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt. Diese ist zum einen der RMSL-Zeitreihe, welche sich aus dem k-Wert Verfahren (mit $k = 0,4703$) ergeben hat und zum anderen der relativen $MT^{1/2w}$ -Zeitreihe (gleichbedeutend mit $k = 0,5$) gegenübergestellt.

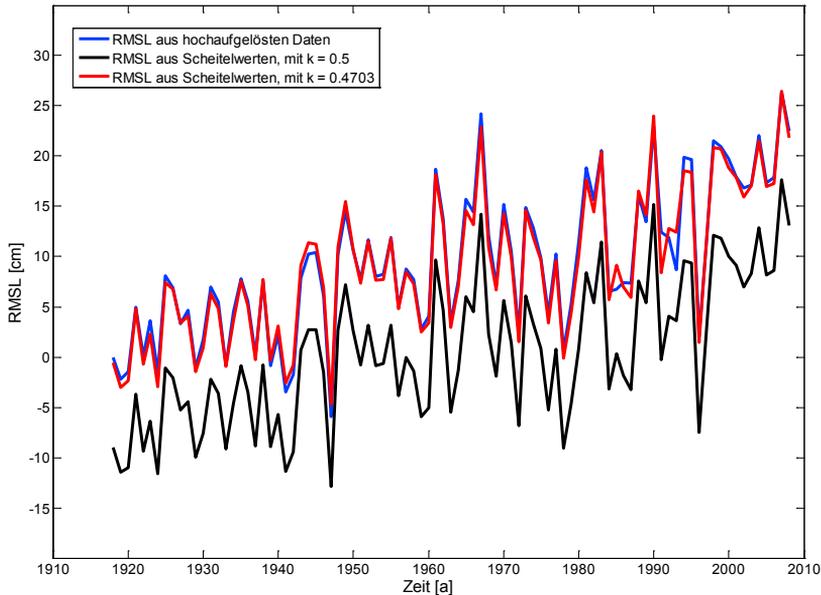


Abb. 11: Vergleich von RMSL-Zeitreihen (ermittelt aus hochaufgelösten Daten und mit $k = 0,4703$) und der relativen $MT^{1/2w}$ -Zeitreihe (gleichbedeutend mit $k = 0,5$) für den Pegel Cuxhaven von 1918 bis 2008

Die Abb. 11 zeigt deutlich den Versatz, der sich beim Vergleich der relativen $MT^{1/2w}$ -Zeitreihe und der „wahren“ RMSL-Zeitreihe ergibt. Gleichzeitig wird der Nutzen der hier gewählten Vorgehensweise unter Verwendung eines auf Stationarität geprüften k -Wertes deutlich. Die RMSL-Zeitreihe, welche mittels k -Wert Verfahren generiert wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung zu derjenigen, die auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt wurde. Die verbleibenden Differenzen sind darauf zurückzuführen, dass ein einziger als stationär angenommener mittlerer k -Wert für den gesamten Zeitabschnitt berücksichtigt wurde. Die Kombination von relativen $MT^{1/2w}$ - und RMSL-Zeitreihen ist somit unter Berücksichtigung des k -Wert Verfahrens grundsätzlich möglich.

Stehen keine hochaufgelösten Daten zur Verfügung, können lediglich $MT^{1/2w}$ -Zeitreihen generiert und analysiert werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich bei einer Tidehalbwasserzeitreihe lediglich um eine Parallelverschiebung der zugehörigen MSL-Zeitreihe handelt, die außer dem Mittelwert die gleichen statistischen Eigenschaften (z.B. Standardabweichung, linearer Trend, nicht-linearer Trend etc.) aufweist. Dieselbe Annahme wird getroffen, wenn einer $MT^{1/2w}$ -Zeitreihe ein konstanter Wert hinzuaddiert wird, um diese anschließend mit einer MSL-Zeitreihe aus hochaufgelösten Daten zu kombinieren (z.B. RAY und DOUGLAS, 2011; WOODWORTH, 1987; WÖPPELMANN et al., 2008). Dass eine $MT^{1/2w}$ -Zeitreihe nicht nur eine Parallelverschiebung der zugehörigen MSL-Zeitreihe darstellt, ergibt sich für den Bereich der Deutschen Bucht aufgrund der oben beschriebenen Verformungen der Tidekurve in Kombination mit den in der Vergangenheit stattgefundenen Änderungen in den unterschiedlichen Tideparametern. So berichten JENSEN und MUDERSBACH (2007) von einer signifikanten Zunahme des Tidehubs in der gesamten Deutschen Bucht zwischen den 1950er und 1990er Jahren, welche auf eine starke Zunahme der Tidehochwasser bei gleichzeitig geringer Zunahme (oder sogar Abnahme) der Tideniedrigwasser zurückzuführen ist. Mit Blick auf Gleichung 2 wird klar, dass sich ein solches Verhalten in unterschiedlicher Weise auf den MSL auswirkt, je

nachdem wie stark die Tidekurve an dem jeweils betrachteten Standort verformt ist. Dies lässt sich anhand der folgenden Abb. 12 veranschaulichen.

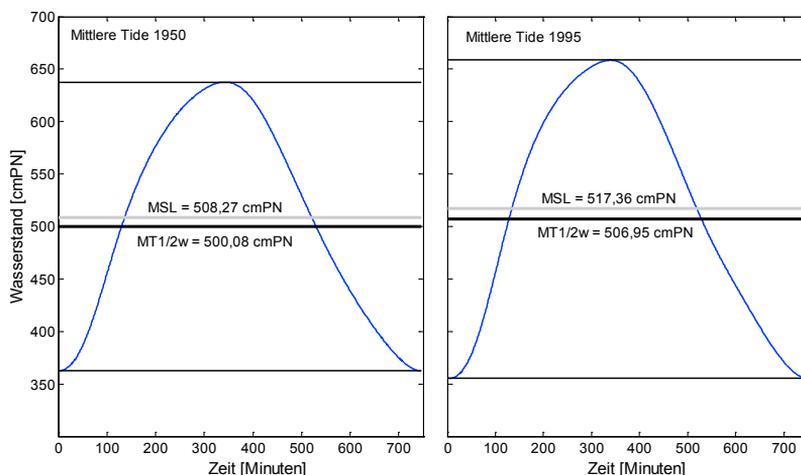


Abb. 12: Mittlere Tidekurven sowie MSL und $MT^{1/2w}$, für den Pegel Cuxhaven und die Jahre 1950 und 1995

In der Abb. 12 sind die mittleren Tidekurven (ermittelt nach LAWA 2001) für die Jahre 1950 und 1995 und den Pegel Cuxhaven dargestellt. Auf Basis der beiden mittleren Tidekurven wurden jeweils die Parameter MSL und $MT^{1/2w}$ berechnet. Dabei zeigt sich, dass die Differenz zwischen den beiden Größen von 8,19 cm in 1950 auf ca. 10,41 cm in 1995 ansteigt (in etwa die Zeitspanne der oben beschriebenen Tidehubzunahme). Hieraus ergibt sich zwangsläufig ein stärkerer Trend für den RMSL im Vergleich zum relativen $MT^{1/2w}$. Berücksichtigt man die dargestellten Änderungen und die Zeitspanne von 45 Jahren, so ergibt sich für den RMSL ein Trend von 2,02 mm/a und für das relative $MT^{1/2w}$ ein deutlich kleinerer Trend von 1,53 mm/a. Ermittelt man für beide mittlere Tidekurven zusätzlich den RMSL mittels k-Wert Verfahren (mit $k = 0,4703$), so ergibt sich ein Trend für den betrachteten Zeitabschnitt von 1,71 mm/a. Damit kann einerseits erneut der Nutzen der oben beschriebenen Vorgehensweise zur Reduzierung der Unsicherheiten nachgewiesen werden, gleichzeitig wird auch hier deutlich, dass gewisse Restunsicherheiten bestehen bleiben, die sich auf Basis der heute verfügbaren Datengrundlage nicht eliminieren lassen. Hier besteht sowohl der Bedarf an weitergehenden analytischen Betrachtungen als auch, wie oben bereits erwähnt, an weiteren hochaufgelösten Datensätzen. Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass die Frage nach der Nutzbarkeit des $MT^{1/2w}$ als Näherung für den MSL zumindest für den Bereich der Deutschen Bucht stark pegelspezifisch zu beantworten ist. Bei geringer Verformung der Tidekurve (wie z.B. in Helgoland) und einheitlicher Veränderung der Tidehoch- und Tideniedrigwasser (gleicher bzw. ähnlicher absoluter linearer Trend) können gute und für den MSL repräsentative Ergebnisse bei der Analyse von $MT^{1/2w}$ -Zeitreihen erzielt werden. Bei starker Verformung der Tidekurve (z.B. Emden) und stark unterschiedlicher Entwicklung der Tidehoch- und Tideniedrigwasser muss hingegen davon ausgegangen werden, dass eine Analyse von $MT^{1/2}$ -Zeitreihen zu anderen Ergebnissen führt, als es bei der Analyse von MSL-Zeitreihen für denselben Standort der Fall ist.

3.3 Ermittlung synthetischer Pegelzeitreihen

Neben der Analyse einzelner Pegelzeitreihen, die hier nach dem oben erläuterten Verfahren generiert wurden, kann zusätzlich die Ermittlung und Analyse einer so genannten synthetischen (oder virtuellen) Pegelzeitreihe erfolgen. Dabei handelt es sich um eine Zeitreihe, die aus einer bestimmten Anzahl von Einzelzeitreihen konstruiert wird und u.a. als repräsentativ für die stattgefundenen Änderungen in einem größeren Gebiet (oder auch global) angenommen werden kann. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Generierung einer solchen synthetischen Zeitreihe, wobei diese auf EOF-Analysen (empirische Orthogonalfunktionen, z.B. ALBRECHT et al., 2011; RAY und DOUGLAS, 2011; SCHÖNFELD und JENSEN, 1991; WOODWORTH et al., 1999) oder auf Mittelungsverfahren (z.B. BARNETT, 1984; CHURCH und WHITE, 2006; FÜHRBÖTER, 1986; JEVREJEVA et al., 2006; JENSEN und MUDERSBACH, 2007) basieren. Bei nahezu gleicher räumlicher Verteilung der berücksichtigten Pegelstandorte führen die verschiedenen Verfahren zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Im AMSeL-Projekt wurden synthetische Pegelzeitreihen mit Hilfe eines Mittelungsverfahrens generiert, welches anhand der Abb. 13 erläutert werden soll. Zunächst werden alle RMSL-Einzelzeitreihen differenziert, die bei der Konstruktion der synthetischen Zeitreihe berücksichtigt werden sollen. Hieraus ergeben sich jeweils die RMSL-Anstiegsraten zwischen zwei benachbarten Jahren und der Höhenbezug der einzelnen Zeitreihen, welcher u. U. unterschiedlich ist, hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Als nächstes wird für jedes Jahr eine mittlere Anstiegsrate aus allen Anstiegsraten der Pegel, die Daten für das betrachtete Jahr bereitstellen, ermittelt. Abb. 13 (oben) zeigt das Ergebnis dieses Rechenschrittes, wenn alle verfügbaren RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht berücksichtigt werden. Abb. 13 (mitte) zeigt die Standardabweichung, die sich bezogen auf den Mittelwert ergibt. Für die Zeitspanne vor 1900 ist die Standardabweichung gleich Null, was darauf zurückzuführen ist, dass ausschließlich der Pegel Cuxhaven für diesen frühen Zeitabschnitt Daten bereitstellt. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die synthetische Zeitreihe für die ersten Jahrzehnte der RMSL-Zeitreihe für Cuxhaven entspricht. Ab 1901 stehen zusätzlich Daten für Norderney und kurz darauf (mit einigen Lücken) für den Pegel Lt. Alte Weser zur Verfügung. Anschließend erhöht sich die Anzahl der Pegel für die Daten verfügbar sind sukzessive (siehe Abb. 13 (unten)). Mit Blick auf die Standardabweichungen zeigt sich auch hier die in Kapitel 2.4 beschriebene Unsicherheit, die in den Daten für den Zeitabschnitt vor 1936/1937 enthalten ist. Die ermittelten Standardabweichungen sind tendenziell etwas höher und zeigen eine deutlichere Schwankungsbreite auf, als es für die Zeitspanne nach 1936 der Fall ist.

Zur abschließenden Ermittlung der synthetischen Zeitreihe, welche als repräsentativ für die mittleren Änderungen des RMSL in der Deutschen Bucht angenommen wird, erfolgt eine Aufsummierung der zuvor berechneten mittleren Anstiegsraten (siehe auch Kap. 4.1).

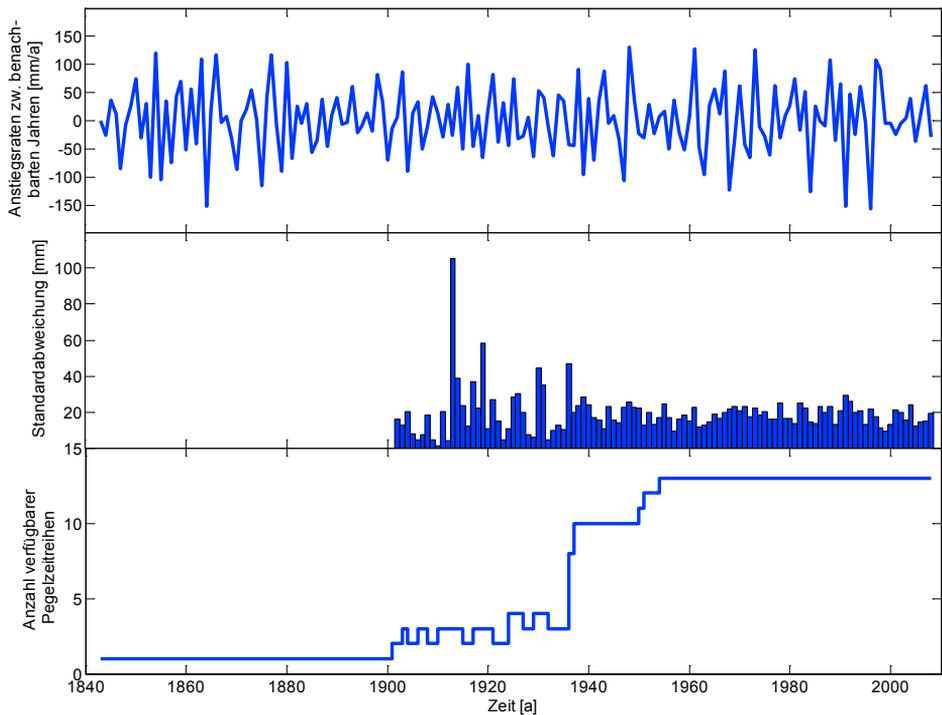


Abb. 13: Oben: Mittlere RMSL-Anstiegsraten für benachbarte Jahre, ermittelt unter Berücksichtigung aller verfügbaren RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht. Mitte: Standardabweichung über dem Mittelwert, die sich bei der Berechnung der mittleren Anstiegsraten ergibt. Unten: Anzahl der Pegel, die für das betrachtete Jahr Daten bereitstellen

3.4 Lineare Trendanalysen

Nachdem die Datengrundlage für die Analysen in Form von auf Qualität geprüften RMSL-Zeitreihen geschaffen ist, sollen in den folgenden Kapiteln die verschiedenen genutzten Analyseverfahren (betreffend den RMSL, die Verweilzeiten und die Tideketten) erläutert werden.

Zur Auswertung der RMSL-Zeitreihen wurden zunächst lineare Trendanalysen durchgeführt, die dazu dienen, die Langzeitentwicklung des RMSL für die verschiedenen Pegel zu quantifizieren. Die Ergebnisse der Einzelpegel können untereinander verglichen, aber ebenso den Ergebnissen anderer nationaler und internationaler Studien vergleichend gegenübergestellt werden. Da die Ergebnisse solcher Studien i.d.R. stark von der berücksichtigten Zeitspanne abhängen, wurden hier verschiedene Zeitabschnitte gewählt, für die lineare Trends für die Untersuchungspegel ermittelt wurden. Bei Analysen anderer Tideparameter in der Nordsee, wie dem Tideniedrigwasser, dem Tidehochwasser oder dem Tidehub erfolgen Trendanalysen i.d.R. über Zeiträume, die ein Vielfaches von 18,6 Jahren, der Periode 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 stark verfälscht sein. Aus Analysen, die im Rahmen des AMSeL-Projektes durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass der Einfluss der Nodaltide auf den RMSL im Vergleich zu den oben genannten Parametern deutlich geringer ist.

Gleichzeitig konnten zusätzliche Periodizitäten (mit Perioden im Bereich ca. 4 bis 11 Jahre) detektiert werden, die teilweise größeren Einfluss haben als die Nodaltide selbst. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde bei der Auswahl der Zeiträume für die Trendanalysen nicht in erster Linie auf die Berücksichtigung der Nodaltide-Periode geachtet. Die verwendeten Zeiträume wurden zunächst anhand der Datenverfügbarkeit und mit Blick auf die Ergebnisse anderer aktueller internationaler Studien und den dabei berücksichtigten Zeiträumen ausgewählt. Danach ergaben sich folgende Zeiträume, die für Trendanalysen herangezogen wurden: 1843 bis 2008 (Gesamtzeitabschnitt für den Daten zur Verfügung stehen); 1901 bis 2008 (Daten von 3 Pegeln verfügbar); 1937 bis 2008 (Daten von 10 Pegeln verfügbar); 1953 bis 2008 (Daten für alle Untersuchungspegel verfügbar); 1971 bis 2008 (zur Beantwortung der Frage, ob sich über die letzten Jahrzehnte höhere Trends ergeben). Betrachtet man die gewählten Zeiträume hinsichtlich ihrer Länge, so zeigt sich, dass es sich - obwohl nicht explizit berücksichtigt - in allen Fällen zumindest näherungsweise um ein vielfaches der Nodaltide-Periode von 18,6 Jahren handelt.

Es wurden keine Trends berechnet, wenn größere Lücken in der jeweiligen Zeitreihe für den betrachteten Zeitabschnitt vorhanden sind. Dies ist lediglich am Pegel Helgoland der Fall, weshalb hier nur Trends für die kürzeren Zeiträume (1953 bis 2008 und 1971 bis 2008) angegeben werden. Für alle anderen Zeitreihen liegen immer mind. 93% der Jahreswerte für die betrachteten Zeiträume vor, so dass die angegebenen Trends nicht durch fehlende Daten verfälscht sind. Zum Vergleich: HAIGH et al. (2009) verwenden einen Grenzwert von 75%, ab dem Trends für unterschiedliche Zeiträume ermittelt und als hinreichend genau angenommen werden. Zusätzlich zu den ermittelten Trends (in mm/a) sind jeweils die 1- σ Standardfehler angegeben, welche sich umgekehrt proportional zur Zeitreihenlänge verhalten. Detaillierte Analysen zum Zusammenhang zwischen Zeitreihenlänge und Unsicherheit bei der Trendermittlung haben HAIGH et al. (2009) am Beispiel einer großen Anzahl englischer Pegel durchgeführt.

3.5 Nicht-lineare Trendanalysen

Ein Nachteil der oben beschriebenen linearen Trendanalysen besteht darin, dass die zu analysierenden Zeitreihen häufig nicht sehr gut durch eine lineare Funktion beschrieben werden können. Die Güte der Anpassung einer Funktion an eine beliebige Zeitreihe kann grundsätzlich mittels RMSE (root mean squared error) quantifiziert werden. Ein großer RMSE deutet darauf hin, dass die gewählte Funktion nicht gut zu der zugrunde liegenden Zeitreihe passt. Eine Möglichkeit der Optimierung der Anpassung besteht darin, nicht-lineare Funktionen in die Betrachtungen einzubeziehen. Dabei muss die grundsätzliche Unterscheidung zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Verfahren getroffen werden.

Aus der Gruppe der nicht-linearen parametrischen Funktionen kommen bei MSL-Analysen häufig Polynomfunktionen 2. Ordnung mit der folgenden Form zur Anwendung:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

Für Vergleichszwecke wird in diesem Fall der quadratische Koeffizient a angegeben, welcher einen Hinweis auf eine ggf. vorhandene Beschleunigung in der Gesamtzeitreihe gibt (siehe z.B.

CHURCH and WHITE, 2006; JEVREJEVA et al., 2008; WAHL et al., 2011a; WOODWORTH, 1990; WOODWORTH et al., 2009). Die Anpassungsgüte ist dabei zwar i.d.R. besser, als es bei linearen Funktionen der Fall ist. Dennoch wird auch hier vorausgesetzt, dass die zu untersuchende Zeitreihe über die gesamte Zeitspanne hinweg ein und derselben Funktion folgt.

Ein großer Vorteil bei der Verwendung parametrischer Funktionen (linear oder nicht-linear) besteht darin, dass eine Extrapolation möglich ist. D.h. es kann eine Abschätzung darüber erfolgen, welche Änderungen in der Zukunft (z.B. bis zu den Jahren 2050 oder 2100) zu erwarten sind. Dabei liegt wiederum die Annahme zugrunde, dass sich ein bisher beobachteter linearer Trend oder eine bisher beobachtete Beschleunigung in der Zukunft unverändert fortsetzen.

Ein Ziel des AMSeL-Vorhabens bestand darin, zu prüfen, ob sich anhand der Beobachtungsdaten eine Beschleunigung im RMSL über die letzten Dekaden hinweg nachweisen lässt, die u.U. einem anthropogen verursachten Klimawandel zuzuschreiben ist. Hierfür sind sowohl lineare Regressionsfunktionen als auch Polynomfunktionen nur bedingt geeignet und es kommen zusätzlich nicht-parametrische Ansätze (bzw. Glättungs- oder Filterverfahren) zur Anwendung. Letztere lassen eine sehr gute Anpassung an die zugrunde liegende Datenreihe zu und sind für die Detektion von Phasen mit besonders starken oder geringen (oder auch negativen) Anstiegen des RMSL gut geeignet. Neben dem Vorteil der sehr guten Anpassung ergibt sich der Nachteil, dass eine Extrapolation nicht möglich ist.

Aus der Gruppe der nicht-parametrischen Funktionen sind in der Vergangenheit sehr häufig gleitende Mittelwerte mit einem zuvor festgelegten Zeitfenster (z.B. 19 Jahre) genutzt worden (z.B. SIEFERT und LASSEN, 1985; HAIGH et al., 2009; HOLGATE und WOODWORTH, 2004; JENSEN und MUDERSBACH, 2007). Alternativ können verschiedene Tiefpassfilter (z. B. BLASI, 1991; WOODWORTH et al., 2009) oder Ansätze basierend auf empirischen Orthogonalfunktionen (EOFs), wie Hauptkomponentenanalysen (PCA) oder singuläre Systemanalysen (SSA) (z.B. ALBRECHT et al., 2011; SCHÖNFELD und JENSEN, 1991; JENSEN et al., 1993), zur Glättung von Wasserstandszeitreihen genutzt werden. Die SSA wird von MOORE et al. (2005) als besonders geeignet beschrieben, um nicht-lineare Trends auf Basis von einzelnen Wasserstandszeitreihen zu bestimmen. Auch JEVREJEVA et al. (2006 und 2009) und RAHMSTORF et al. (2007) nutzen singuläre Systemanalysen um MSL-Zeitreihen zu analysieren. Im AMSeL-Projekt durchgeführte Vergleichsstudien haben zudem gezeigt, dass bei gleichen Randbedingungen eine bessere Anpassung mittels SSA als beispielsweise bei gleitenden Mitteln erzielt werden kann. Aus diesem Grund wurde hier die singuläre Systemanalyse zur Glättung der RMSL-Zeitreihen, sowohl der Einzelpegel, als auch der synthetischen Pegel, herangezogen. Detaillierte Informationen zur Methodik und den theoretischen Hintergründen sind z.B. GHIL et al. (2002) oder GOLYANDA et al. (2001) zu entnehmen. Ähnlich wie bei gleitenden Mitteln, bei denen eine Zeitfensterlänge zu wählen ist, muss bei der SSA eine sogenannte „embedding dimension“ vorgegeben werden. Für die hier durchgeführten Analysen wurde für die Glättung aller Zeitreihen eine „embedding dimension“ von 15 Jahren gewählt, damit ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist. Dementsprechend ergeben sich für jede Zeitreihe zunächst 15 EOFs, von denen ausschließlich diejenigen für die Rekonstruktion herangezogen werden, die Trendinformationen beinhalten. Zur Identifizierung dieser „Trend-EOFs“ werden die oben beschriebenen drei Stationaritätstests verwendet (i.d.R. wird nur die erste EOF zur Rekonstruktion genutzt).

Alle hier genannten nicht-parametrischen Verfahren weisen den Nachteil auf, dass die Glättung entsprechend der gewählten Fensterlänge (oder embedding dimension) nicht einheitlich über die

gesamte Zeitreihenlänge erfolgen kann. Bei einer Fensterlänge von beispielsweise 10 Jahren können für 9 Jahre keine Werte angegeben werden. Diese 9 Jahre können am Anfang der Zeitreihe oder am Ende oder aufgeteilt sowohl am Anfang als auch am Ende liegen. Soll die Glättung bis an die Ränder geführt werden, muss eine Gewichtung vorgenommen werden, was zwangsläufig dazu führt, dass der letzte (erste) Wert der Ausgangszeitreihe immer auch den letzten (ersten) Wert der geglätteten Zeitreihe darstellt. Aufgrund der großen Varianz, die in den RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht enthalten ist (siehe z.B. Abb. 13), würde eine solche Gewichtung u.U. signifikante Auswirkungen auf den Verlauf der geglätteten Zeitreihe zu den Rändern hin nach sich ziehen. Dies wiederum kann zu Fehlinterpretationen führen, was z.B. das Vorhandensein von Beschleunigungstendenzen in der zugrunde liegenden Zeitreihe betrifft.

Ein alternatives und in den verschiedenen Bereichen der Klimaforschung häufig genutztes Verfahren, welches eine Glättung über die gesamte Zeitreihe zulässt und dabei keine Gewichtung einzelner Werte vorsieht, besteht darin, zunächst eine Extrapolation (*engl. padding*) der Zeitreihe vorzunehmen und anschließend die Glättung durchzuführen. Verschiedene Ansätze die zur Extrapolation potenziell instationärer Zeitreihen genutzt werden können stellen z.B. MANN (2004 und 2008) und JEVREJEVA et al. (2006) vor. Diese oder ähnliche Ansätze werden u.a. auch von JANSEN et al. (2007), TRENBERTH et al. (2007) und RAHMSTORF et al. (2007) zur Glättung verschiedener Beobachtungszeitreihen genutzt. Die meisten Ansätze basieren darauf, dass in Abhängigkeit der gewählten Filterlänge eine einzige und entsprechend lange Extrapolation in die Zukunft bzw. Vergangenheit vorgenommen wird. Anschließend kann die Glättung der zugrunde liegenden Zeitreihe bis an die Ränder erfolgen. Dabei hängt der Verlauf der Glättung am Anfang und am Ende stark von der gewählten Extrapolation (z.B. nur horizontale, oder horizontale und vertikale Spiegelung der Werte im ersten/letzten Zeitfenster (MANN, 2004); Mittelwert oder linearer Trend des ersten/letzten Zeitfensters (MANN, 2004; JEVREJEVA et al., 2006)) ab. Je nach gewählter Extrapolationsmethode kann es zu einer guten aber auch schlechten Anpassung der Glättung am Anfang und/oder am Ende der Zeitreihe kommen. Bei dem von MANN (2008) beschriebenen Ansatz werden verschiedene Extrapolationsverfahren berücksichtigt und der mittlere quadratische Fehler (MSE) in die Betrachtungen einbezogen. Dadurch ist eine bessere Anpassung gewährleistet, als es bei der Berücksichtigung nur eines Extrapolationsansatzes der Fall ist.

Bei keinem in der obigen Literatur beschriebenen Verfahren wird der Tatsache Rechnung getragen, dass durch die Extrapolation Unsicherheiten in den geglätteten Zeitreihen enthalten sind, welche zu den Rändern hin zunehmen. Je mehr man sich den Rändern nähert, desto mehr Werte aus der Extrapolation gehen in die Berechnung der Glättungsfunktion ein (die Randwerte basieren zur Hälfte auf beobachteten und zur Hälfte auf extrapolierten Werten). Um diesen Effekt nicht unberücksichtigt zu lassen, wurde im Rahmen des AMSeL-Projektes ein alternativer Ansatz mit der Bezeichnung Monte-Carlo Autoregressive Padding (MCAP) entwickelt (siehe auch WAHL et al., 2010 und 2011a). Dieser wird in Kombination mit der singulären Systemanalyse (SSA) zur Glättung der generierten RMSL-Zeitreihen genutzt. Hierdurch ist zum einen eine optimale Anpassung an die zugrunde liegenden Zeitreihen gewährleistet. Zum anderen lässt die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise Rückschlüsse über die Unsicherheiten zu, welche durch die vorherige Extrapolation im Bereich der Ränder in der Glättungsfunktion enthalten sind.

Die wichtigsten Rechenschritte des MCAP-Verfahrens lassen sich anhand der Abb. 14 exemplarisch am Beispiel der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven erläutern. Zunächst wird die zu analysie-

rende RMSL-Zeitreihe trendbereinigt (Abb. 14 oben links). Dazu wird jeweils eine lineare Trendfunktion, ein Polynom 2. Ordnung und eine Exponentialfunktion an die Gesamtzeitreihe angepasst. Zur Trendbereinigung wird diejenige Funktion genutzt, die den kleinsten MSE gegenüber der Beobachtungszeitreihe aufweist. Im nächsten Schritt wird eine große Anzahl an Zeitreihen mit denselben statistischen Eigenschaften wie die Ursprungszeitreihe über ein autoregressives Modell 1. Ordnung (AR1 Modell) von der Form

$$z_t = \theta \cdot z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5)$$

generiert. Dabei ist θ der Autokorrelationsparameter und ε_t repräsentiert „weißes Rauchen“ (siehe auch SALAS et al., 1980; BOX und JENKINS, 1976; STORCH und ZWIERS, 1999). Die simulierten Zeitreihen sind jeweils um das Doppelte der gewählten Filterweite länger als die Ursprungszeitreihe. Abb. 14 (oben rechts) zeigt beispielhaft eine modellierte Zeitreihe, die sich aus dem AR-Modell für den Pegel Cuxhaven ergeben hat. Die Enden der modellierten Zeitreihen werden anschließend für die Extrapolation genutzt (Abb. 14, unten links), bevor der Eingangs eliminierte Trend wieder berücksichtigt wird (Abb. 14, unten rechts). Danach werden alle sich ergebenden Zeitreihen (i.d.R. 10.000) mittels SSA geglättet und in einem Ergebnisplot dargestellt, wobei diejenige Glättung hervorgehoben wird, die den geringsten MSE gegenüber der Beobachtungszeitreihe aufweist. Abschließend werden Anstiegsraten (in mm/a) aus der Differenzierung der geglätteten Zeitreihe ermittelt (siehe z.B. Abb. 25).

Im Folgenden soll der Nachweis erbracht werden, dass die Anwendung des hier vorgestellten MCAP-Verfahrens eine Verbesserung gegenüber den in der Literatur verfügbaren Ansätzen hinsichtlich der Anpassungsgüte der geglätteten Zeitreihen darstellt. Hierzu wird erneut die RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven herangezogen, wobei in diesem Fall ausgewählte Intervalle der Zeitreihe genutzt werden. Dadurch ist ein Vergleich mit der „wahren“ Glättung aus der singulären Systemanalyse möglich, welche ausschließlich auf Beobachtungsdaten basiert. In Abb. 15 sind die Ergebnisse für 4 Intervalle der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven dargestellt.

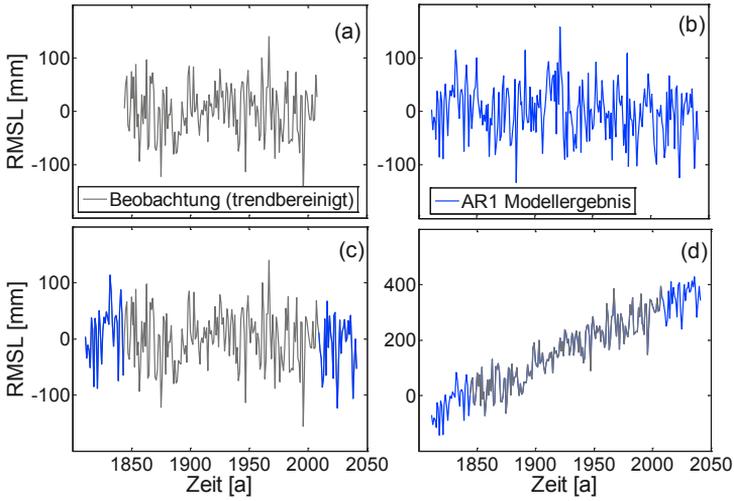


Abb. 14: Wichtige Rechenschritte beim Monte-Carlo Autoregressive Padding exemplarisch dargestellt anhand der RMSL-Zeitreihe für den Pegel Cuxhaven: oben links: trendbereinigte RMSL-Zeitreihe; oben rechts: beispielhaftes Ergebnis aus dem AR1 Modell; unten links: Extrapolation der RMSL-Zeitreihe unter Verwendung der AR1 Modellergebnisse; unten rechts: Ergebnis der Extrapolation nach Berücksichtigung des zuvor eliminierten Trends

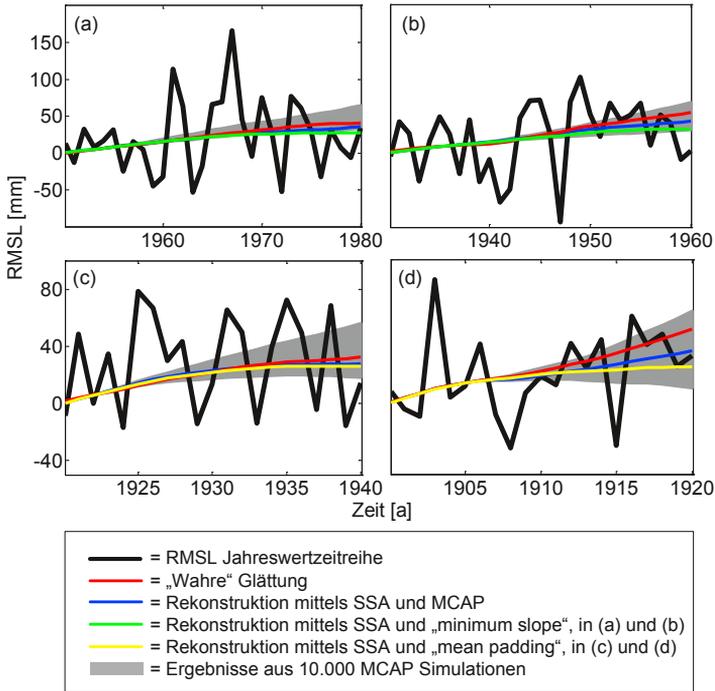


Abb. 15: Vergleich der SSA-Glättung unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze zur Extrapolation im Vergleich zur „wahren“ Glättung am Beispiel ausgewählter Intervalle der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven (oben links: 1843 bis 1980; oben rechts: 1843 bis 1960; unten links: 1843 bis 1940; unten rechts: 1843 bis 1920)

Die Zeitreihe wurde sukzessive verkürzt und endet in den Jahren 1980 (oben links), 1960 (oben rechts), 1940 (unten links) und 1920 (unten rechts). Zu Vergleichszwecken sind neben den Ergebnissen des MCAP-Verfahrens und der „wahren“ Glättung die Ergebnisse dargestellt, die mit Hilfe zweier in der Literatur beschriebener Extrapolationsverfahren erzielt wurden. Beim ‚minimum slope‘ Ansatz (TRENBERTH et al., 2007) erfolgt die Extrapolation, in dem die Werte des ersten/letzten Zeitfensters der Ausgangszeitreihe horizontal gespiegelt an die Zeitreihe angehängt werden. Beim ‚mean padding‘ Ansatz erfolgt die Extrapolation mit Hilfe des Mittelwertes der sich für den ersten/letzten Teil (in Abhängigkeit der Filterlänge) der Ausgangszeitreihe ergibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Glättung mittels MCAP-Verfahren in allen Fällen näher an der „wahren“ Glättung liegt, als es bei den hier vergleichend gegenübergestellten Ansätzen der Fall ist. Andere in der Literatur beschriebene Ansätze, die hier nicht für Vergleichszwecke genutzt wurden, führen ggf. zu ähnlichen Ergebnissen wie die MCAP-Methode. Rückschlüsse über die Unsicherheiten sind dabei jedoch grundsätzlich nicht möglich. In Abb. 15 sind als graues Band die Ergebnisse aller 10.000 MCAP-Simulationen dargestellt, wobei deutlich wird, dass der „wahre“ Verlauf der Glättung in allen hier betrachteten Fällen innerhalb dieses Bandes liegt. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Verlauf dieses „Unsicherheitsbandes“ entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise u.a. von der Funktion abhängt, welche zur Trendbereinigung der RMSL-Zeitreihe genutzt wird. Aus diesem Grund sind die dargestellten Unsicherheiten nicht mit Konfidenzintervallen zu verwechseln. Sie lassen über die Darstellung der Streubreite der Glättungen aus den MCAP-Simulationen lediglich einen Rückschluss über den Betrag der Unsicherheiten und dessen Änderung zu den Rändern hin zu.

Durch Anwendung der hier vorgestellten Methodik wird somit eine optimale (bezogen auf den MSE) Anpassung der Glättungsfunktionen an die zu analysierenden Zeitreihen erzielt und es sind Rückschlüsse über die Unsicherheiten möglich, welche sich aufgrund der Extrapolation der Zeitreihe ergeben.

Durch die Berücksichtigung sowohl linearer als auch nicht-linearer Analyseverfahren (sowohl parametrisch als auch nicht-parametrisch) konnten im Rahmen des AMSeL-Projektes neue Erkenntnisse zur Entwicklung des RMSL erzielt werden (siehe Kap. 4).

3.6 Vertikale Landbewegungen

Die im Rahmen von AMSeL durchgeführten Analysen zur langfristigen Änderung des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht basieren auf den mittels k-Wert Verfahren generierten RMSL-Zeitreihen der Einzelpegel und verschiedenen synthetischen Pegelzeitreihen. Zweifellos handelt es sich beim RMSL, als relative Änderung des Meeresspiegels gegenüber dem Land, um einen der wichtigsten Parameter für den Küstenschutz. Der Anteil an vertikalen Landbewegungen, welcher ggf. in den beobachteten Zeitreihen enthalten ist, ist hierfür zunächst von sekundärer Bedeutung. Bei der Planung von Küstenschutzmaßnahmen ist die Summe der (regionalen) Änderungen aus Vertikalbewegung des Landes und Meeresspiegeländerung zu berücksichtigen. Um die aufwendig generierten RMSL-Zeitreihen zusätzlich für Vergleiche mit globalen Meeresspiegelrekonstruktionen (hier sind Landbewegungen i.d.R. zumindest näherungsweise berücksichtigt) und die Validierung regionaler Klimamodelle nutzbar zu machen, müssen die langfristigen Vertikalbewegungen im deutschen Nordseeraum in die Betrachtungen einbezogen werden.

Bei vielen Untersuchungen der jüngeren Vergangenheit (z.B. CHURCH und WHITE, 2006; HOLLGATE und WOODWORTH, 2004; JEVEREJEVA et al., 2006 und 2008) werden Vertikalbewegungen des Landes durch die Einbeziehung von GIA (Global Isostatic Adjustment) Modellergebnissen berücksichtigt. GIA stellt die Ausgleichsbewegung des Landes als Reaktion auf das Schmelzen großer Landeismassen im Anschluss an die letzte Eiszeit dar. Dieser Effekt kann über Modelle (z.B. PELTIER, 2004) erfasst werden, repräsentiert jedoch regional ggf. nur einen kleinen Teil der tatsächlichen Vertikalbewegungen. Andere Effekte, wie z.B. Grundwasser- oder Gasentnahmen, Sedimentkompressionen oder tektonische Einflüsse können sich dem GIA-Effekt überlagern und diesen verstärken oder auch verringern. So sind für verschiedene Gebiete, wie z.B. die Megacities Tokyo, Osaka, Shanghai oder Bangkok Landsenkungen von mehreren Metern über das 20. Jahrhundert hinweg ermittelt worden (NICHOLLS, 2010). Andere Bereiche, wie beispielsweise die Südküste Schwedens, sind hingegen Landhebungserscheinungen unterworfen, die einem Meeresspiegelanstieg entgegenwirken.

In aktuelleren Studien wird immer häufiger auf direkte Messergebnisse des Continuous Global Positioning System (CGPS) zurückgegriffen, wobei kontinuierliche Messungen der Vertikalbewegungen direkt oder in unmittelbarer Nähe der Pegel erfolgen (WÖPPELMANN, 2007 und 2009; SCHÖNE et al., 2009; SUDAU und WEISS, 2011). Hierüber sind sehr genaue Abschätzungen der stattfindenden Vertikalbewegungen möglich. Unter der Annahme, dass die Bewegungen über einen längeren Zeitabschnitt hinweg annähernd linear verlaufen (SCHÖNE et al., 2009), können die verfügbaren Pegeldata um die Vertikalbewegungen korrigiert werden (z.B. WOODWORTH et al., 2009). Dies lässt beispielsweise einen belastbareren Vergleich mit den Ergebnissen zur Meeresspiegelentwicklung zu, die mit Hilfe von Klimamodellen erzielt wurden (z.B. WÖPPELMANN et al., 2009). Voraussetzung ist, dass die verfügbaren Zeitreihen aus den CGPS-Messungen lang genug sind, um einen Trend mittels Regressionsfunktion hinreichend genau bestimmen zu können. Im Bereich des deutschen Küstenraumes wurden in den letzten Jahren viele Pegel durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde mit CGPS ausgerüstet, um die am jeweiligen Ort stattfindenden Vertikalbewegungen zu messen. Aufgrund der unzureichenden Zeitreihenlänge (bei gleichzeitig starker Varianz) können jedoch bis heute keine belastbaren und für Wasserstandsanalysen nutzbare Aussagen zu den längerfristigen Vertikalbewegungen abgeleitet werden. Für die nahe Zukunft sind hier jedoch qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erwarten, die detaillierte Analysen des MSL (ohne Einfluss von Vertikalbewegungen) zulassen.

Neben den direkten Messverfahren oder der Modellierung des GIA-Effektes stellen auch geologische Untersuchungen (z.B. BUNGENSTOCK und SCHÄFER, 2009; SHENNAN und WOODWORTH, 1992) oder die Auswertungen historischer Nivellements (z.B. BEHRE, 2003) häufig die Grundlage für die Ermittlung von Vertikalbewegungen dar. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die qualitativ hochwertigen RMSL-Zeitreihen selbst für die Bestimmung vorhandener Trends der Vertikalbewegungen heranzuziehen (z.B. HAIGH et al., 2009).

Hier soll ein einfacher Ansatz genutzt werden, um zumindest eine erste Abschätzung der Vertikalbewegungen für die einzelnen Pegelstandorte vorzunehmen. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass ein für den Bereich Großbritanniens aus einer mehr als 100 Jahre langen Beobachtungszeitreihe ermittelter Trend des MSL auf den Bereich der deutschen Nordseeküste übertragbar ist. WOODWORTH et al. (2009) geben auf Basis der Analyse von Pegeldata für den Zeitabschnitt 1901 bis 2006 einen Trend von $1,4 \pm 0,2$ mm/a für den Bereich Großbritannien an, wobei vertikale Landbewegungen darin nicht enthalten sind. Dabei ist anzumerken, dass bei den Analysen in erster Linie Pegelstandorte entlang der englischen Ostküste berücksichtigt wurden und dass die Bestimmung der

Vertikalbewegungen auf Basis langer Messreihen (seit Anfang der 1990er) und geologischer Studien vergleichsweise genau erfolgen konnte.

Bei dem hier genutzten Ansatz wird zunächst ein Vergleich des von WOODWORTH et al. (2009) ermittelten Trends mit denjenigen durchgeführt, die sich für die langen RMSL-Zeitreihen der Deutschen Bucht (Lt. Alte Weser, Norderney und Cuxhaven) für den Zeitabschnitt 1901 bis 2006 ergeben. Unter Berücksichtigung der oben erläuterten Annahme kann hierdurch zunächst eine Abschätzung der vertikalen Trends für die drei langen „Referenzpegel“ in der Deutschen Bucht erfolgen. Durch den Vergleich von Trends (über gleiche Perioden), die sich für die „Referenzpegel“ und die anderen Pegel ergeben, können letztendlich vertikale Trends für alle hier berücksichtigten Untersuchungspegel angegeben werden. Die Ergebnisse können mit GIA-Modellergebnissen und denjenigen aus früheren Studien für den Bereich der deutschen Nordseeküste verglichen werden (siehe Kapitel 4.4).

Eine Unsicherheit bei der beschriebenen Vorgehensweise besteht darin, dass der Einfluss zusätzlicher atmosphärischer oder meteorologischer Prozesse unberücksichtigt bleibt. In der Literatur sind jedoch keine Hinweis darauf zu finden, dass hier Änderungen (z.B. im Luftdruck oder den Windstatistiken) über den betrachteten Zeitabschnitt stattgefunden haben, welche sich aus physikalischen Gesichtspunkten in einer signifikant unterschiedlichen Entwicklung der langfristigen MSL-Trends (> 100 Jahre) in den beiden Gebieten (englische (Ost-)Küste und Deutsche Bucht) äußern würden. Nichts desto trotz handelt es sich wie oben erwähnt um einen sehr einfachen Ansatz, der zwar eine erste ortsspezifische Abschätzung der Vertikalbewegungen direkt im Bereich der Pegel zulässt, in der Zukunft jedoch einer Verifikation mit Hilfe langer CGPS-Zeitreihen bedarf.

3.7 T i d e k e t t e n

Ziel ist es, für die ausgewählten Pegel möglichst lange und qualitativ hochwertige Tideketten-Zeitreihen zu generieren. Entgegen der Auswertungen für den MSL und auch für die Bestimmung von Verweildauern von Tidewasserständen genügen für die Ermittlung von Tideketten Zeitreihen von Tnw- und Thw-Scheiteln. Mit der Auswertung von Tideketten können unterschiedliche Beweggründe verbunden werden. Auskunft in Bezug auf Behinderung oder Verhinderung der Binnenentwässerung küstennaher Einzugsgebiete, Belastung auf Küsten, Strandabschnitte, Deckwerke, Deiche und andere Bauwerke, die Exposition von Watt und Vegetationsflächen, sowie Hinweise zur Häufigkeit und Länge von Sturmflutereignissen. Diese Beweggründe gelten konform für die im folgenden Kap. 3.8 beschriebenen Verweildauerauswertungen.

Der bei Sturmfluten, aber auch bei normalen Tiden an Deiche, Ufermauern oder ganz allgemein an der Küste angreifende Seegang wirkt im Maximum auf der Höhe des Ruhewasserspiegels. Daraus geht hervor, dass die potenzielle Gefahr des Energieeintrags aus dem Seegang an das Küstenbauwerk oder an den Strandabschnitt umso größer ist, je länger dieser auf einer bestimmten Höhenstufe angreifen kann. Die Feststellung von bestehenden Verweilzeiten des Wasserspiegels während Sturmtiden bzw. die Analyse, ob diese Verweilzeiten klare Trends aufweisen, ist deshalb von großem Interesse für den Küstenschutz. Diese Verweilzeiten können dabei in unterschiedlicher Form als Gesamtverweildauern oder relativer Zeitanteile in Bezug auf die Tidedauer aber auch als Folge von erhöhten Tiden, also Tideketten untersucht werden.

Küstenschutzbauwerke wie Deiche usw. werden im Wesentlichen durch einzelne Extremsturmfluten belastet, d.h. der Wasserstand ist in Verbindung mit dem Wellenaufbau, bzw. –überlauf maßgebend; Außensände oder die sandigen flachen Inseln werden insbesondere hinsichtlich der Sandabtragungen und des Angriffs auf den Inselsockel bzw. der Dünen vorrangig durch Seegang belastet. Daraus folgt, dass eine Vielzahl mittlerer Sturmfluten bzw. nur leicht erhöhter Tidescheitel mit entsprechenden Verweildauern für Wasserstand und Seegang deutlich größere Sandabtragungen und Erosionen des Inselsockels zur Folge haben, als eine einzelne Extremsturmflut. Solche Folgen von erhöhten Thw-Scheiteln, die die „Kante“ eines Strandabschnittes, oder an einer Hallig die Kante der Warften angreifen, werden auch als Kantenfluten bezeichnet.

Der Verlauf der Tidekurve und insbesondere die Abfolge von T_{nw}-Scheitelhöhen ist darüber hinaus von großer Bedeutung für die Entwässerungsmöglichkeit von küstennahen, tiefliegenden Einzugsgebieten, die über Sielentwässerung in freier Vorflut in ein tidebeeinflusstes Gewässer einmünden (Abb. 16). Falls kein Schöpfwerk eingesetzt ist, müssen auch höhere Abflüsse aus dem Binnenland während mehreren, evtl. ungünstigen, Tiden (d.h. hohe T_{nw}) schadlos zwischengespeichert werden können, da besonders im sturmflutgeprägtem Winterhalbjahr nicht vorausgesetzt werden kann, dass die T_{nw} stets so niedrig auflaufen, dass ein Sielzug innerhalb einer Niedrigwasserperiode möglich ist.

Die Vorflutmöglichkeit solcher Einzugsgebiete ist direkt an den Verlauf der Tidekurve gekoppelt. Ungünstige Verläufe können den Abfluss aus dem sielgesteuerten Gewässer so weit reduzieren oder gänzlich verhindern, dass es auch bei nicht als extrem anzusehenden Tidewasserständen und Abflüssen aus dem Einzugsgebiet zu signifikanten Wasserstandserhöhungen hinter dem Siel kommen kann. Für durch Mündungsschöpfwerke entwässerte Gebiete bestimmt die Tidekurve den Verlauf der geodätischen Förderhöhen und somit den aufzuwendenden Energiebedarf für die Entwässerung.

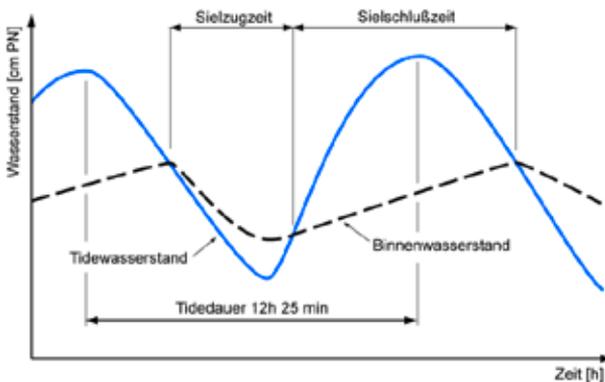


Abb. 16: Sielzug, schematisch (FRANK 2007)

Aufgrund lang anhaltender Windstau-Wetterlagen kann es vorkommen, dass das Siel über eine oder sogar mehrere Tiden hinweg geschlossen bleiben muss. Während dieser Zeitspanne muss der Abfluss aus dem Einzugsgebiet vor dem Siel gespeichert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nach langjährigen Beobachtungen häufig großer Binnenwasserandrang mit Zeiten erhöhter Tidewasserstände zusammentrifft (KRAMER, 1969), aber andererseits Siele und Schöpfwerke nicht für beliebige Extremfälle von höchsten Binnenwasserabflüssen (HHQ) und höchsten Sturmflutwasserständen

(HHThw) bemessen werden können. Ebenso kann nicht eine beliebige Anzahl von anzusetzenden „Sperrtiden“, während derer der Seilzug komplett ausfällt, angesetzt werden. Es würden sich nicht nur unwirtschaftliche Ausbaugrößen der Mündungsbauwerke, sondern auch des gesamten Vorfluternetzes ergeben.

Die Entwässerungssituation wird allerdings umso gravierender, je mehr Tiden mit erhöhten Tnw hintereinander auftreten und je größer die währenddessen in Folge überschrittenen Tnw-Höhen sind. Solche hintereinander auftretenden Folgen erhöhter Tnw-Wasserstände können als Tnw-Ketten bzw. Tnw-Folgen bezeichnet werden.

3.7.1 Begriffsbestimmung

Die Beweggründe für eine nähere Betrachtung von entsprechenden aufeinanderfolgenden Tidescheiteln, bzw. Tideketten, sind also zahlreich gegeben. Dennoch lassen sich nur sehr wenige Arbeiten finden, welche sich diesem Thema in Gänze oder schwerpunktmäßig widmen (DREBES, 1971; LÜDERS, 1973; JENSEN und SPIEB, 1996; FRANK, 2007). In anderen Veröffentlichungen oder Berichten finden sich vereinzelt Begrifflichkeiten wie Kettentide oder Tidenkette, bzw. ähnliche Sachverhalte betreffende Umschreibungen, es findet dabei aber keine klare und oft unterschiedliche Begriffsdefinition statt.

Aus diesem Grund sollen im Folgenden bisherige und in der vorliegenden Bearbeitung verwendete Tideketten, sowie die zu deren Analyse geprägten Begriffe erläutert werden.

Allgemein bezeichnet der Begriff Tidenkette eine Reihe von Tiden, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne auftreten und deren Scheitel ein bestimmtes Wasserstands-Niveau bzw. einen bestimmten Bezugshorizont überschreiten. Meist werden die Thw-Scheitel als Kriterium herangezogen, die Bedingung lässt sich allerdings auch nur für die Tnw-Scheitel oder für Tnw- und Thw-Scheitel gleichzeitig anwenden.

Eine Sturmtidenkette ist eine Tidenkette, in der die entsprechenden Thw-Scheitel oberhalb des Definitionsniveaus für zumindest eine leichte Sturmflut liegen. Die Zeitspanne, innerhalb derer diese Tidescheitel auftreten müssen, um zu einer Tidenkette zu gehören bzw. das Kettenkriterium, kann sowohl streng lückenlos aufeinanderfolgend definiert sein, als auch als Relation von der Anzahl aufgetretener (Sturm)tiden zur Zeitdauer vom ersten bis zum letzten Scheitel der so erkannten Tidenkette betrachtet werden.

Diese letzte Definition verwendet LÜDERS (1973). Motiviert durch die „ungewöhnlich langanhaltende Sturmweatherlage“ von Anfang November bis Mitte Dezember 1973 und die resultierenden Dünen- und Strandabbrüche waren es spezifisch Häufungen von Sturmtiden, deren Auftreten untersucht werden sollte. Als solches war nicht das lückenlose Aufeinanderfolgen, aber der engere zeitliche Zusammenhang der entsprechenden Sturmzeiten gefordert. Praktische Erfahrungen und Erkenntnisse, die z.B. bei Untersuchungen der Ursache von Strand- und Dünenabbrüchen gewonnen wurden, führten ihn zu der Auffassung, dass eine Sturmzeitenkette mindestens 5 Sturmzeiten enthalten muss. Diese müssen nach LÜDERS (1973) zeitlich so dicht aufeinander folgen, dass das Verhältnis der Dauer von der ersten bis zur letzten Sturmzeit zur Anzahl der Sturmzeiten einen Kennwert von 5 nicht überschreitet.

DREBES (1971) befasst sich mit Untersuchungen über die Bemessungsgrundlagen tideabhängiger Entwässerungssysteme und entwickelt auf Basis der Daten des Tidepegels Husum eine Systematik

zur Häufigkeitsermittlung der Abfolge von hintereinander auftretenden, erhöhten Tnw-Scheiteln in Zusammenhang mit gleichzeitig auftretenden Abflüssen aus dem Binnenland. FRANK (2007) schließt sich der bei DREBES (1971) getroffenen Definition und Methodik an und erweitert diese im Hinblick auf numerische Auswertung sowie integraler Betrachtung mit hydrodynamisch-numerischen Sieldurchflussmodellierung. Gerade im Hinblick der im vorhergehenden Kapitel erläuterten Entwässerungsproblematik ist nachvollziehbar, dass für das Abgrenzen einzelner Tidenkettenereignisse das strenge Kettenkriterium der lückenlosen Aufeinanderfolge der Tnw-Scheitel oberhalb des gewählten Bezugshorizonts herangezogen werden muss. Für die hier vorliegende Bearbeitung wird also der allgemeinere Begriff der Tidenkette als Oberbegriff für sogenannte Tnw- und Thw-Folgen benutzt. Die folgende Bearbeitung setzt darüber hinaus keine Sturmtidescheitel voraus, sondern es werden bereits vom Niveau des jeweiligen NNTnw bis hin zu HHThw der Untersuchungspegel entsprechende Ereignisse ausgewertet. Aufgrund der unterschiedlichen Relevanz der Tnw und Thw für die Entwässerung küstennaher Einzugsgebiete und der weiteren beschriebenen Küstenschutzaspekte findet die Auswertung überdies getrennt für Tnw-Scheitel (Tnw-Folgen) und Thw-Scheitel (Thw-Folgen), allgemein Tidescheitel-Folgen statt. Hierbei wird keine Mindestzahl von Tidescheiteln gefordert, die eine Tidescheitel-Folge aufweisen muss, um als Tidenkette-Ereignis bzw. als Tidescheitel-Folge zu gelten. Es werden aber die Folgenlängen als Folgenzahl n bestimmt. Ein einzelner Tnw- oder Thw-Scheitel ist dabei zwar noch keine Tidenkette als solches, im unteren Abschluss der Definition aber sehr wohl eine Tnw- bzw. Thw-Folge mit der Folgenzahl 1. Abb. 17 erläutert diese Definition schematisch anhand von 3 beliebig gewählten Niveaus, aus denen entsprechend dem dargestellten Tideverlauf verschiedene Tidescheitelfolgen resultieren.

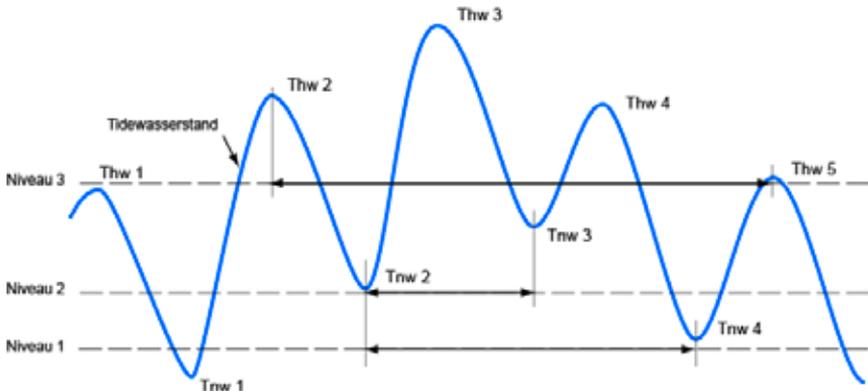


Abb. 17: Schematischer Tideverlauf und Abgrenzung von Tnw- und Thw-Folgen

Oberhalb oder genau auf dem ersten Bezugshorizont bzw. der Basishöhe Niveau 1 liegen die Tnw-Scheitel Tnw 2 bis Tnw 4 (Abb. 17). Diese drei aufeinanderfolgenden Tnw-Scheitel bilden damit eine Tnw-Folge der Folgenzahl 3. Darin eingeschlossen ist eine Tnw-Folge der Folgenzahl 2 (Tnw 2 und Tnw 3) sowie die drei einzelnen Tnw und damit Tnw-Folgen der Folgenzahl 1: Tnw 2, Tnw 3 und Tnw 4.

Oberhalb oder genau auf dem zweiten Bezugshorizont (Niveau 2) liegen nur die Tnw-Scheitel Tnw 2 und Tnw 3. Oberhalb dieses höheren Niveaus lässt sich im Auswerte-Zeitabschnitt damit eine

maximale Tnw-Folgenzahl von $n = 2$ feststellen. Gleichzeitig schließt der Zeitabschnitt zwei Tnw-Folgen der Folgenzahl 1 ein; die beiden einzelnen Tnw 2 und 3.

Für die Thw-Scheitel findet die Abgrenzung gleichermaßen statt. Z.B. lässt sich bezogen auf das Niveau 3 als längstes Ereignis eine Thw-Folge der Folgenzahl 4, bestehend aus den Thw 2 bis Thw 5 bestimmen.

3.7.2 Häufigkeitsuntersuchung von Tnw- und Thw-Folgen

Für eine Untersuchung der Häufigkeit von Tideketten werden für die zu untersuchenden Pegel Zeitreihen von täglichen Tnw-Scheitelwerten über mehrere Jahre benötigt. Basierend auf unterschiedlich vorgegebenen Höhenstufen ist nun anhand der vorgenannten Definition möglich, festzustellen, wie viele Tiden hintereinander die jeweiligen Tnw und Thw diese Basishöhe erreichen bzw. überschreiten.

Durchgeführt z.B. für das NNTnw, also das niedrigste aufgezeichnete Tideniedrigwasser, würden demzufolge alle Tnw des Untersuchungspegels oberhalb oder gleich diesen Wertes liegen und das Resultat wäre eine Tidekette, deren zugehörige Folgenzahl gleich dem Umfang der Untersuchungszeitreihe ist. Für ein einziges Jahr wären dies 705 Tnw. Durchgeführt für das HHTnw, also das höchste aufgezeichnete Tideniedrigwasser als Schwellwert, würde kein einziges Tnw darüber liegen, und das Ergebnis wäre eine „leere“ Kette. Mit den genannten Werten ist damit die maximale Spannweite einer solchen Untersuchung für die Tnw-Scheitel und sinngemäß für die Thw-Scheitel vorgegeben. Die Auflösung der Höhenstufen kann dabei beliebig fein sein und wurde für die vorliegende Untersuchung mit 1 cm sehr detailliert gewählt, um im Nachgang beliebige weitere, für die Bewertung der Binnenentwässerung oder des Küstenschutzes sinnvolle oder interessante Bezugshorizonte (konstant und zeitveränderlich), aus dieser Basisauswertung gewinnen zu können. Alle Bezugshorizonte beziehen sich dabei in der gesamten Auswertung auf die jeweiligen Pegelnullpunkte der untersuchten Pegel.

Es kann nun auf diese Weise eine Auszählung von hintereinander auftretenden Tiden durchgeführt werden, deren Tnw jeweils oberhalb einer vorgegebenen Höhenstufe liegen, und dies für alle Höhenstufen wiederholt werden. Das Ergebnis einer entsprechenden Auswertung ist eine Matrix von Ereigniszahlen, welche zeilenweise aufsteigend für die überschrittenen Höhenstufen und spaltenweise aufsteigend für die jeweiligen Folgenzahl aufgeführt sind. Eine solche Häufigkeitsmatrix ist in der folgenden Abb. 18 visualisiert. Diesem Beispiel liegt die Zeitreihe der täglichen Tnw-Scheitel des Tidepegels Cuxhaven von 1918 bis 2008 als Datenbasis zugrunde.

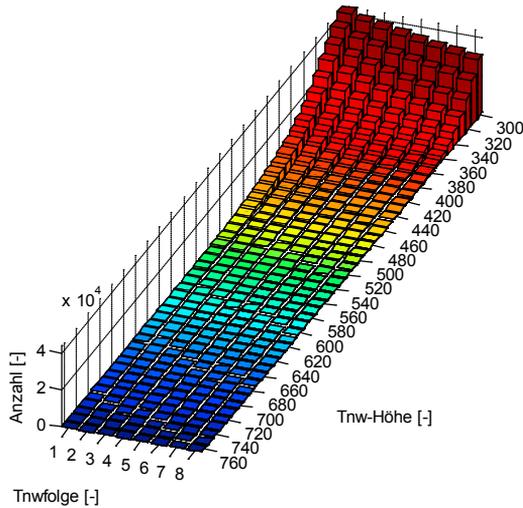


Abb. 18: Tnw-Häufigkeitsmatrix, Datenbasis: Tidepegel Cuxhaven, Zeitreihe 1918-2008

Werden nun die Zelleninhalte durch die Anzahl der Tiden pro Jahr dividiert, so wird eine Matrix von relativen Häufigkeiten pro Jahr erzeugt. Diese Reihen können entsprechend der Folgenzahl in ein Diagramm eingetragen werden, dessen Abszisse logarithmisch skaliert die Häufigkeiten, und dessen Ordinate linear die Tnw-Höhen, angeben. Das Resultat ist ein der Abb. 19 entsprechendes Ergebnis, welches Auskunft über die zu erwartende Basishöhe die durch n aufeinanderfolgende Tnw in entsprechender Häufigkeit pro Jahr zu erwarten ist, gibt, bzw. Ablesen lässt, wie häufig pro Jahr n aufeinanderfolgende Tnw zu erwarten sind, die alle ein bestimmtes Niveau überschreiten.

Aufbauend auf diese Basisauswertung lassen sich die in Kap. 5.1 und Kap. 5.2 aufgeführten Auswertungen bezüglich der Höhenentwicklung der maximalen, jährlichen Basishöhen durchführen. So zeigt Abb. 20 am Beispiel des Pegels Cuxhaven die Entwicklung der pro Kalenderjahr jeweils maximalen Basishöhe, über der mindestens ein Ketteneignis der entsprechenden Folgenzahl (von Folgenzahl 1 bis Folgenzahl 8) aufgetreten ist. Angelehnt an die übliche Konvention zur Benennung von Tideparametern bzw. Hauptwerten werden diese Jahresmaxima als H_nTnw und H_nThw bezeichnet. Der Buchstabe n steht dabei für die jeweilige Folgenzahl. Aus der Reihe der Jahres- H_nTnw und H_nThw lassen sich entsprechende Mittelwerte über unterschiedliche Auswerteziträume bilden, welche dann als MH_nTnw bzw. MH_nThw bezeichnet werden (Kap. 5.2).

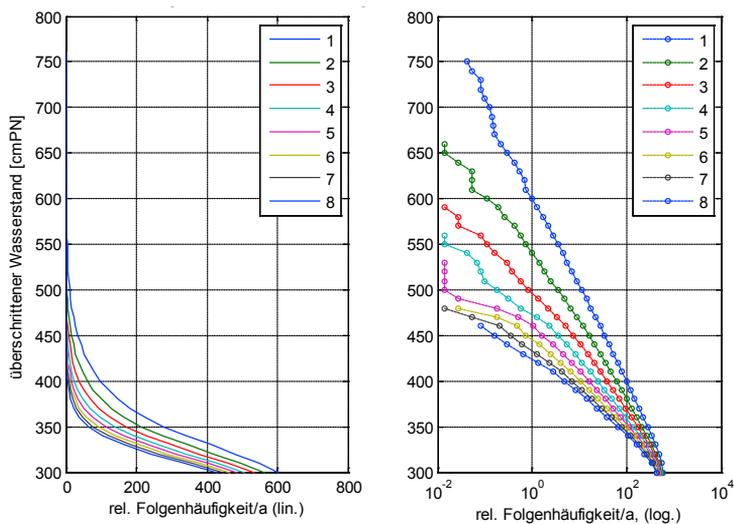


Abb. 19: Tnw-Folgen, Datenbasis: Tidepegel Cuxhaven, Zeitreihe 1918-2008

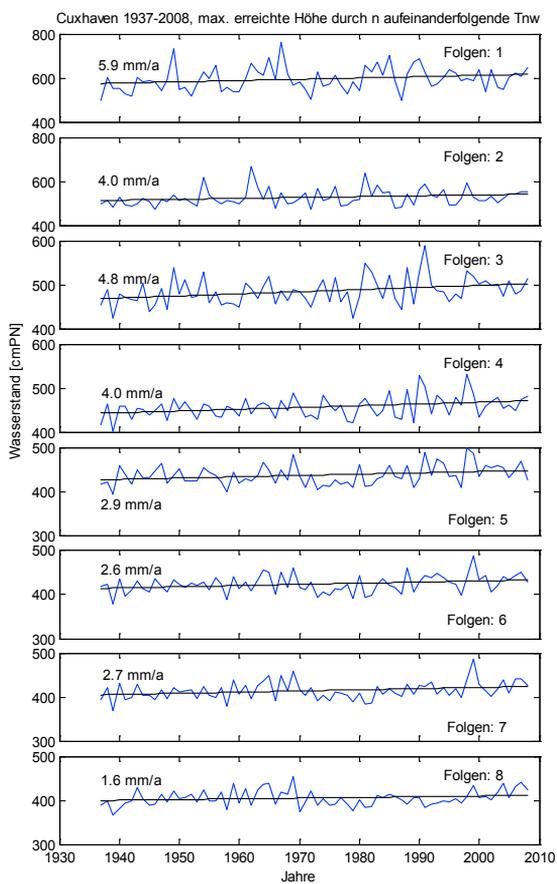


Abb. 20: Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

3.8 Verweildauern

Anfangs des Kap. 3.7 wurde bereits ausgeführt, dass für die dort genannten Fragestellungen oft gleichermaßen Tideketten und auch Verweildauern bzw. Verweilzeiten von Belang sind. Es wurde daher im Rahmen des Projektes untersucht, ob sich an den untersuchten Pegeln Veränderungen oder Verlagerungen interannueller oder intersaisonaler Art in den Verweildauern erkennen lassen und wie sich die Verweildauerverteilungen an den einzelnen Pegeln darstellen, bzw. ob und in welcher Form sich an ausgewählten Pegeln Trendentwicklungen bei der Betrachtung von Verweildauern von Sturmflutwasserständen ergeben.

3.8.1 Begriffsbestimmung

Wie auch bei den Tideketten, gibt es für Verweildauer-Untersuchungen sehr wenige verwertbare Arbeiten. FÜHRBÖTER hat sich 1979 mit Verweilzeiten und Wellenenergien befasst. Nach ihm ist die Verweildauer als diejenige Zeitdauer Δt definiert, in der sich ein Wasserstand H als Funktion der Zeit t in einem bestimmten Höhenbereich ΔH zwischen H und $H + \Delta H$ bewegt (FÜHRBÖTER, 1979).

Abb. 21 zeigt am Beispiel eines kurzen Tideverlaufs, hier der Sturmflutverlauf am Pegel Cuxhaven am Beispiel des Orkantiefs Emma, wie die Verweildauer innerhalb einer bestimmten Höhenstufe definiert ist. Die Gesamtzeit, in welcher sich der Wasserstand innerhalb der Höhenstufe befindet, wird über den jeweiligen Betrachtungs-Zeitabschnitt aufsummiert. Der Betrachtungszeitabschnitt kann dabei, wie im Beispiel gezeigt, ein einzelnes Sturmflutereignis oder auch beliebige, abgrenzbare Zeitabschnitte, z.B. Monate, Halbjahre, Kalender- oder hydrologische Jahre umfassen.

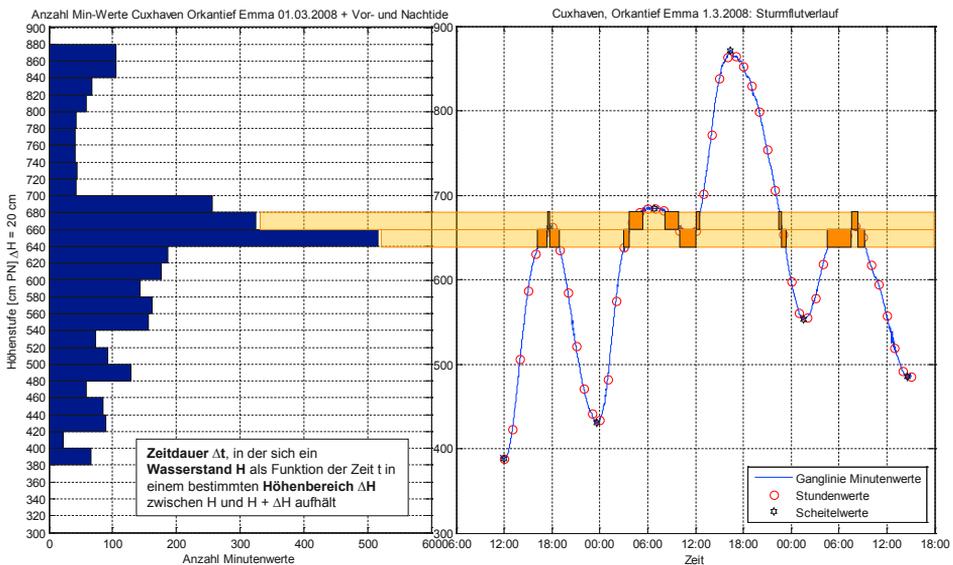


Abb. 21: Definitionsschema der Verweildauer

Die Höhe einzelner Höhenstufen ist dabei grundsätzlich frei wählbar. Sie sollte eine gute Auflösung in den interessierenden Höhenstufen bieten, dabei aber auch nicht zu fein werden. Als physika-

lich begründeter Gesichtspunkt kann zusätzlich der Aspekt der Dissipation der Energie von angreifenden Wellen auf Küstenschutzelemente dienen. FÜHRBÖTER (1979) betrachtete für seine Untersuchungen an der Nordsee Höhenstufen von 0,25 und 0,50 m und an der Ostsee 0,10, 0,25 und 0,50 m. Er bevorzugte schließlich jeweils 0,25 m sowohl für Nord- und Ostsee. Diese Stufenhöhe von $\Delta H = 0,25$ m entspricht bei Deichböschungsneigungen von etwa 1:4 bis 1:6 Längen von rund 1 m. Er führt dazu an, dass auf Flächen von Quadratmetergröße genau die Anfangsschäden entstehen, die später dann u. U. zur völligen Zerstörung der Böschung führen können; mithin wird deshalb mit der Stufenhöhe $\Delta H = 0,25$ m eine optimale Unterteilung der Gefahrenbereiche zu den einzelnen Höhen $H(t)$ erhalten.

Für die vorliegende Untersuchung wurde in gleichem Sinne eine etwas feinere Höhenstufenunterteilung von $\Delta H = 0,20$ m gewählt, da modernere Deichprofile flachere Neigungen aufweisen. Andererseits sollte die Aufteilung auch nicht zu fein werden, um über die Bandbreite von NNTnw bis HHthw nicht zu viele Stufen zu erhalten.

3.8.2 Untersuchung der Verweildauern

Es wurden aus den vorliegenden, vergleichsweise kurzen (10-12 Jahre), hoch aufgelösten Wasserstandsganglinien in Minutenauflösung Verweildauerkurven für unterschiedliche Zeiträume (Kalenderjahre, Wasserwirtschaftsjahre, Sommerhalbjahre, Winterhalbjahre) erzeugt. Abb. 22 zeigt am Beispiel des Pegels Cuxhaven im linken Teil die Verweildauern auf den unterschiedlichen Höhenstufen innerhalb eines Kalenderjahres. Im rechten Teil ist die Streuung der einzelnen Wasserstandswerte jeder Tide des gesamten Jahres dargestellt, die zu den entsprechenden Verweildauern beitragen. Um dabei noch die abnehmende Dichte von aufgetretenen Wasserständen am oberen und unteren Rand visuell erkennbar zu erhalten, wurde nur jede 25ste Minute der gesamten Tide dargestellt (blaue Punkte). Die rote Linie stellt die daraus resultierende mittlere Tide dar.

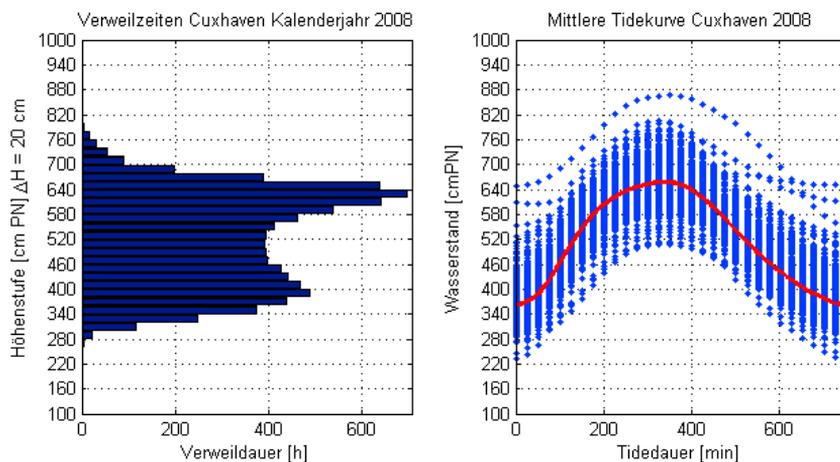


Abb. 22: Beispiel zur Verteilung von Verweilzeiten und Darstellung der Streuung aufgetretener Wasserstände in Bezug zum Tideverlauf, Pegel Cuxhaven, Kalenderjahr 2008

Diese Auswertungen sind nur für Zeitreihenabschnitte möglich, für die hochaufgelöste Wasserstandszeichnungen vorliegen. Entweder in Minutenauflösung, wie oben angeführt, oder aber mindestens in 60 Minuten-Auflösung; nur auf Basis einer Scheitelzeitreihe ist keine Bestimmung von Verweildauern möglich. Die Auswertung der Verweildauern beschränkt sich damit für fast alle untersuchten Pegel auf den Zeitabschnitt von 1994, bzw. 1997, 1999 und 2000 bis 2008. Lediglich für den Pegel Cuxhaven liegen bis 1918 zurückreichend mindestens Stundenwerte zusammenhängend digital vor (Abb. 2). Aus diesem Grund konnten aussagekräftige Untersuchungen über den Verlauf der Verweildauern nur für den Pegel Cuxhaven durchgeführt werden. Auch hier wird also die Notwendigkeit weiterer Digitalisierungskampagnen deutlich, um weitere Aussagen zu Trendverläufen von mittlerer Tide und Verweildauern für eine höhere Zahl von Pegeln ableiten zu können.

Um sicherzustellen, dass die aus 60-Minuten-Werten gewonnen Verweildauern möglichst gut mit Verweildauern gleicher Perioden, allerdings aus höher aufgelösten 1-Minuten-Werten, übereinstimmen, wurden verschiedene Untersuchungen zum Ansatz unterschiedlicher Interpolationsmethoden für die 60-Minuten-Werte durchgeführt. Abb. 23 zeigt am Beispiel des Pegels Cuxhaven die Unterschiede, welche für die Verweildauern des Kalenderjahres 2007 durch unterschiedlich zeitlich aufgelöste bzw. interpolierte Wasserstandswerte resultieren.

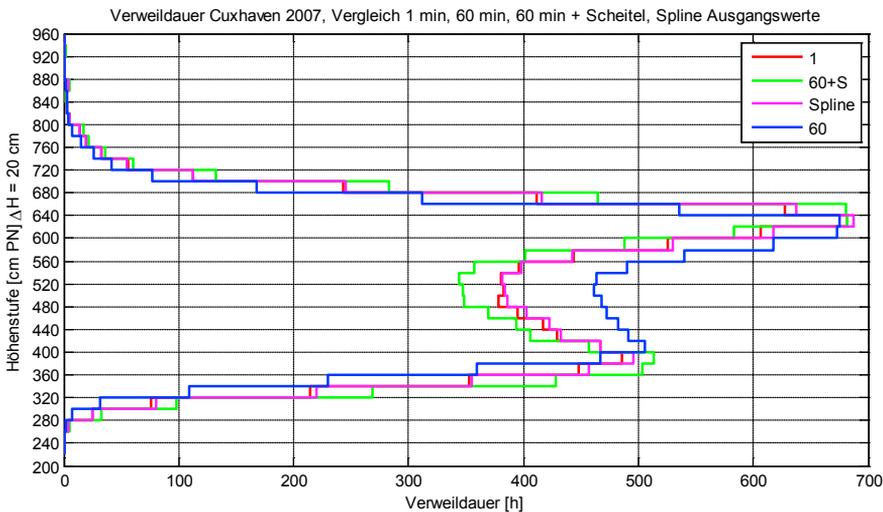


Abb. 23: Vergleich der Verweildauern resultierend aus unterschiedlichen Ausgangsdaten, 1-Minuten-Werte (rot), 60-Minuten-Werte (blau), 60-Minuten-Werte und Tidescheitel über Spline-Funktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert (grün), 60-Minuten-Werte über Spline-Funktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert (rosa)

Wie zu erkennen ist, liegen die Kurven für die hochaufgelösten 1-Minuten-Werte und die nur aus den 60-Minuten-Werten (ohne zusätzliche Berücksichtigung separater Scheitelwerte) über eine kubische Spline-Funktion interpolierten Werte nahezu deckungsgleich übereinander. Hingegen kommt es zu größeren Abweichungen, wenn bei der Interpolation auch Scheitelwerte berücksichtigt werden, die durch nahe zeitliche Lage an äquidistanten 60-Minuten-Werte Überschwingeffekte der Interpolationslösung verursachen können. Werden nur die Stundenwerte, ohne weitere Interpolation herangezogen, entstehen ebenfalls deutliche Differenzen. Aus diesem Grund wurden für die Unter-

suchung der Verweildauern des Pegels Cuxhaven alle Stundenwerte zunächst mittels kubischer Splinefunktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert.

Für die Auswertung von Verweildauern von Sturmflutwasserständen konnte darüber hinaus auf durchgehend digitalisierte Ganglinien eines Sturmflutkollektivs von 311 Ereignissen für den Pegel Cuxhaven (Zeitabschnitt 1901 bis 2008) und 199 Ereignissen für den Pegel Hörnum (Zeitabschnitt 1936 bis 2008) aus dem Projekt XtremRisK (OUMERACI et al., 2009) zurückgegriffen werden. Die entsprechenden Auswertungen finden sich im Kap. 6.

4. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert, die sich bei der Anwendung der in Kap. 3 beschriebenen Analyseverfahren unter Berücksichtigung der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht (siehe Kap. 2) ergeben haben. Die Ergebnisse, die bei den Untersuchungen zu Tideketten und Verweildauern erzielt wurden sind in den nachfolgenden Kap. 5 und 6 detailliert beschrieben.

4.1 RMSL-Zeitreihen für die einzelnen Untersuchungspegel und ausgewählte synthetische Pegelzeitreihen

In Abb. 24 sind die RMSL-Zeitreihen für die ausgewählten Untersuchungspegel dargestellt, die unter Verwendung der in den Kap. 3.1 und 3.2 beschriebenen Methodik generiert wurden. Zudem sind verschiedene synthetische Zeitreihen dargestellt, die entsprechend des in Kap. 3.3 vorgestellten Verfahrens konstruiert wurden. Neben einer synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht, wurden zwei weitere, zum einen für den Bereich Schleswig-Holstein und zum anderen für den Bereich Niedersachsen, ermittelt. Für die synthetische Zeitreihe für Schleswig-Holstein wurden die Pegeldata von List, Hörnum, Wyk, Dagebüll, Wittdün und Husum berücksichtigt. Für die synthetische Zeitreihe für Niedersachsen die Daten der Pegel Cuxhaven, Bremerhaven, Lt. Alte Weser, Wilhelmshaven, Norderney und Emden. Der Pegel Helgoland wurde lediglich bei der Generierung der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht berücksichtigt.

Betrachtet man zunächst die Zeitreihen der Einzelpegel, so bestätigt sich die gute Datenqualität für den Zeitabschnitt nach 1936 (siehe auch Kap. 2.4). Für diese Periode sind besonders hohe (z.B. 1967) oder niedrige Werte (z.B. 1996) in allen Pegelzeitreihen in ähnlicher Weise zu erkennen. Für den frühen Zeitabschnitt vor 1936 ist besonders für den Pegel Lt. Alte Weser die in Kap. 2.4 beschriebene Unsicherheit bei den Höhenbezügen zu erkennen. Bei der Generierung der synthetischen Pegel fällt dies aufgrund der hier genutzten Vorgehensweise zur Konstruktion solcher Zeitreihen jedoch nicht ins Gewicht. Zudem erfolgt die Glättung dieser Zeitreihe aufgrund der ohnehin vorhandenen Lücken erst ab 1929 (siehe Kap. 4.3). Die ermittelten linearen Trends, die den frühen Zeitabschnitt mit einschließen, sind hingegen mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

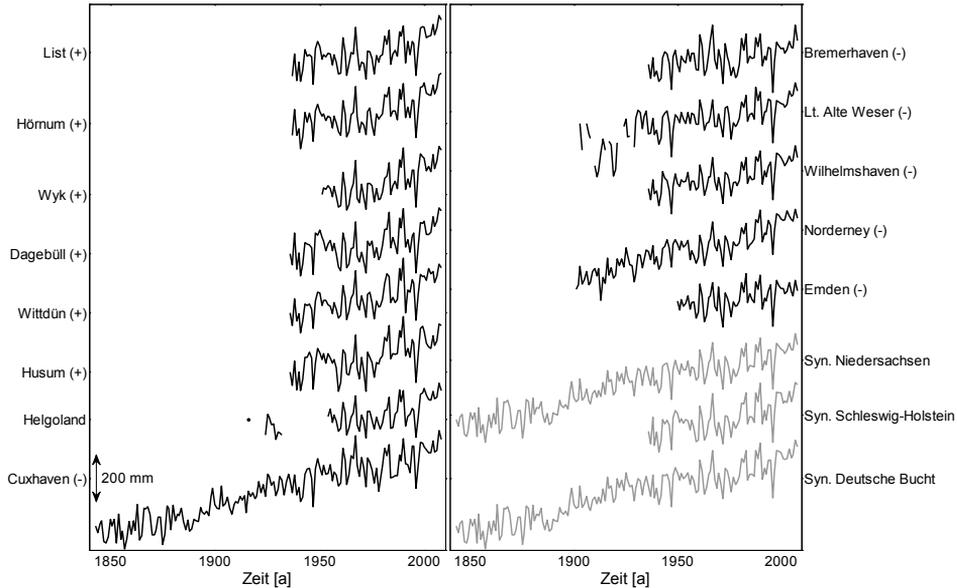


Abb. 24: RMSL-Zeitreihen für alle Untersuchungspegel und synthetische Zeitreihen für die Bereiche Schleswig-Holstein (berücksichtigte Pegel sind mit (+) gekennzeichnet), Niedersachsen (berücksichtigte Pegel sind mit (-) gekennzeichnet) und die gesamte Deutsche Bucht (alle Pegel wurden berücksichtigt)

Mit Blick auf die drei generierten synthetischen Pegelzeitreihen fällt auf, dass alle Pegel für die Daten von vor 1936 verfügbar sind, entlang der niedersächsischen Küste angeordnet sind. Aus diesem Grund entspricht die synthetische Zeitreihe für Niedersachsen in diesem Zeitabschnitt der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Für den Bereich Schleswig-Holstein sind frühestens Daten ab 1936 verfügbar. Da einige der hier berücksichtigten Pegel jedoch bereits wesentlich früher (teilweise Ende des 19. Jahrhunderts; siehe Pegelprotokoll) installiert wurden, ist grundsätzlich die Möglichkeit zur Digitalisierung weiterer Daten gegeben. Nur so können Rückschlüsse über die RMSL-Entwicklung zum Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts gezogen werden.

Die in Abb. 24 dargestellten Zeitreihen bilden die Grundlage für alle im AMSeL-Projekt durchgeführten Analysen zur Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht.

4.2 Ergebnisse linearer Trendanalysen

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der linearen Trenduntersuchungen zusammenfassend dargestellt. Wie in Kap. 3.4 beschrieben, wurden Trends sowohl für die Einzelzeitreihen, als auch die drei synthetischen Zeitreihen, für unterschiedliche Zeitperioden ermittelt. Zudem sind jeweils die $1-\sigma$ Standardfehler dargestellt (entsprechen dem 68%-Konfidenzintervall). In Klammern sind für alle Pegel und die unterschiedlichen Zeiträume die Korrelationskoeffizienten r abgebildet, die sich zwischen dem jeweiligen Pegel und der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht ergeben haben.

Zunächst sollen erneut die Ergebnisse näher betrachtet werden, die bei den Analysen der Einzelzeitreihen erzielt wurden. Für den langen Zeitabschnitt ab 1843 kann nur für den Pegel Cuxhaven ein Trend von $2,3 \pm 0,1$ mm/a ermittelt werden, und ein Vergleich zu anderen Pegeln ist in diesem

Fall nicht möglich. Für den Zeitabschnitt 1901 bis 2008 können zusätzlich Trends für die Pegel Norderney und Lt. Alte Weser angegeben werden. Der Trend, welcher sich für den Pegel Lt. Alte Weser ergibt, ist mit $1,9 \pm 0,2$ mm/a am geringsten, gefolgt von Norderney ($2,2 \pm 0,2$ mm/a) und Cuxhaven ($2,4 \pm 0,1$ mm/a). Die Ergebnisse für Norderney und Cuxhaven sind ähnlich. Betrachtet man zusätzlich die Korrelation mit dem synthetischen Pegel für die Deutsche Bucht, so ist diese für Cuxhaven und Norderney erneut ähnlich und für den Pegel Lt. Alte Weser mit $r = 0,88$ deutlich geringer. Für den Zeitabschnitt von 1937 bis 2008 können für 10 der 13 berücksichtigten Pegel Trends ermittelt werden. Auch hier zeigen sich teilweise signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Zeitreihen, die u.a. auf unterschiedliche Vertikalbewegungen an den Pegeln zurückzuführen sind. Die berechneten Trends liegen im Bereich von 1,2 bis 2,4 mm/a (Standardfehler $\approx \pm 0,3$ mm/a), wobei sich die höchsten Werte für Wittdünen und Norderney und der niedrigste für Bremerhaven ergeben. Aus der Gesamtbetrachtung ist eine leichte Tendenz dahin gehend erkennbar, dass sich höhere Trends für den Bereich Schleswig-Holstein (den östlichen Teil der Deutschen Bucht) ergeben, als es für den Bereich Niedersachsen (südlicher Teil der Deutschen Bucht) der Fall ist. Gleiches gilt für die Korrelationen mit der synthetischen Zeitreihe. Insgesamt sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten zwar sehr hoch ($> 0,9$), jedoch liegen auch diese im Mittel etwas höher für die Pegel entlang der Küste Schleswig-Holsteins.

Die zuletzt beschriebenen Effekte treten, zumindest die Trends betreffend, noch deutlicher für den Zeitabschnitt 1951 bis 2008 zu Tage. Hier können für alle Untersuchungspegel Trends angegeben werden. Gleichzeitig nimmt die Streubreite zu, die ermittelten Trends liegen zwischen 1,0 mm/a (Bremerhaven) und 2,8 mm/a (Wyk). Das gleiche Bild, nämlich tendenziell höhere Trends und leicht höhere Korrelationen für den Bereich Schleswig-Holstein, ergibt sich auch für den kürzesten hier betrachteten Zeitabschnitt von 1971 bis 2008. Die Trends, welche für diese Periode ermittelt wurden, sind deutlich höher, als für die längeren Zeiträume und liegen zwischen 2,1 mm/a (Emden) und 4,6 mm/a (Wyk). Die Standardfehler bewegen sich um $\pm 0,8$ mm/a.

Mit Blick auf die synthetischen Pegel bestätigen sich die anhand der Einzelpegel beschriebenen Änderungen. Für die längeren Zeiträume (1843-2008, 1901-2008, 1937-2008 und 1951-2008) ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede in den ermittelten Trends. Lediglich für den Zeitabschnitt 1971 bis 2008 sind signifikant höhere Trends berechnet worden. Dabei ist auch hier zu beobachten, dass sich tendenziell höhere Werte für den Bereich Schleswig-Holstein ergeben. Dies deutet darauf hin, dass entlang der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Küstenlinie andere bzw. ausgeprägtere Vertikalbewegungen vorherrschen als es bei der in Ost-West-Richtung verlaufenden Küstenlinie der Fall ist (siehe auch Kap. 4.4).

Wie in Kap. 3.4 beschrieben, können solche Ergebnisse aus linearen Trendanalysen direkt mit denjenigen aus anderen Untersuchungen verglichen werden. Dabei ist zum einen zu beachten, welche Zeiträume zugrunde liegen und zum anderen, ob Vertikalbewegungen in irgendeiner Weise berücksichtigt wurden oder nicht. So geben CHURCH und WHITE (2006) einen Trend von $1,7 \pm 0,2$ mm/a ($1-\sigma$ Standardfehler) für den globalen Meeresspiegel für das 20. Jahrhundert an. Dieser Wert wurde im Rahmen verschiedener Studien bestätigt (z.B. HOLGATE, 2007). Vertikale Landbewegungen sind näherungsweise durch die Einbeziehung von GIA-Modellergebnissen (siehe auch CHURCH et al., 2004) berücksichtigt. WÖPPELMANN et al. (2009) ermitteln unter Einbeziehung von CGPS-Daten zur Berücksichtigung von Vertikalbewegungen einen Wert von $1,61 \pm 0,19$ mm/a.

Tab. 2: Ergebnisse der linearen Trendanalysen auf Basis der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht. Mit (+) markierte Pegel sind in der synthetischen Zeitreihe Schleswig-Holstein, mit (-) markierte Pegel in der synthetischen Zeitreihe Niedersachsen inkludiert

| Pegel | Lineare trends des RMSL für verschiedene Zeitfenster $\pm 1\text{-}\sigma$ Standardfehler [mm/a] (Korrelation mit der synthetischen Zeitreihe - Deutsche Bucht) | | | | |
|--|--|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | 1843-2008 | 1901-2008 | 1937-2008 | 1951-2008 | 1971-2008 |
| List (+) | - | - | 2,0 \pm 0,3 (0,98) | 2,4 \pm 0,4 (0,98) | 4,2 \pm 0,8 (0,98) |
| Hörnum (+) | - | - | 1,8 \pm 0,3 (0,98) | 2,1 \pm 0,4 (0,98) | 3,7 \pm 0,8 (0,98) |
| Wyk (+) | - | - | - | 2,8 \pm 0,5 (0,98) | 4,6 \pm 0,8 (0,97) |
| Dagebüll (+) | - | - | 1,7 \pm 0,4 (0,95) | 2,2 \pm 0,5 (0,96) | 3,7 \pm 0,9 (0,97) |
| Wittdün (+) | - | - | 2,4 \pm 0,3 (0,97) | 2,6 \pm 0,4 (0,97) | 3,9 \pm 0,8 (0,97) |
| Husum (+) | - | - | 2,2 \pm 0,3 (0,96) | 2,5 \pm 0,5 (0,96) | 3,6 \pm 0,9 (0,97) |
| Helgoland | - | - | - | 2,1 \pm 0,4* (0,96) | 3,5 \pm 0,7 (0,96) |
| Cuxhaven (-) | 2,3 \pm 0,1 (0,99) | 2,2 \pm 0,2 (0,96) | 2,1 \pm 0,3 (0,95) | 2,0 \pm 0,4 (0,94) | 3,6 \pm 0,8 (0,94) |
| Bremerhaven (-) | - | - | 1,2 \pm 0,3 (0,92) | 1,0 \pm 0,5 (0,90) | 2,5 \pm 0,8 (0,94) |
| Lt. Alte Weser (-) | - | 1,9 \pm 0,2* (0,88) | 1,7 \pm 0,3 (0,95) | 1,7 \pm 0,4 (0,95) | 3,1 \pm 0,8 (0,96) |
| Wilhelmshaven (-) | - | - | 1,9 \pm 0,3 (0,98) | 2,0 \pm 0,4 (0,99) | 3,4 \pm 0,7 (0,99) |
| Norderney (-) | - | 2,4 \pm 0,1 (0,95) | 2,4 \pm 0,3 (0,96) | 2,8 \pm 0,4 (0,95) | 4,2 \pm 0,6 (0,96) |
| Emden (-) | - | - | - | 1,3 \pm 0,4 (0,94) | 2,1 \pm 0,7 (0,94) |
| synthetische Zeitreihe (Schleswig-Holstein) | - | - | 2,2 \pm 0,3 (0,99) | 2,5 \pm 0,4 (0,99) | 4,1 \pm 0,8 (1,00) |
| synthetische Zeitreihe (Niedersachsen) | 2,0 \pm 0,1 (1,00) | 1,7 \pm 0,1 (0,99) | 1,8 \pm 0,3 (0,99) | 1,8 \pm 0,4 (0,99) | 3,2 \pm 0,7 (0,99) |
| synthetische Zeitreihe (Deutsche Bucht) | 2,0 \pm 0,1 | 1,7 \pm 0,1 | 2,0 \pm 0,3 | 2,1 \pm 0,4 | 3,6 \pm 0,7 |

* Für einige Jahre des berücksichtigten Zeitraumes liegen keine Daten vor, es sind aber mind. 93% verfügbar

Für einen Vergleich mit den hier vorgestellten Ergebnissen ist am ehesten die synthetische Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht geeignet, welche die mittleren RMSL-Änderungen repräsentiert. Unter Verwendung dieser Zeitreihe und Berücksichtigung des Zeitabschnittes von 1901 bis 2000 ergibt sich ein Trend von $1,5 \pm 0,2$ mm/a. Dieser ist etwas niedriger, als der von CHURCH und WHITE (2006) ermittelte Wert für den globalen MSL und beinhaltet gleichzeitig noch die Landsenkungen (im Bereich von ca. $0,5 \pm 0,4$ mm/a, siehe Kap. 4.4), welche von CHURCH und WHITE (2006) bereits (zumindest näherungsweise) berücksichtigt sind. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass sich über das 20. Jahrhundert hinweg tendenziell ein geringerer MSL-Anstieg im Bereich der Deutschen Nordsee vollzogen hat, als es im globalen Mittel der Fall war.

Für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts (1904 bis 1953) ermittelt HOLGATE (2007) eine Anstiegsrate des globalen MSL (Landsenkungen durch GIA (PELTIER, 2001) berücksichtigt) von $2,03 \pm 0,35$ mm/a und für die zweite Hälfte des Jahrhunderts (1954 bis 2003) von $1,45 \pm 0,34$ mm/a. Für dieselben Zeiträume ergibt sich unter Verwendung der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht jeweils ein Trend von $2,0 \pm 0,5$ mm/a. Auch hier gilt es zu berücksichtigen, dass die vertikalen Landbewegungen in der synthetischen Zeitreihe der Deutschen Bucht noch enthalten sind. Berücksichtigt man erneut die in Kapitel 4.4 dargestellten Senkungsraten, so zeigt sich, dass die Änderungen in der Deutschen Bucht in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts geringer, in der 2. Hälfte des 20.

Jahrhunderts in etwa gleich den Änderungen waren, welche im globalen Mittel beobachtet wurden. Für die letzten 15 Jahre geben MITCHUM et al. (2010) einen Trend von $3,5 \pm 0,4$ mm/a an, welcher auf der Auswertung von Altimeterdaten beruht und somit nicht durch vertikale Landbewegungen beeinflusst ist. Aus der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht ergibt sich ein Trend von $7,3 \pm 2,1$ mm/a (siehe Abb. 26). D.h. für die letzten ca. 1,5 Dekaden zeigt sich auch bei Berücksichtigung der Vertikalbewegungen die Tendenz, dass ein stärkerer MSL-Anstieg im Bereich der deutschen Nordsee stattgefunden hat, als es im globalen Mittel der Fall war.

Für den Pegel Brest, der im engeren räumlichen Zusammenhang mit den hier untersuchten Pegeln steht, geben WÖPPELMANN et al. (2006) RMSL Trends von $1,3 \pm 0,15$ mm/a (1890 bis 1980) und $3,0 \pm 0,5$ mm/a (1980 bis 2004) an. Für die Deutsche Bucht ergeben sich für dieselben Zeiträume Trends von $1,6 \pm 0,2$ bzw. $2,0 \pm 1,5$ mm/a. Da vertikale Landbewegungen in beiden Fällen unberücksichtigt sind, kann lediglich ein Vergleich der relativen Änderungen erfolgen, wobei die Unterschiede für den Zeitabschnitt ab 1980 deutlicher sind als für den Zeitabschnitt von 1890 bis 1980. Für die niederländische Küste geben KATSMANN et al. (2008) eine konstante Anstiegsrate über das 20. Jahrhundert von $2,5 \pm 0,6$ mm/a an. Eine Beschleunigung ist demnach in den Beobachtungsdaten nicht zu erkennen. Darüber, ob Landsenkungen bei den Analysen berücksichtigt wurden wird keine Aussage getroffen, weshalb vermutet werden kann, dass dies nicht der Fall ist. Damit ergibt sich auch hier (relativ gesehen) ein stärkerer Anstieg, als es für denselben Zeitabschnitt im Bereich der Deutschen Bucht der Fall war.

Weitere Vergleiche sollen an dieser Stelle nicht erfolgen, obwohl sich in der Literatur die Ergebnisse einer Vielzahl weiterer Studien finden, welche dies zulassen würden. Wie die Ausführungen jedoch deutlich gezeigt haben, ist es unerlässlich bei solchen Vergleichsbetrachtungen die zugrunde liegenden Zeiträume zu beachten und jeweils zu prüfen, ob es sich um Analysen des RMSL oder des MSL (Landsenkungen berücksichtigt) handelt. Nur so können Rückschlüsse darüber gezogen werden, ob die Änderungen, die in zwei unterschiedlichen Gebieten beobachtet wurden ähnlich oder signifikant unterschiedlich waren.

Aus dem Vergleich einzelner Pegel entlang derselben Küstenlinie können über die Vergleiche der relativen Anstiegsraten zumindest erste Rückschlüsse darüber gezogen werden, in welchen Bereichen von stärkeren Vertikalbewegungen auszugehen ist, was eine wichtige Information für den regionalen bzw. lokalen Küstenschutz darstellt.

4.3 Ergebnisse nicht-linearer Trendanalysen

Im Folgenden sollen die Ergebnisse im Detail vorgestellt werden, die sich bei den im AMSEL-Projekt durchgeführten nicht-linearen Trendanalysen ergeben haben. Dabei soll in erster Linie geprüft werden, ob und welche Beschleunigungstendenzen (zu unterschiedlichen Zeiträumen) in den untersuchten Zeitreihen vorhanden sind. Dazu werden einige Ergebnisse aus der Anpassung von Polynomen 2. Ordnung denjenigen aus anderen Studien vergleichend gegenübergestellt, bevor die Glättungsfunktionen, die mittels SSA und MCAP für die Einzelzeitreihen und die verschiedenen synthetischen Zeitreihen bestimmt wurden (siehe Kap. 3.5) dargestellt und diskutiert werden. Zudem wurden gleitende lineare Trends für unterschiedliche Zeitperioden auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht ermittelt. Während im vorangegangenen Kapitel die Trends für

ungleich lange Zeitperioden ermittelt und verglichen wurden, werden nun also Trends über gleichlange, zeitlich gegeneinander verschobene Zeiträume berücksichtigt.

Aus ihren Analysen der globalen MSL-Änderungen, wobei sowohl Pegel- als auch Altimeterdaten berücksichtigt wurden, ermitteln CHURCH und WHITE (2006) einen quadratischen Koeffizienten von $0,0065 \pm 0,006 \text{ mm/a}^2$ aus der Anpassung eines Polynoms 2. Ordnung. Der zugrunde liegende Zeitabschnitt ist 1870 bis 2001. Für die synthetische Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht ergibt sich für den gleichen Zeitabschnitt ein negativer quadratischer Koeffizient von $-0,011 \pm 0,003 \text{ mm/a}^2$. Der Annahme folgend, dass Vertikalbewegungen über die hier betrachteten Zeiträume hinweg als linear angenommen werden können, spielt es für den Vergleich keine Rolle, ob diese berücksichtigt wurden oder nicht. Während die globale Rekonstruktion in dem betrachteten Zeitabschnitt also eine positive Beschleunigung aufweist, ergibt sich für die Rekonstruktion für die Deutsche Bucht eine negative Beschleunigung. Dies entspricht den Ergebnissen von WOODWORTH et al. (2008), die für die meisten langen europäischen Pegelzeitreihen (mit Daten ab 1870) keine oder eine leicht negative Beschleunigung feststellen. Für den Zeitabschnitt von 1901 bis 2006 ermitteln WOODWORTH et al. (2009) einen Koeffizienten von $0,0055 \pm 0,003 \text{ mm/a}^2$ auf Basis einer synthetischen Zeitreihe, die aus Pegelzeitreihen für den Bereich Großbritannien (hauptsächlich englische Ostküste) konstruiert wurde. Für die Deutsche Bucht ergibt sich ein geringerer, aber auch positiver Koeffizient von $0,0016 \pm 0,005 \text{ mm/a}^2$. Einige weitere Vergleiche quadratischer Koeffizienten, die sich bei der Anpassung von Polynomfunktionen an unterschiedliche Beobachtungszeitreihen ergeben haben, sind in WAHL et al. (2011b) zu finden.

Abb. 25 zeigt die Ergebnisse, die sich bei der Glättung (mittels SSA und MCAP) der Einzelzeitreihen ergeben haben. Links sind die jeweiligen RMSL-Jahreswertzeitreihen, die zugehörigen Glättungsfunktionen (mit kleinstem MSE gegenüber den Beobachtungen) und die Ergebnisse aller MCAP-Simulationen dargestellt. Die auf der rechten Seite abgebildeten Zeitreihen repräsentieren die (jährlichen) RMSL-Anstiegsraten, welche über die Differenzierung der jeweiligen Glättungsfunktionen bestimmt wurden.

Für die Pegel Helgoland und Lt. Alte Weser erfolgte die Glättung nur für die Zeiträume, in denen keine Lücken in den Zeitreihen vorhanden sind (Helgoland ab 1953, Lt. Alte Weser ab 1929). Anhand der Glättungsfunktionen kann für fast alle Einzelzeitreihen eine Beschleunigungstendenz seit ca. 1970 festgestellt werden, die für einige Pegel in den 1980ern nachlässt oder sich sogar umkehrt, bevor sie ab den 1990ern deutlicher als zuvor wieder einsetzt. Aus diesem Grund sind die zuletzt ermittelten Anstiegsraten für viele der berücksichtigten Pegel die höchsten, die jemals beobachtet wurden. Dies gilt in erster Linie für die Pegel, die erst ab 1936/1937, oder noch später, Daten bereitstellen. Mit Blick auf die wenigen langen Zeitreihen (in erster Linie Cuxhaven, aber auch Norderney) zeigt sich, dass um 1900 herum bereits schon einmal zumindest ähnlich hohe Anstiegsraten wie zuletzt beobachtet wurden. Hier stellt sich erneut der Bedarf an weiteren Daten dar, die dazu beitragen können, dieses Verhalten des RMSL in dem frühen Zeitabschnitt vor 1936 genauer untersuchen zu können.

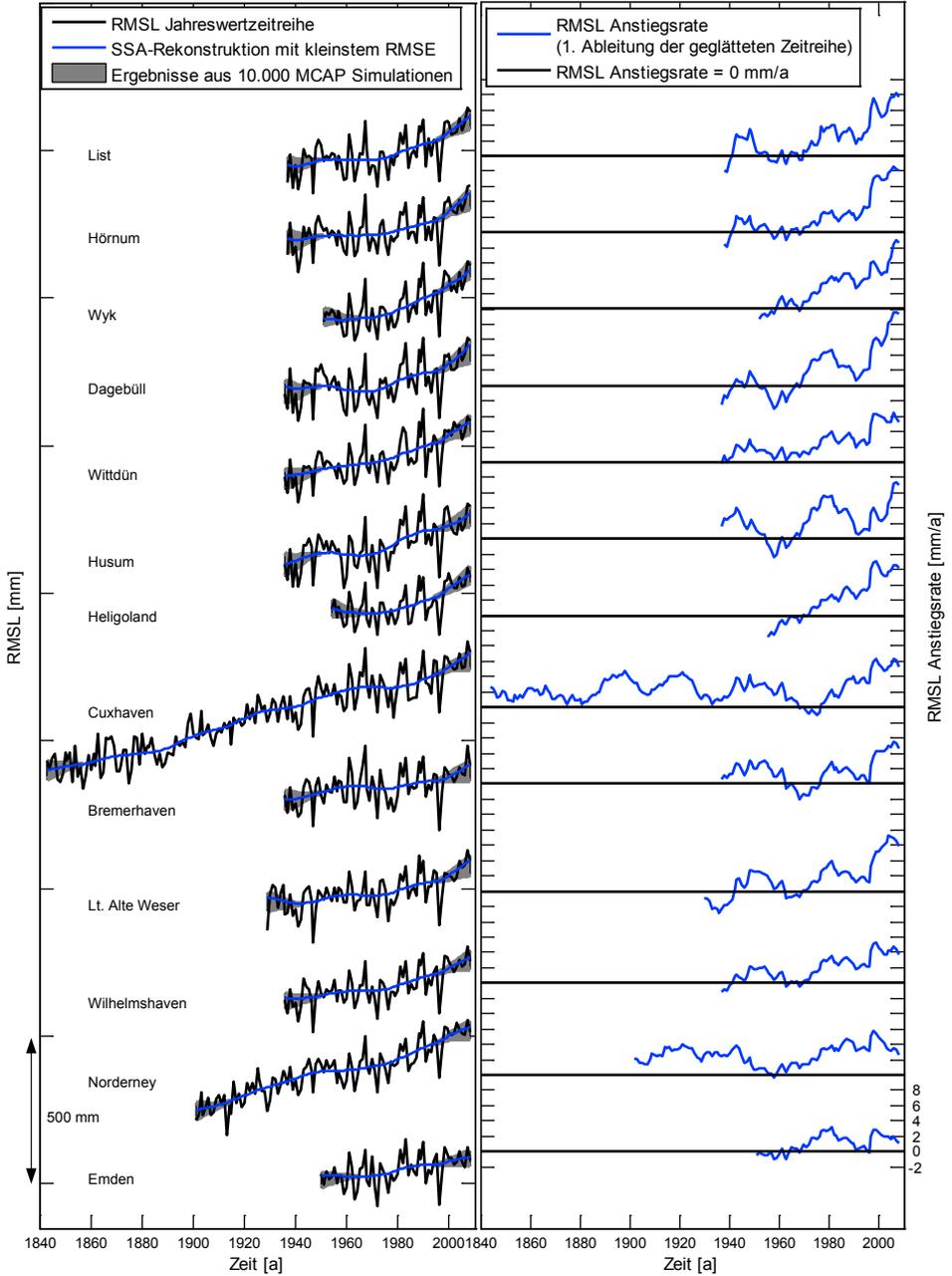


Abb. 25: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP. Links: RMSL Jahreswertzeitreihen mit Glättungsfunktion und Ergebnissen der MCAP-Simulationen. Rechts: RMSL-Anstiegsraten, ermittelt aus der Differenzierung der Glättungsfunktionen

Abb. 26 zeigt dieselben Ergebnisse für die synthetische Zeitreihe der Deutschen Bucht. Auch hier zeigen sich gegen Ende sehr hohe Anstiegsraten in der Größenordnung von ca. 5 mm/a, die das

Resultat einer Beschleunigung im RMSL-Anstieg ab ca. 1970 mit einer Intensivierung nach 1990 sind. Für den Zeitabschnitt um 1900 zeigen sich erneut ähnlich hohe Anstiegsraten wie die aktuell beobachteten. Aus diesem Grund ist die zuletzt beobachtete Beschleunigung ebenso wie die daraus resultierenden Anstiegsraten derzeit nicht als ungewöhnlich zu bezeichnen. Dennoch sind regelmäßige Aktualisierungen der hier vorgestellten Ergebnisse erforderlich, um zeitnah zu überprüfen, ob eine weitere Beschleunigung stattfindet oder gleichbleibende oder niedrigere Anstiegsraten zu beobachten sind.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den hier dargestellten Raten um jährliche Anstiegsraten handelt, welche aus den jeweiligen Glättungsfunktionen mit minimalem MSE gegenüber den Beobachtungszeitreihen ermittelt wurden. Bereits in Kap. 3.5 wurde verdeutlicht, dass die grau hinterlegten Bänder nicht mit Konfidenzintervallen o.ä. zu verwechseln sind und dass sie lediglich über die Streubreite aus den MCAP-Simulationen Rückschlüsse auf den Betrag der Unsicherheiten zulassen, welche sich aus der vorherigen Extrapolation ergeben.

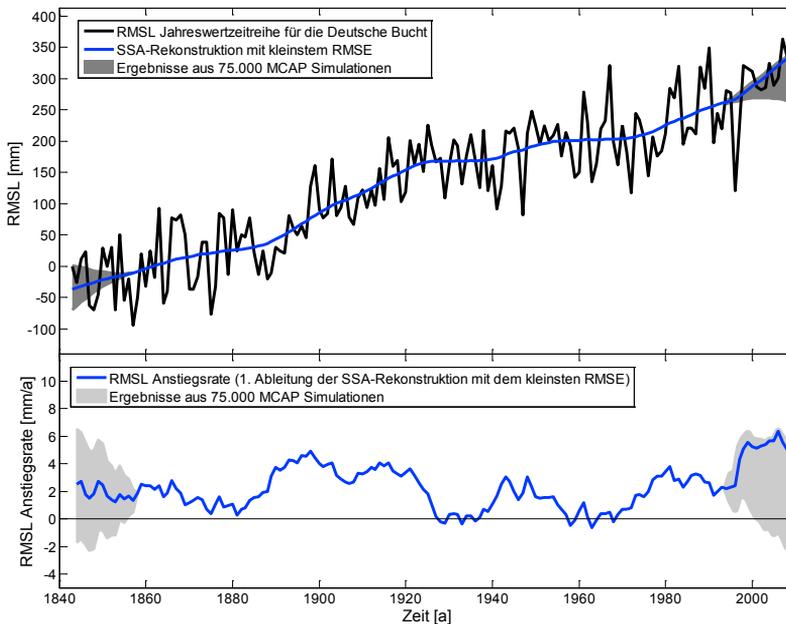


Abb. 26: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Oben: RMSL-Jahreswertzeitreihe mit Glättungsfunktion und Ergebnissen der MCAP-Simulationen. Unten: RMSL-Anstiegsraten, ermittelt aus der Differenzierung der Glättungsfunktionen aus den MCAP-Simulationen

Die bisher beschriebenen Ergebnisse bestätigen sich auch mit Blick auf die in Abb. 27 dargestellten Ergebnisse aus den Analysen gleitender linearer Trends auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht. Dargestellt sind die Zeitreihen, die sich bei der Ermittlung 20-, 30-, 40- und 50-jähriger gleitender linearer Trends ergeben. Ebenfalls abgebildet sind die 95%-Konfidenzintervalle. Die Zeitreihe, welche sich auf Basis 20-jähriger gleitender linearer Trends ergibt, zeigt sehr deutlich die ausgeprägte dekadische Variabilität, welche in den RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht vorhanden ist. Hinweise auf auffällige Beschleunigungsphasen ergeben sich in diesem Fall nicht. Für

die anderen dargestellten Zeitreihen gilt ähnliches wie für die bereits diskutierten Glättungsfunktionen. Es zeigt sich gegen Ende die Tendenz zu höheren Trends, die jedoch in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wie diejenigen, die bereits früher aufgetreten sind. Bei der zeitlichen Zuordnung muss hier die Art und Weise berücksichtigt werden, wie die Ergebnisse dargestellt sind (jeweils für das letzte Jahr des verwendeten Zeitfensters).

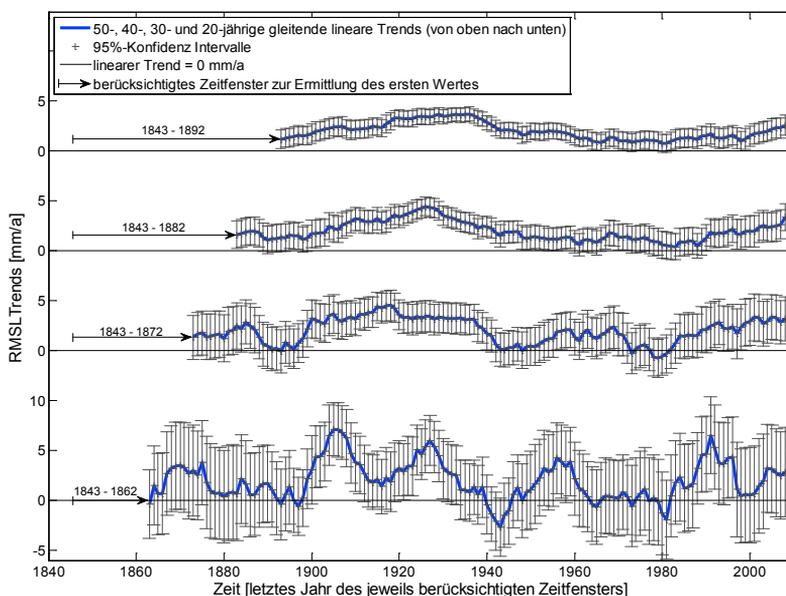


Abb. 27: Zeitreihen, die sich bei der Ermittlung gleitender linearer RMSL Trends (mit 95%-Konfidenzintervallen) über unterschiedliche Zeiträume (20, 30, 40 und 50 Jahre) auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht ergeben. Die ermittelten Trends sind jeweils für das letzte Jahr der betrachteten Zeitperiode aufgetragen (siehe Pfeile in der Grafik)

Abschließend sind in Abb. 28 die Ergebnisse dargestellt, welche sich bei der Glättung (mittels SSA und MCAP) der synthetischen Zeitreihen für die Bereiche Niedersachsen und Schleswig-Holstein ergeben haben. Dass eine solch separate Betrachtung sinnvoll ist, haben bereits die Ergebnisse gezeigt, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden. Zum einen liegen für den Bereich der östlichen Deutschen Bucht (Schleswig-Holstein) deutlich kürzere Zeitreihen vor, als es für zumindest einige Pegel entlang der südlichen Deutschen Bucht (Niedersachsen) der Fall ist. Zum anderen konnten auch Unterschiede in den RMSL-Trends festgestellt werden.

Zunächst zeigt sich auch in Abb. 28 die stark unterschiedliche Datenverfügbarkeit. Während die Rekonstruktion für Niedersachsen (aufgrund des Pegels Cuxhaven) über den gesamten Zeitabschnitt seit 1843 analysiert werden kann, beginnt die Rekonstruktion für den Bereich Schleswig-Holstein erst im Jahr 1936. Hier wird deutlich, dass ohne Berücksichtigung der Daten von vor 1936 völlig andere Rückschlüsse zu ziehen wären. Betrachtet man nur die Ergebnisse in der unteren Grafik, so muss die Beschleunigung im RMSL-Anstieg, die über die letzten Jahrzehnte hinweg stattgefunden hat, sehr wohl als auffällig und ungewöhnlich bezeichnet werden. An die Stelle eines Verzichts auf die Einbeziehung der historischen Daten aufgrund vorhandener Unsicherheiten (z.B. wegen unzureichender Höheninformationen) sollten demnach weitere Untersuchungen treten, die eine Verbesserung bzw.

Verifikation der Daten zulassen (z.B. DANGENDORF, 2010 und die darin aufgeführte Literatur). Gleichzeitig zeigen auch die Ergebnisse in Abb. 28, dass sich stärkere RMSL-Trends entlang der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden deutschen Nordseeküste ergeben. Während die zuletzt beobachteten Anstiegsraten für den Bereich Niedersachsen im Bereich von 4 bis 6 mm/a liegen, wurden für den Bereich Schleswig-Holstein Anstiegsraten im Bereich von 7 bis 8 mm/a ermittelt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich um jährliche Anstiegsraten handelt, die zwar aus einer Glättungsfunktion abgeleitet wurden, aber dennoch nicht mit einem Langzeittrend zu vergleichen oder gar für Extrapolationen über längere Zeiträume hinweg nutzbar sind.

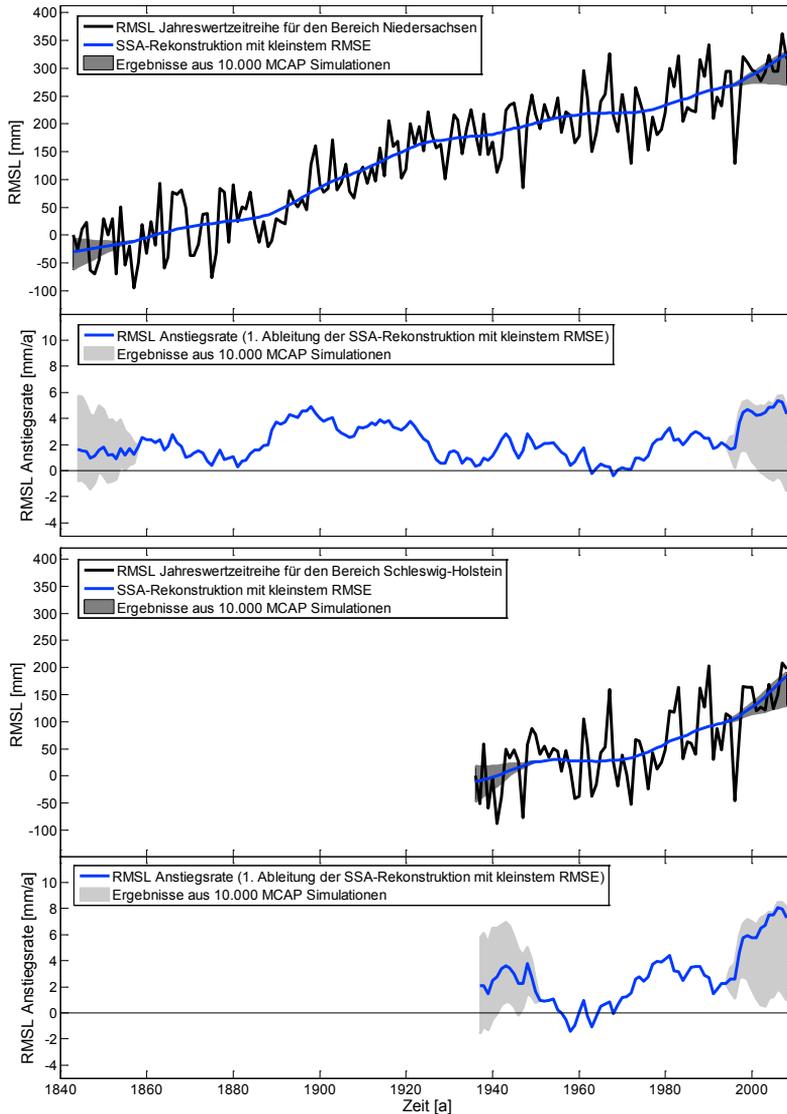


Abb. 28: RMSL Trends bei Glättung mittels SSA und MCAP der synthetischen Zeitreihen für die Bereiche Niedersachsen (oben) und Schleswig Holstein (unten)

4.4 Vertikale Landbewegungen im Bereich der Deutschen Bucht

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Ergebnisse der RMSL-Analysen im Detail vorgestellt und diskutiert wurden, sollen hier die Ergebnisse der Ermittlung der Vertikalbewegungen auf Basis der RMSL-Zeitreihen dargestellt werden. Der einfache Ansatz, der den Analysen zugrunde liegt, ist in Kap. 3.6 beschrieben.

Entsprechend dieser Herangehensweise wurden zunächst Vertikalbewegungen für die Pegel Cuxhaven, Lt. Alte Weser und Norderney ermittelt. Dazu wurden die RMSL-Trends für den Zeitabschnitt 1901 bis 2006, der auch von WOODWORTH et al. (2009) berücksichtigt wurde, von den dort angegebenen 1,4 mm/a subtrahiert. Hieraus ergeben sich für die drei „Referenzpegel“ Trends für die Vertikalbewegungen von $-0,7 \pm 0,2$ mm/a (Cuxhaven), $-0,5 \pm 0,1$ mm/a (Lt. Alte Weser) und $-0,5 \pm 0,2$ mm/a (Norderney) (negative Vorzeichen deuten auf Landsenkung hin). Unter Berücksichtigung dieser Information können alle RMSL-Trends, die für die „Referenzpegel“ und die unterschiedlichen Zeiträume in Tabelle 2 dargestellt sind, um den Einfluss der Vertikalbewegungen korrigiert werden. Aus der Mittelung der jeweils drei RMSL-Trends ergeben sich nach der Korrektur Werte von $1,4 \pm 0,3$ mm/a für den Zeitabschnitt von 1937 bis 2008 und von $1,5 \pm 0,3$ mm/a für den Zeitabschnitt von 1951 bis 2008. Aus dem Vergleich mit den RMSL-Trends, die sich für die anderen Pegel und die entsprechenden Zeiträume ergeben, können Rückschlüsse über die dort vorherrschenden vertikalen Landbewegungen gezogen werden. Dabei wird jeweils der längste Zeitabschnitt genutzt, für den in Tabelle 2 ein Wert angegeben ist. Im Falle des Pegels List beispielsweise wurde ein RMSL-Trend von $2,0 \pm 0,3$ mm/a für den Zeitabschnitt von 1937 bis 2008 ermittelt. Aus dem Vergleich mit dem gemittelten und um die Vertikalbewegungen korrigierten Trend für die „Referenzpegel“ ($1,4 \pm 0,3$ mm/a) errechnet sich ein Trend für die Vertikalbewegungen am Pegel List (in diesem Fall Landsenkung) von $-0,6 \pm 0,5$ mm/a. Der angegebene Fehler ergibt sich aus der Summe des Fehlers, der für den Pegel List in Tabelle 2 angegeben ist und dem mittleren Fehler, der in den ermittelten Trends der Vertikalbewegungen für die drei „Referenzpegel“ enthalten ist. Analog zu List wurden Trends der Vertikalbewegungen für alle anderen hier berücksichtigten Pegelstandorte abgeleitet. Die Ergebnisse sind in Abb. 29 dargestellt und denjenigen Trends der Vertikalbewegungen gegenübergestellt, die mit Hilfe eines globalen GIA-Modells ermittelt wurden (PELTIER, 2004; Daten stehen zum Download unter www.psmsl.org zur Verfügung). Für die GIA-Ergebnisse können keine Unsicherheiten angegeben werden. Aus dem Vergleich zeigt sich, dass die alleinige Berücksichtigung des GIA-Effektes für den Bereich der Deutschen Bucht nur bedingt geeignet ist. Für einige Pegel ergeben sich deutliche Unterschiede, wobei in den meisten Fällen stärkere Landsenkungsraten mit Hilfe des hier verwendeten Ansatzes ermittelt werden. Dies weist darauf hin, dass zusätzliche Effekte, wie z.B. Sedimentkompressionen, Grundwasser- oder Gasförderung, Tektonik etc., eine Rolle spielen. Mit Ausnahme der Pegel Bremerhaven und Emden wurden für alle hier berücksichtigten Pegelstandorte Landsenkungen festgestellt, mit dem stärksten Trend von $-1,3 \pm 0,6$ mm/a für den Pegel Wyk. Insgesamt ergeben sich (wie auf Basis der vorherigen Analysen zu erwarten war) stärkere Senkungstendenzen für den Bereich Schleswig-Holstein im Vergleich zum Bereich Niedersachsen.

Bereits in der Vergangenheit wurden diverse Untersuchungen zu den vorherrschenden vertikalen Landbewegungen im deutschen Küstenbereich durchgeführt. So konnte SCHÜTTE (1908) zwar eine Relativbewegung zwischen Land und Wasserspiegel im Bereich der Deutschen Bucht feststellen,

schreibt diese jedoch alleinig den Küstensenkungserscheinungen zu. FÜHRBÖTER und JENSEN (1985) gehen bei ihren Analysen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht davon aus, dass Vertikalbewegungen eine untergeordnete Rolle bei den Größenordnungen der ermittelten Trends spielen. Diese Annahme bestätigen die Untersuchungen von BEHRE (2003). Er gibt einen Trend von $-0,1 \text{ mm/a}$ für die deutsche Nordseeküste an, welchen er auf Basis der Auswertung der verschiedenen Nordseeküstennivellements (NKN) abgeleitet hat und auf tektonische Einflüsse zurückführt.

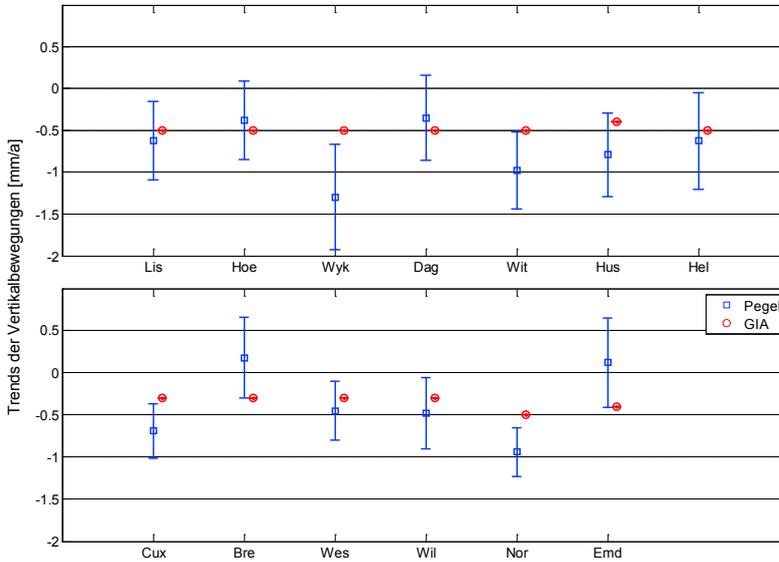


Abb. 29: Landsenkungen, die für die Standorte der Untersuchungspegel auf Basis der RMSL-Zeitreihen ermittelt wurden und solche, die unter Verwendung eines globalen GIA-Modells ergeben haben

AUGATH (1993) ermittelt für den Bereich Langeoog einen deutlich stärkeren Landsenkungstrend in der Größenordnung $-0,5$ bis $-0,7 \text{ mm/a}$ (siehe auch BUNGENSTOCK und SCHÄFER, 2009). Ähnliche Werte von $-0,57 \pm 0,11$ und $-0,68 \pm 0,08 \text{ mm/a}$ geben SHENNAN und WOODWORTH (1992) für die Bereiche Eider-Ästuar bzw. Cuxhaven an. Noch einmal deutlich höhere Landsenkungsraten von bis zu $-2,5 \text{ mm/a}$ ermitteln WANNINGER et al. (2009) auf Basis der Auswertungen von Nivellements und GPS-Daten und unter Berücksichtigung radialer Basisfunktionen.

Der Wert, der mit dem hier genutzten Ansatz für Cuxhaven bestimmt wurde, entspricht mit $-0,7 \text{ mm/a}$ dem von SHENNAN und WOODWORTH (1992) angegebenen Trend von $-0,68 \text{ mm/a}$. Der Pegel, welcher der Eidermündung am nächsten liegt und hier berücksichtigt wurde, ist der Pegel Husum. Hier wurde im Vergleich zu dem von SHENNAN und WOODWORTH (1992) für das Eider-Ästuar angegeben Wert eine etwas stärkere Landsenkungsrate von $-0,8 \pm 0,5 \text{ mm/a}$ ermittelt. Der direkt im Eider-Ästuar angeordnete Pegel Tönning konnte, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, aufgrund von Sperrwerksbeeinflussungen nicht genutzt werden. Der Mittelwert für die gesamte Deutsche Bucht ergibt sich nach den Ergebnissen aus Abbildung 19 zu $-0,6 \pm 0,5 \text{ mm/a}$ (Mittelwert für Schleswig-Holstein ist $-0,7 \text{ mm/a}$, für Niedersachsen $-0,4 \text{ mm/a}$). Insgesamt entsprechen die hier vorgestellten Ergebnisse denjenigen von SHENNAN und WOODWORTH (1992) und AUGATH (1993).

Im Folgenden soll das überraschende Ergebnis für den Pegel Emden kurz diskutiert werden. Die hier durchgeführten Analysen deuten in diesem Fall auf eine leichte Landhebung hin. Aufgrund

der Gasentnahmen im Bereich Groningen (siehe BEHRE, 2003 und WANNINGER et al., 2009) konnte erwartet werden, dass die RMSL-Zeitreihe für Emden einen vergleichsweise starken positiven Trend und der Pegel selbst somit eine deutliche Landsenkungstendenz aufweist. Die Tatsache, dass hier das Gegenteil der Fall ist, lässt verschiedene Vermutungen zu. Zum einen kann die Frage aufgeworfen werden, ob sich die durch die Gasentnahmen hervorgerufenen Landsenkungen überhaupt bis zum Pegelstandort in Emden erstrecken und ob hier ggf. lokale Effekte dieser entgegenwirken. Gleichzeitig können Zweifel an dem hier genutzten Verfahren, welches auf diversen Annahmen beruht, geäußert werden. Die Tatsache jedoch, dass für alle anderen Pegel insgesamt plausible Ergebnisse erzielt wurden, die teilweise sehr gut mit Angaben aus der Literatur übereinstimmen, deutet daraufhin, dass die genutzte Methodik grundsätzlich anwendbar ist. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass die Daten des Pegels Emden verfälscht sind, was zunächst zu falschen RMSL-Trends und bei dem genutzten Verfahren schließlich zu falschen Landsenkungsraten führen würde. Aus Vergleichsbetrachtungen hat sich gezeigt, dass sich die MThw am Pegel Emden über die letzten ca. 20 Jahre anders entwickelt haben, als beispielsweise an den Pegeln Helgoland und Cuxhaven. Die MThw weisen hingegen für alle drei Pegel eine nahezu identische Veränderung auf. Ob dies die alleinige Ursache für das überraschende Ergebnis bei den Vertikalbewegungen ist und ob es sich um eine anthropogen beeinflusste oder natürliche Veränderung handelt, kann nur auf Basis weiterer detaillierter Analysen geklärt werden.

Insgesamt geht aus den obigen Ausführungen deutlich hervor, dass es sich bei dem Problem der Berücksichtigung von Vertikalbewegungen bei Wasserstandsanalysen um eine komplexe Fragestellung handelt, die derzeit nur mit gewissen Unsicherheiten beantwortet werden kann. Wie bereits erwähnt wurde, lassen Auswertungen langer Zeitreihen aus CGPS-Messungen direkt an den Pegelstandorten in naher Zukunft wesentlich genauere Ergebnisse erwarten. Damit können die vorgestellten Ergebnisse, die lediglich eine erste Abschätzung darstellen, verifiziert werden. Schon die genaue Kenntnis über die stattgefundenen Vertikalbewegungen an einem einzigen Pegelstandort im Bereich der Deutschen Bucht würde eine deutlich genauere Abschätzung für alle anderen Standorte zulassen. Das hier beschriebene Verfahren könnte in diesem Fall wiederholt werden, wobei auf die Annahme verzichtet werden könnte, dass die langfristigen MSL-Änderungen im Bereich Großbritanniens mit denen im Bereich der Deutschen Bucht vergleichbar sind. Stattdessen würde dem Ansatz die belastbarere Annahme zugrunde liegen, dass die „absoluten“ langfristigen MSL-Änderungen in dem vergleichsweise kleinen Untersuchungsgebiet der Deutschen Bucht als räumlich konstant anzunehmen sind.

4.5 Globale und regionale Meeresspiegeländerungen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden in erster Linie die Ergebnisse aus Untersuchungen der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht vorgestellt und diskutiert. Vereinzelt wurden Vergleiche zu Ergebnissen anderer Studien in anderen Untersuchungsgebieten hergestellt. Dabei konnten teilweise recht gute, teilweise auch sehr schlechte Übereinstimmungen beobachtet werden. Im Hinblick auf die Frage zur zukünftigen Entwicklung des MSL, gestaltet sich der Vergleich zwischen den Ergebnissen für die Deutsche Bucht mit Ergebnissen aus globalen Studien zunächst am interessantesten. Dies ist darin begründet, dass die vom IPCC veröffentlichten Meeresspiegelszenarien (MEEHL et al., 2007)

derzeit häufig die einzige Grundlage für zukünftige Planungsstrategien darstellen. Detaillierte Recherchen zu den in der Literatur verfügbaren globalen und regionalen Szenarien finden vereinzelt oder in begrenztem Umfang statt. Auf Basis einer solchen Literaturstudie leiten GÖNNERT et al. (2009) beispielsweise ein Meeresspiegelszenario für das Jahr 2100 und die Metropolregion Hamburg von + 40 bis + 80 cm ab.

Mit der nun als Ergebnis des AMSeL-Projektes verfügbaren MSL-Rekonstruktion für den Bereich der Deutschen Bucht, können weitergehende Vergleiche mit globalen Rekonstruktionen oder Rekonstruktionen aus anderen regionalen Studien erfolgen. Hieraus können Rückschlüsse darüber gezogen werden, ob sich beispielsweise der globale MSL in den vergangenen ca. 100 Jahren ähnlich verhalten hat wie der MSL im Bereich der Deutschen Bucht. Für solche Vergleichszwecke wird hier neben der Rekonstruktion für die Deutsche Bucht zum einen eine globale MSL-Rekonstruktion und zum anderen eine Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion berücksichtigt (JEVREJEVA et al., 2006) (globale Rekonstruktion zum Download verfügbar unter www.psmml.org; Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion zur Verfügung gestellt von Svetlana Jevrejeva). Beide Rekonstruktionen basieren ausschließlich auf Pegeldaten, und es gilt anzumerken, dass die von JEVREJEVA et al. (2006) genutzten Daten zunächst um den GIA-Effekt (PELTIER, 2001) korrigiert wurden. Um einen belastbaren Vergleich anstellen zu können, wurde derselbe Arbeitsschritt für die Einzelzeitreihen der Untersuchungspegel in der Deutschen Bucht durchgeführt und darauf basierend eine um den GIA-Effekt korrigierte synthetische Zeitreihe generiert. Alle drei MSL-Rekonstruktionen sind in Abb. 30 für den Zeitabschnitt 1843 bis 2001 dargestellt. Dabei handelt es sich um den Zeitabschnitt, für den alle drei Rekonstruktionen Daten bereitstellen. Anhand der Abbildung ist zunächst der Glättungseffekt deutlich erkennbar, welcher sich einstellt, wenn eine synthetische Zeitreihe auf Basis vieler Pegel aus unterschiedlichen Gebieten erzeugt wird. In solch einem Fall ist i.d.R. kein signifikanter Zusammenhang zwischen den einzelnen Zeitreihen gegeben, wie es beispielsweise im Bereich der Deutschen Bucht der Fall ist. Es kommt zu einer deutlichen Reduzierung der Varianz in der synthetischen Zeitreihe im Vergleich zu den Einzelzeitreihen. Dementsprechend zeigt die Rekonstruktion für die Deutsche Bucht die größte Varianz auf, gefolgt von der Rekonstruktion für den Nord-Ost-Atlantik und der globalen Rekonstruktion. Bei den beiden letzteren ist lediglich zu Beginn der Zeitreihen eine stärkere Varianz erkennbar, was darauf hindeutet, dass für diesen Zeitabschnitt nur Daten von wenigen Pegeln nutzbar waren und der Glättungseffekt damit geringer war (vergleichbar mit dem Pegel Cuxhaven für die Deutsche Bucht). Betrachtet man den Gesamtanstieg, so zeigen die Rekonstruktionen für den Nord-Ost-Atlantik und die Deutsche Bucht ein ähnliches Verhalten, mit einem Gesamtanstieg über den Zeitabschnitt von 1843 bis 2001 von ca. 30 cm. Die globale Rekonstruktion weist einen etwas geringeren Gesamtanstieg von ca. 25 cm über den betrachteten Zeitabschnitt auf. Dabei ist erneut zu berücksichtigen, dass die Vertikalbewegungen lediglich in Form des GIA-Effektes berücksichtigt sind. Dies mag im globalen Mittel eine gute Abschätzung darstellen, was für die Bereiche Deutsche Bucht bzw. Nord-Ost-Atlantik aber nicht der Fall sein muss. Die Ergebnisse aus Kap. 4.4 deuten zumindest für den Bereich Deutsche Bucht daraufhin, dass die alleinige Berücksichtigung des GIA-Effektes eine Unterschätzung der tatsächlichen Vertikalbewegungen darstellt.

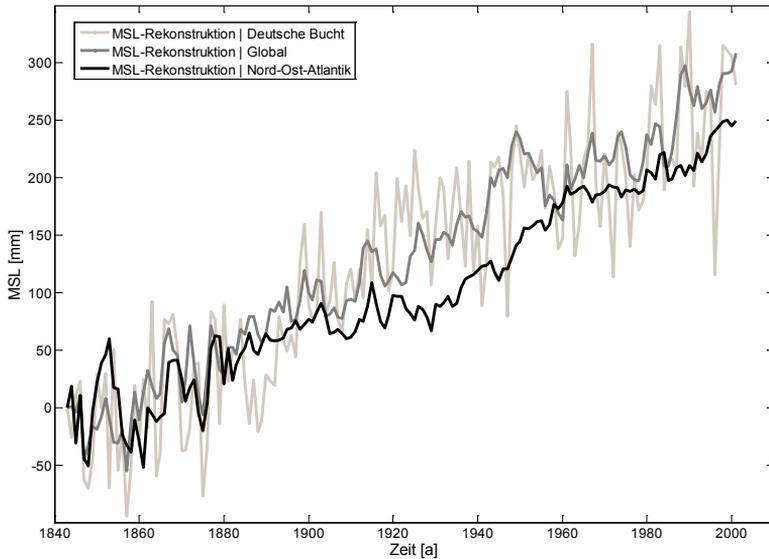


Abb. 30: Verschiedene MSL-Rekonstruktionen: Deutsche Bucht, Nord-Ost-Atlantik, Global

Im nächsten Schritt sollen einige Analyseergebnisse, die auf Basis der MSL-Rekonstruktionen aus Abb. 30 erzielt wurden, vorgestellt und diskutiert werden. Dazu zeigt Abb. 31 (oben) zunächst die MSL-Anstiegsraten, die sich für die drei Zeitreihen nach der SSA-MCAP-Glättung und der Differenzierung der Glättungsfunktion mit dem kleinsten MSE gegenüber der Beobachtungen ergeben haben. Abb. 31 (mitte) zeigt die Differenzen, die sich beim Vergleich der MSL-Anstiegsraten der Zeitreihenpaare Deutsche Bucht – Global und Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik ergeben. Aus den Abbildungen lassen sich grundsätzlich unterschiedliche Muster in den MSL-Anstiegsraten der drei Rekonstruktionen erkennen. Im Bereich der Deutschen Bucht zeigen sich höhere Anstiegsraten für den Zeitabschnitt um 1900 und für die letzten Jahre, wohingegen die beiden anderen Rekonstruktionen höhere Werte für den Zeitabschnitt ca. 1860 bis 1880 und 1920 bis 1960 (hier besonders die globale Rekonstruktion) aufweisen. Insgesamt zeigt sich, dass die Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion eine bessere Übereinstimmung mit der Rekonstruktion für die Deutsche Bucht aufweist, als es bei der globalen Rekonstruktion der Fall ist. Besonders für den Zeitabschnitt nach 1936, für den die Unsicherheiten in den Wasserstandszeitreihen für die Deutsche Bucht gering sind, kann ein ähnliches Verhalten festgestellt werden. Dies bestätigt sich auch mit Blick auf die Ergebnisse in Abb. 31 (unten). Hier sind 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten dargestellt, die sich zwischen den MSL-Rekonstruktionen Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik und Deutsche Bucht – Global ergeben haben. Zusätzlich sind die mittels t-Test bestimmten 95%-Signifikanzgrenzen dargestellt.

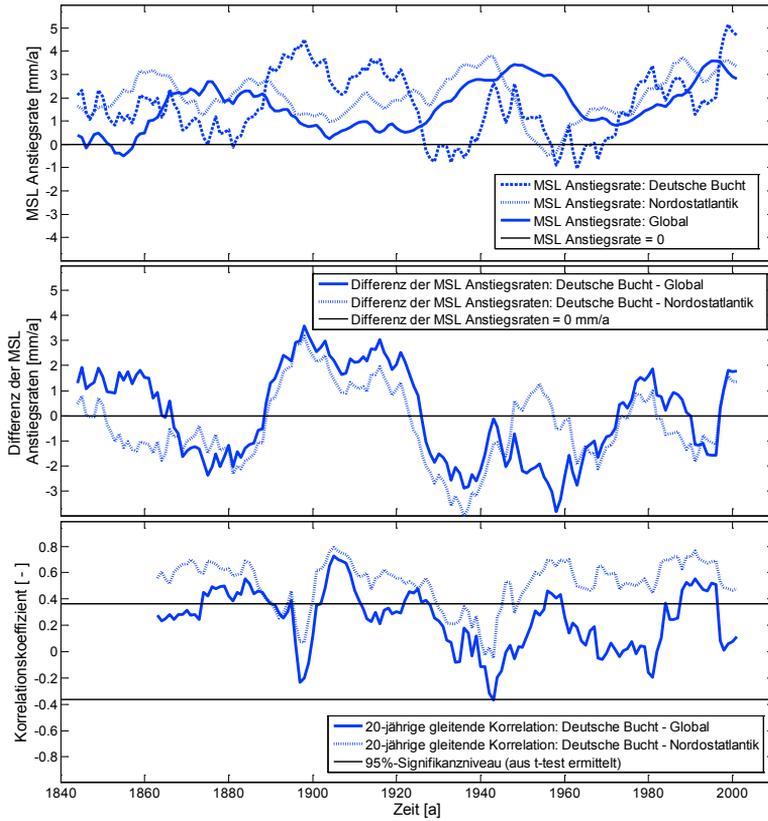


Abb. 31: Ergebnisse des Vergleichs unterschiedlicher MSL-Rekonstruktionen (Deutsche Bucht, Nord-Ost-Atlantik, Global). Oben: MSL-Anstiegsraten, Mitte: Differenzen der MSL-Anstiegsraten gebildet aus den Zeitreihenpaaren Deutsche Bucht - Global und Deutsche Bucht - Nord-Ost-Atlantik, Unten: 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten für die Zeitreihenpaare Deutsche Bucht - Global und Deutsche Bucht - Nord-Ost-Atlantik

Danach sind lediglich 34% aller ermittelten Korrelationskoeffizienten für die Rekonstruktionen Deutsche Bucht – Global als signifikant zu bewerten, wohingegen dies auf 83% der Korrelationskoeffizienten für die Rekonstruktionen Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik zutrifft. Für den Zeitabschnitt ab Anfang der 1940er Jahre, für den Daten von nahezu allen Pegeln in der Deutschen Bucht verfügbar und die Unsicherheiten gering sind, ergeben sich ausschließlich signifikante 20-jährige Korrelationskoeffizienten zwischen den MSL-Rekonstruktionen für die Deutsche Bucht und den Nord-Ost-Atlantik. Mit Blick auf diese Ergebnisse kann die Frage aufgeworfen werden, in wie weit globale Meeresspiegelszenarien, wie sie beispielsweise vom IPCC veröffentlicht werden, für die Entwicklung regionaler Küstenschutzstrategien nutzbar sind. Der MSL im Bereich der Deutschen Bucht hat über weite Strecken der letzten eineinhalb Jahrhunderte ein deutlich anderes Verhalten aufgewiesen, als der globale MSL. Aus diesem Grund muss zunächst davon ausgegangen werden, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird. Hier wird der dringende Bedarf an belastbaren regionalen Meeresspiegelszenarien deutlich, welche einen unerlässlichen Beitrag für die Planung zukünftiger regionaler und lokaler Küstenschutzmaßnahmen darstellen.

Bevor einige Ergebnisse aus kürzlich erfolgten Studien zur Ableitung von regionalen MSL-Szenarien vorgestellt werden, gibt Abb. 32 zunächst einen Überblick über ausgewählte globale MSL-Szenarien für das 21. Jahrhundert (siehe auch NICHOLLS et al., 2011). Allen dargestellten MSL-Szenarien liegt die Annahme einer mittleren globalen Temperaturzunahme von $>4\text{ }^{\circ}\text{C}$ im 21. Jahrhundert zugrunde. Es zeigt sich, dass die IPCC-Szenarien (MEEHL et al., 2007) im Vergleich zu den später veröffentlichten Arbeiten von geringeren Anstiegsraten über das 21. Jahrhundert hinweg ausgehen, obwohl Unsicherheiten bezogen auf die Instabilität der Eisschilde im vorliegenden Fall bereits berücksichtigt sind. Während alle Szenarien die MSL-Änderungen für das 21. Jahrhundert angeben, sind teilweise keine eindeutigen Informationen über das Bezugsjahr (z.B. 1990 oder heute) verfügbar. Obwohl den Untersuchungen zumindest ähnliche Randbedingungen zugrunde liegen, zeigt die enorm große Streubreite ($> 2\text{ m}$) an, dass nach wie vor sehr große Unsicherheiten, auch in den globalen MSL-Szenarien enthalten sind. Dabei sind regionale Besonderheiten, die einen zusätzlichen oder auch geringeren Anstieg bedeuten können, aber auch ggf. die Unsicherheiten nochmals erhöhen, noch in keiner Weise berücksichtigt.

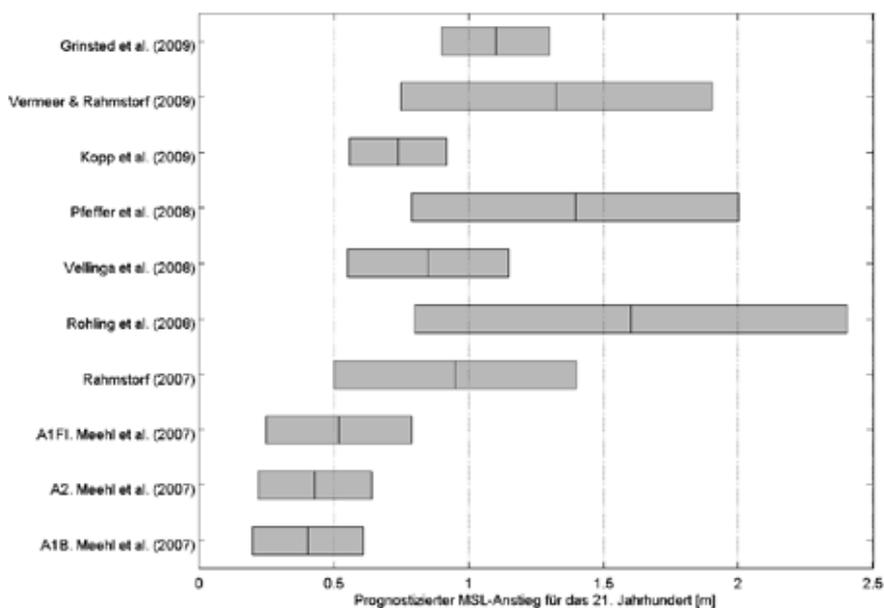


Abb. 32: Ausgewählte globale Meeresspiegelszenarien (alle gehen von einer globalen Erwärmung $> 4^{\circ}\text{C}$ aus) (nach NICHOLLS et al. 2011)

Zur Ermittlung regionaler Szenarien müssen die für den globalen MSL projizierten Änderungen mit den räumlichen Mustern der MSL-Änderungen relativ zum globalen Mittel kombiniert werden. Während die zu erwartenden Änderungen im globalen Mittel vorrangig durch thermische Ausdehnung hervorgerufen werden, sind die räumlichen Muster in erster Linie durch Zirkulationsvorgänge und Dichteveränderungen bedingt (LOWE et al., 2009).

Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren vermehrt Anstrengungen unternommen, regionalisierte Meeresspiegelszenarien auf Basis der verfügbaren Ergebnisse aus den globalen Studien abzuleiten. Aufgrund des engen räumlichen Zusammenhangs, sollen hier die Ergebnisse zweier

solcher Untersuchungen vorgestellt werden. Während KATSMAN et al. (2008 und 2011) Meeresspiegelszenarien für den Nord-Ost-Atlantik Bereich erarbeitet haben, geben LOWE et al. (2009) Szenarien für den Bereich Großbritannien an. Die Ergebnisse sind in Abb. 33 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass jeweils Wertebereiche für zwei unterschiedliche Szenarien angegeben werden. In beiden Fällen wurden zunächst „wahrscheinliche Szenarien“ untersucht, bevor zusätzlich so genannte „High End Szenarien“ (in Abb. 33 mit H++ gekennzeichnet) abgeleitet wurden. Letztere gehen von einer sehr ungünstigen, aber auch sehr unwahrscheinlichen zukünftigen Entwicklung aus. Auf Basis solcher Untersuchungen können jedoch wichtige Erkenntnisse über den quantitativen Einfluss einzelner Faktoren gewonnen und Vulnerabilitätsstudien durchgeführt werden. Die „wahrscheinlichen“ MSL-Anstiegsszenarien liegen mit 0,12 bis 0,76 m (Großbritannien) und 0,3 bis 0,8 m (Nord-Ost-Atlantik) im 21. Jahrhundert etwa in dem Bereich der IPCC-Szenarien (0,18 bis 0,79 m).

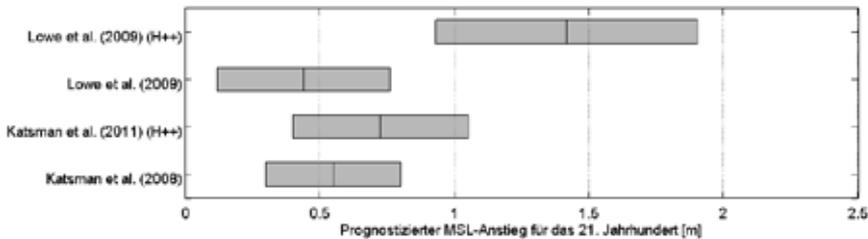


Abb. 33: Ausgewählte regionale Meeresspiegelszenarien (Großbritannien und Nord-Ost-Atlantik) für das 21. Jahrhundert

Die „High End Szenarien“ führen zu wesentlich stärkeren Anstiegen von 0,93 bis 1,9 m für Großbritannien und 0,4 bis 1,05 m für den Bereich Nord-Ost-Atlantik. LOWE et al. (2009) stellen zusätzlich Untersuchungen zu den vorherrschenden Landsenkungen an und können somit sowohl absolute als auch relative Szenarien angeben. Demnach ergibt sich z. B. für den Bereich London ein relatives Szenario von 0,21 bis 0,68 m und für den Bereich Edinburgh von 0,17 bis 0,54 m. Somit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass für den Küstenschutz vorrangig die relativen Änderungen von Bedeutung sind.

Alle hier vorgestellten Szenarien beziehen sich, ebenso wie die meisten in der Literatur verfügbaren, auf die Änderungen im 21. Jahrhundert und es werden häufig nur Wertebereiche für das Jahr 2100 (oder 2095) angegeben. Teilweise werden auch längerfristige Entwicklungen, wie zum Beispiel bis zu den Jahren 2200 (z.B. KATSMAN et al., 2011) oder 2300 (z.B. WBGU, 2006), untersucht. Dabei erhöhen sich die Unsicherheiten noch einmal deutlich. Wesentlich seltener finden sich Angaben für Zeithorizonte in der näheren Zukunft (z.B. 2040 oder 2050), obwohl solche Informationen für diverse Fragestellungen eine wichtige und ggf. übergeordnete Rolle spielen. Auch im 4. Sachstandsbericht des IPCC (Assessment Report 4, AR4) werden ausschließlich Wertebereiche für die unterschiedlichen Szenarien für Ende des 21. Jahrhunderts relativ zum Bezugsjahr 1990 angegeben, während im 3. Sachstandsbericht (TAR) (CHURCH et al., 2001) Projektionen für das gesamte 21. Jahrhundert in Form von Zeitreihen abgebildet sind. Ein Versuch, diese Zeitreihen mit den im AR4 angegebenen Werten zu kombinieren und entsprechend zu skalieren wurde kürzlich von HUNTER (2010) unternommen. Die Zeitreihen, die sich dabei für das niedrigste Szenario B1 und das höchste Szenario A1FI ergeben, sind in Abb. 34 gemeinsam mit der MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht und deren Glättungsfunktion dargestellt. Dabei starten die Szenarienzeitreihen im Jahr 1990 auf der Höhe

der Glättungsfunktion für die Deutsche Bucht (Ausschnitt in Abb. 34). Demnach verläuft die Glättungsfunktion derzeit oberhalb der IPCC-Szenarien, was jedoch zum einen auf die starke Varianz und einige hohe Werte am Ende der MSL-Zeitreihe für die Deutsche Bucht und zum anderen auf die sehr geringe Streubreite der Szenarien am Anfang zurückzuführen ist. Würden die Szenarienzereihen direkt an dem für das Jahr 1990 beobachteten Wert anschließen, ergäbe sich ein anderes Bild, da es sich bei dem Beobachtungswert für 1990 um einen relativ hohen Wert handelt. Würde man das Jahr 1989 oder 1991 als Bezugsjahr verwenden ergäben sich in diesem Fall wieder andere Rückschlüsse. Das Verbinden der Szenarienzereihen mit der Glättungsfunktion aus der SSA-MCAP-Analyse erscheint demnach am sinnvollsten (siehe auch RAHMSTORF et al., 2007).

Unabhängig von dieser Fragestellung, ergibt sich aus den IPCC-Szenarien (MEEHL et al., 2007) ein Wertebereich für den Anstieg bis 2050 relativ zu 1990 von ca. 10 bis 30 cm und bezogen auf das Jahr 2010 von ca. 8 bis 22 cm.

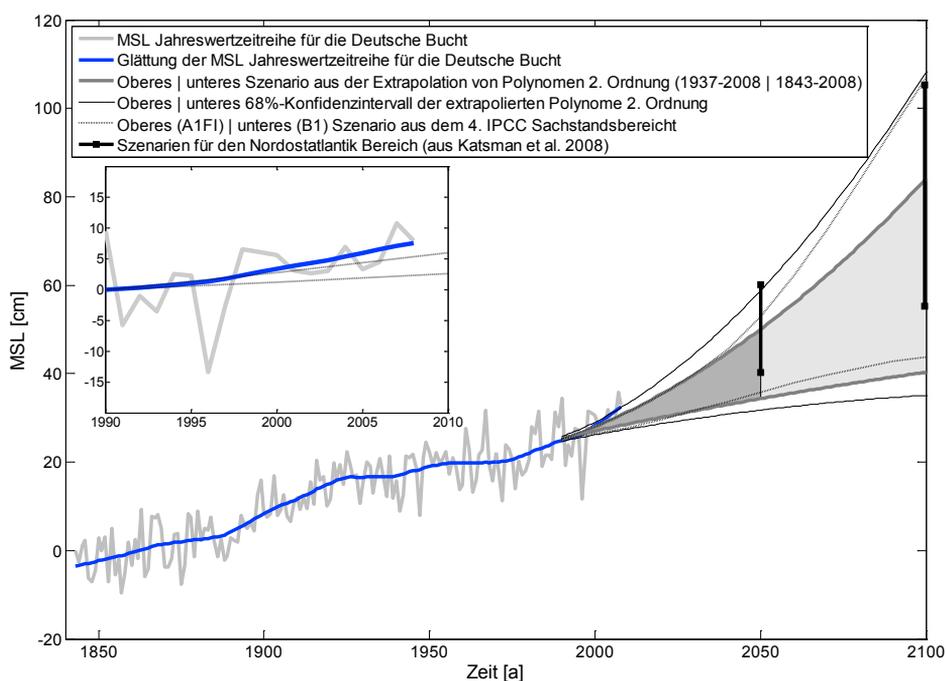


Abb. 34: MSL-Zeitreihe für die Deutsche Bucht mit Glättungsfunktion und verschiedene Meeresspiegelszenarien (IPCC, KATSMAN et al., 2008, Extrapolation der Beobachtung)

Ebenfalls in Abb. 34 dargestellt sind die Ergebnisse von KATSMAN et al. (2008) für den Nord-Ost-Atlantik-Bereich, die neben dem Jahr 2100 auch Ergebnisse für das Jahr 2050 angeben. Für 2050 ergeben sich etwas höhere Werte für den Nord-Ost-Atlantik, für 2100 sind die Ergebnisse (besonders was den oberen Grenzwert betrifft) vergleichbar mit den IPCC-Szenarien.

Neben den beschriebenen Szenarien, die im Wesentlichen auf Modellstudien beruhen, sind in Abb. 34 zusätzlich die Ergebnisse einfacher Extrapolationen der heute verfügbaren Beobachtungszeitreihe für die Deutsche Bucht abgebildet. Dazu wurden Polynome 2. Ordnung an zwei ausgewählte Zeiträume der MSL-Rekonstruktion (1843 bis 2008 und 1937 bis 2008) angepasst und inklusive der 95%-Konfidenzintervalle bis 2100 fortgeschrieben. Der Zeitabschnitt ab 1843 wurde ausgewählt, da

es sich um den längsten Zeitabschnitt handelt für den Daten verfügbar sind und, wie in Kap. 4.3 festgestellt wurde, eine negative Beschleunigungstendenz vorhanden ist. Beim Zeitabschnitt 1937 bis 2008 handelt es sich um denjenigen, für den Daten von fast allen Pegeln verfügbar und die Unsicherheiten wie bereits mehrfach erwähnt gering sind. Die Extrapolationen führen ohne Berücksichtigung der Konfidenzintervalle für das Jahr 2050 zu ähnlichen Ergebnissen wie die IPCC-Szenarien und liegen etwas niedriger als die von KATSMAN et al. (2008) ermittelten Werte. Für 2100 liegen sowohl die IPCC-Szenarien, als auch die Ergebnisse von KATSMAN et al. (2008) etwas höher. Berücksichtigt man zusätzlich die 95%-Konfidenzintervalle, so schließen die Extrapolationen die anderen Szenarien (sowohl für 2050, als auch 2100) ein, ohne dabei deutlich abzuweichen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Extrapolationen hier zunächst für Vergleichszwecke erfolgt und dargestellt sind. Besonders für längere Zeithorizonte (> einige Dekaden) können auf Basis solcher einfacher Ansätze keine belastbaren Ergebnisse erzielt werden. Die gute Übereinstimmung mit den Szenarien und die Tatsache, dass es sich beim MSL um einen Parameter handelt, der keinen sprunghaften Änderungen (innerhalb weniger Jahre) unterworfen ist, verdeutlicht dennoch den Wert langer und qualitativ hochwertiger MSL-Zeitreihen. Diese sind demnach nicht nur unerlässlich zur Validierung regionaler Klimamodelle, sondern sollten auch beim Erarbeiten von Szenarien über wenige Dekaden hinweg berücksichtigt werden. Weitergehende Ansätze, als der hier verwendete, für die Extrapolation unter Berücksichtigung einer fast 170 Jahre langen Beobachtungszeitreihe sind zu erarbeiten.

Abschließend kann auf Basis der hier vorgestellten Ergebnisse festgehalten werden, dass sich der MSL im Bereich der Deutschen Bucht und der globale MSL über die letzten eineinhalb Jahrhunderte hinweg teilweise deutlich unterschiedlich verhalten haben. Beim Vergleich mit einer Nord-Ost-Atlantik-Rekonstruktion konnten (besonders ab ca. 1940) deutlich bessere Übereinstimmungen festgestellt werden. Aus diesem Grund sollte den heute verfügbaren und hier vorgestellten regionalen MSL-Szenarien, die im räumlichen Zusammenhang mit der Deutschen Bucht stehen, bei der Erarbeitung zukünftiger Küstenschutzstrategien eine deutlich höhere Gewichtung zuteil werden, als den aktuell verfügbaren globalen Szenarien. Forschungsbedarf zur Erarbeitung weiterer und belastbarer regionaler MSL-Szenarien mit Fokus auf den Nordseebereich ist gegeben.

5. Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von Tideketten in der Deutschen Bucht

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert, die bei der Anwendung der in Kap. 3 beschriebenen Auswertemethoden zur Analyse von Tideketten erhalten wurden. Allgemein können Tideketten bzw. Folgen von jeweils einen bestimmten Wasserstand überschreitenden Tidescheiteln als Indikator von Sturmtätigkeit bzw. Auftreten von vorrangig Windstauereignissen, aber auch Fernwellen und weiterer die Astronomie überlagernder Effekte, aufgefasst werden. Sie geben darüber hinaus aber auch direkt Auskunft über Auftreten, Ereignislänge und Häufigkeit von ununterbrochen in Folge überschrittenen Tidescheitelniveaus bzw. im Falle von T_{nw}-Scheiteln weiterhin auch des ununterbrochen in Folge überschrittenen Wasserstands.

Diese Informationen sind für verschiedene Aspekte von Interesse. Die Abfolge von T_{nw}-Ketten oberhalb bestimmter Niveaus ist von unmittelbarer Bedeutung für die Entwässerungssituation von tiefliegenden Einzugsgebieten, z.B. über freien Sielzug. Bei geschöpften Einzugsgebieten geben sie Auskunft über zu erwartende Pumpkosten. Schließlich ist es auch für die Belastung der Küsten

von Interesse, Informationen über Häufigkeit und Niveau von Zeiten zu erhalten, wo über mehrere Tiden ein entsprechender Wasserstand nicht unterschritten wird. Die Betrachtung der Thw-Ketten vervollständigt dieses Bild für die maximalen Scheitelhöhen.

Aus diesen Gründen werden sowohl die Tnw-Scheitel, als auch die Thw-Scheitel einer separaten Untersuchung zugeführt. Für beide sind darüber hinaus grundsätzlich sowohl die Höhenentwicklung als auch die Auftretensanzahl für unterschiedlich lange Tideketten von Interesse. Die jeweiligen Ergebnisgrafiken der untersuchten Pegel sind in Anhang 2 des Abschlussberichtes (online abrufbar unter: <http://www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/forschung/projekte/amsel/>) zusammengestellt.

Im Folgenden sind zunächst die Auswertungen bezüglich Trends (Kap. 5.1) und Höhenentwicklung der maximalen Basishöhen (Kap. 5.2) dargestellt. Kap. 5.3 beinhaltet die Ergebnisse zur Analyse von Ereignisanzahl und Auftretensverteilung von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen. Mit zunehmender Höhe des Bezugshorizonts treten weniger und zunehmend kürzere Tnw- und Thw-Folgen auf. Die maximale Folgenzahl für die höchsten in der Auswertung untersuchten Bezugshorizonte betrug $n = 7$. Aus diesem Grund wurde für die gesamten Auswertungen für bis zu 8 in Folge auftretenden Tidescheiteln durchgeführt.

5.1 Ergebnisse der Trenduntersuchung der maximalen Basishöhe der Tnw- und Thw-Ketten

Zunächst sollen die Ergebnisse der Trendentwicklung der maximalen Basishöhe (Kap. 3.7.1) der Tnw- und Thw-Ketten näher betrachtet werden. In Tab. 3 sind die ermittelten linearen Trends derjenigen Zeitreihen aufgeführt, welche von 1 bis 8 Tiden in Folge hintereinander einen bestimmten Wasserstand (Basishöhe) erreicht oder überschritten haben. Für jede Folgenzahl wird die maximal erreichte Basishöhe für jedes Jahr bestimmt und so je Folgenzahl, Pegel, Tnw- und Thw-Auswertung eine Zeitreihe ermittelt (siehe Kap. 3.7, Abb. 20). Die entsprechenden Zeitreihen und ihre Trends geben Auskunft, ob und wie sich die Trends des gleichzeitig von Folgen von 2 und mehr hintereinander auftretenden Tnw- oder Thw-Scheiteln erreichten oder überschrittenen Wasserstands von dem Trendverlauf der Einzeltidescheitel unterscheiden. Diese Information kann z.B. für die Entwässerungssicherheit von sielentwässerten Einzugsgebieten von Relevanz sein, deren Speicherkapazität für eine unterschiedliche Anzahl von Sperrtiden ausreicht.

In Übereinstimmung mit der MSL-Auswertung wurden die beiden Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 für die Auswertung herangezogen. Der zweite, kurze Zeitabschnitt musste allerdings auf den spätesten gemeinsam verfügbaren Startzeitpunkt der drei kürzeren Scheitelzeitreihen Emden, Wyk und Helgoland gesetzt werden, da anders als bei der RMSL-Trendanalyse jeweils vollständige Jahreszeitreihen benötigt werden (vgl. Fußnote in Tab. 1). Daher beginnt der zweite Vergleichszeitabschnitt nicht 1951, sondern 1954.

Tab. 3: Ergebnisse der linearen Trendanalysen [mm/a] für die maximal erreichte Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw für die Deutsche Bucht

| Pegel / Folgezahl | | 1937-2008 | | | | | | | | 1954-2008 | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----------|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| List | Tnw | 4,5 | 4,5 | 5,9 | 3,9 | 2,5 | 2,0 | 1,9 | 2,9 | 2,7 | 0,8 | 6,0 | 3,6 | 3,2 | 2,1 | 1,6 | 2,3 |
| | Thw | 8,0 | 7,0 | 5,7 | 4,6 | 4,3 | 3,8 | 3,8 | 4,0 | 5,1 | 3,9 | 2,3 | 4,2 | 4,1 | 2,7 | 3,5 | 3,6 |
| Hörnum | Tnw | 4,6 | 3,9 | 5,1 | 3,4 | 1,7 | 1,1 | 1,6 | 2,3 | 2,8 | -0,1 | 5,2 | 3,4 | 2,8 | 1,5 | 1,4 | 2,1 |
| | Thw | 8,0 | 7,2 | 5,8 | 5,3 | 5,0 | 5,5 | 4,8 | 5,0 | 4,4 | 3,9 | 1,8 | 4,5 | 3,9 | 3,9 | 3,6 | 3,9 |
| Wyk | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | 4,3 | 3,8 | 2,0 | 4,8 | 5,0 | 4,1 | 3,4 | 4,0 |
| | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | 3,2 | -0,4 | 4,1 | 3,6 | 2,9 | 1,8 | 1,1 | 2,0 |
| Dagebüll | Tnw | 7,5 | 5,4 | 4,9 | 3,1 | 1,4 | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 4,2 | 0,4 | 3,5 | 2,6 | 2,7 | 1,8 | 0,6 | 1,7 |
| | Thw | 8,8 | 8,9 | 7,5 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 5,8 | 5,7 | 4,6 | 4,2 | 3,3 | 5,4 | 5,2 | 4,3 | 4,2 | 4,8 |
| Wittdün | Tnw | 4,6 | 4,0 | 4,9 | 4,0 | 1,8 | 1,2 | 1,8 | 2,1 | 1,5 | -0,6 | 5,3 | 3,6 | 2,9 | 1,8 | 1,3 | 2,1 |
| | Thw | 8,1 | 7,1 | 5,9 | 5,5 | 5,0 | 5,6 | 5,0 | 4,8 | 4,7 | 3,5 | 2,1 | 4,2 | 4,0 | 3,9 | 3,3 | 3,7 |
| Husum | Tnw | 6,7 | 4,9 | 6,8 | 3,9 | 3,0 | 1,9 | 2,5 | 1,6 | 3,1 | -2,0 | 3,6 | 2,0 | 2,3 | -0,1 | -0,2 | -0,9 |
| | Thw | 8,5 | 8,5 | 5,4 | 5,7 | 5,1 | 5,1 | 4,3 | 4,2 | 4,3 | 2,4 | 0,6 | 3,9 | 4,1 | 3,0 | 2,4 | 3,9 |
| Helgoland | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,8 | 0,3 | 4,4 | 3,6 | 4,2 | 2,8 | 1,7 | 1,5 |
| | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | 5,7 | 3,0 | 1,7 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 1,5 | 2,7 |
| Cuxhaven | Tnw | 5,9 | 4,0 | 4,8 | 4,0 | 2,9 | 2,6 | 2,7 | 1,6 | 1,0 | -0,6 | 5,1 | 4,2 | 4,4 | 2,7 | 2,5 | 0,8 |
| | Thw | 8,8 | 6,2 | 3,7 | 3,6 | 3,1 | 3,8 | 3,2 | 4,1 | 5,4 | 3,2 | 0,3 | 2,3 | 2,3 | 2,9 | 2,0 | 4,2 |
| Bremerhaven | Tnw | 5,0 | 2,1 | 2,1 | 2,3 | 0,4 | 1,1 | 0,6 | -0,7 | 1,0 | -1,7 | 2,8 | 3,2 | 1,7 | 1,4 | 0,2 | -1,8 |
| | Thw | 8,4 | 5,9 | 4,3 | 3,9 | 3,7 | 4,8 | 4,4 | 4,7 | 5,8 | 3,0 | 2,2 | 2,9 | 3,1 | 4,5 | 4,9 | 5,2 |
| LT Alte Weser | Tnw | 3,3 | 3,1 | 3,5 | 3,4 | 3,1 | 2,7 | 2,2 | 2,0 | 1,4 | 1,2 | 5,4 | 4,5 | 4,2 | 3,0 | 1,9 | 1,1 |
| | Thw | 7,6 | 4,7 | 2,9 | 2,7 | 2,4 | 3,1 | 2,5 | 3,0 | 4,9 | 2,3 | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 2,4 | 1,7 | 3,4 |
| Wilhelmshaven | Tnw | 5,2 | 3,5 | 3,4 | 3,6 | 2,8 | 3,0 | 2,1 | 1,7 | 2,6 | 0,6 | 4,2 | 4,8 | 4,5 | 3,4 | 2,2 | 0,6 |
| | Thw | 8,6 | 6,1 | 3,8 | 4,0 | 3,9 | 5,1 | 4,4 | 5,0 | 6,5 | 3,1 | 3,6 | 2,6 | 2,8 | 4,9 | 4,5 | 5,1 |
| Norderney | Tnw | 4,9 | 5,5 | 4,0 | 4,3 | 2,6 | 3,3 | 2,5 | 2,0 | 3,0 | 3,4 | 4,4 | 5,0 | 4,5 | 3,8 | 2,6 | 1,7 |
| | Thw | 7,9 | 4,4 | 4,3 | 3,5 | 3,0 | 3,7 | 2,5 | 3,2 | 6,2 | 2,1 | 3,4 | 3,2 | 3,1 | 4,2 | 2,1 | 4,0 |
| Emden | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | 2,1 | 2,6 | 3,0 | 3,6 | 2,1 | 0,3 | -0,3 | -1,7 |
| | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | 8,9 | 4,3 | 5,0 | 4,1 | 4,6 | 5,3 | 3,8 | 3,3 |
| synth. Zeitreihe (Schleswig-Holstein) | Tnw | 5,6 | 4,5 | 5,5 | 3,7 | 2,1 | 1,4 | 1,8 | 2,0 | 3,1 | 0,4 | 4,3 | 3,3 | 3,2 | 1,9 | 1,4 | 1,9 |
| | Thw | 8,3 | 7,7 | 6,1 | 5,5 | 5,1 | 5,3 | 4,7 | 4,7 | 4,4 | 2,9 | 2,4 | 4,3 | 4,0 | 3,3 | 3,0 | 3,7 |
| synth. Zeitreihe (Niedersachsen) | Tnw | 4,9 | 3,6 | 3,6 | 3,5 | 2,4 | 2,5 | 2,0 | 1,3 | 1,9 | 0,9 | 4,2 | 4,2 | 3,6 | 2,4 | 1,5 | 0,1 |
| | Thw | 8,3 | 5,5 | 3,8 | 3,5 | 3,2 | 4,1 | 3,4 | 4,0 | 6,3 | 3,0 | 2,6 | 2,8 | 2,9 | 4,0 | 3,2 | 4,2 |
| synth. Zeitreihe (Deutsche Bucht) | Tnw | 5,2 | 4,1 | 4,5 | 3,6 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 1,7 | 2,3 | 0,6 | 4,2 | 3,8 | 3,4 | 2,2 | 1,5 | 1,0 |
| | Thw | 8,3 | 6,6 | 4,9 | 4,5 | 4,2 | 4,7 | 4,1 | 4,4 | 5,4 | 3,0 | 2,4 | 3,4 | 3,4 | 3,6 | 3,0 | 3,8 |

Die Trendverläufe sind im Einzelnen und im Vergleich zu den jeweiligen Trends der MTnw/MTnw, bzw. HTnw/HTnw im Anhang 2 des Abschlussberichtes beschrieben. Bis auf wenige Ausnahmen stimmen dabei die generellen Ausprägungen der Trendverläufe über zunehmende, hintereinander die jeweilige Basishöhe mindestens erreichende, Tnw- und Thw-Folgezahlen überein:

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgezahl ab (Abb. 35).

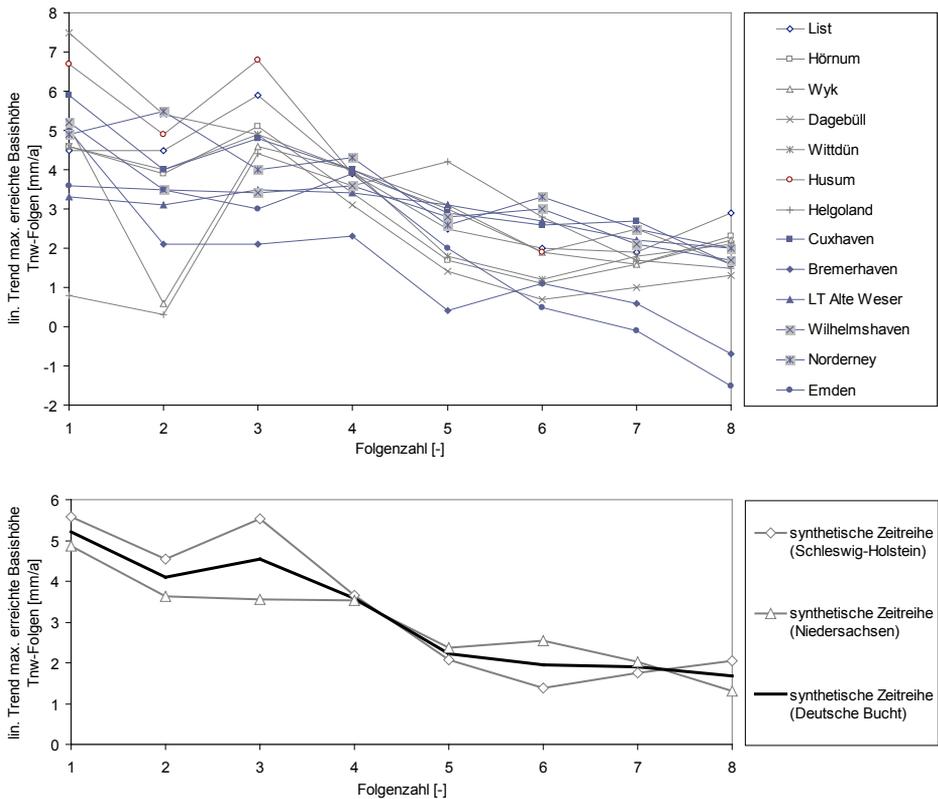


Abb. 35: Lineare Trends für die maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Oben: für die einzelnen Pegel. Unten: zusammengeführt in Form synthetischer Reihen für Schleswig-Holstein, Niedersachsen und die Deutsche Bucht

Das Maximum wird meist für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HTnw darstellt, erreicht; oft aber auch bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw. Im Überwiegenden liegen dabei alle Trends über dem Trend des jeweiligen MTnw des Pegels. Der niedrigste Trend wird oft, aber nicht immer, für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht. Die 1- σ -Standardfehler liegen für alle Pegel und für Tnw- und Thw-Folgen der Folgenzahl 8 im Bereich von $\pm 0,7$ bis $\pm 1,2$ mm/a zunehmend bis zur Folgenzahl 2 im Bereich von $\pm 1,8$ bis $\pm 2,3$ mm/a. Für die Folgenzahl 1, d.h. Einzeltiden liegen die 1- σ -Standardfehler im Bereich von $\pm 2,3$ bis $\pm 3,2$ mm/a.

Die Trends für die Tnw-Folgen Basishöhen liegen dabei im Maximum zwischen 3,5 mm/a (LT Alte Weser, Folgenzahl 3) und 7,5 mm/a (Dagebüll, Folgenzahl 1) und im Minimum zwischen -1,5 mm/a (Emden, Folgenzahl 8) und 2 mm/a (LT Alte Weser und Norderney, beide Folgenzahl 8). Signifikante Unterschiede zum generellen Verhalten der Tnw-Folgen Basishöhen-Trends zeigen Bremerhaven und Emden mit negativen Trendwerten für Folgenzahl 8 bzw. 7 und 8 und Helgoland. Dort zeigt die Trendentwicklung der maximalen Basishöhe der Tnw-Ketten einen zunächst niedrigen Verlauf für Folgenzahlen 1 und 2, dann einen hohen Verlauf für mittlere Folgenzahlen von 3 bis 5

aufeinanderfolgende Tiden und schließlich wieder ein mit weiter zunehmender Folgenzahl abnehmenden Verlauf.

Der obere Teil der Abb. 35 zeigt dabei die übereinander gezeichneten Trendverläufe der Einzelpegel, um einen Eindruck der Streuung zwischen den Pegeln und des Gesamtverlaufs zu geben. Der untere Kasten zeigt weiterhin den Trendverlauf der in synthetischen Pegeln zusammengefassten Einzelzeitreihen der maximal erreichten Basishöhen der Tnw, jeweils für die schleswig-holsteinischen Pegel, für die niedersächsischen Pegel und für die gesamte Deutsche Bucht. Helgoland ist dabei nur in der synthetischen Reihe für die Deutsche Bucht enthalten.

In gleicher Art sind die Trendverläufe der Thw-Folgen in Abb. 36 dargestellt. Auch die Thw zeigen weitestgehend ähnliche Trendverläufe. Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw ebenfalls wie für die Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab. Der Abfall ist dabei meist für die ersten 2 bis 4 Folgenzahlen gleichmäßig, um für weiter zunehmende Kettenlängen nur noch wenig abzufallen, auf relativ konstantem Niveau zu verharren oder leicht wieder zu steigen.

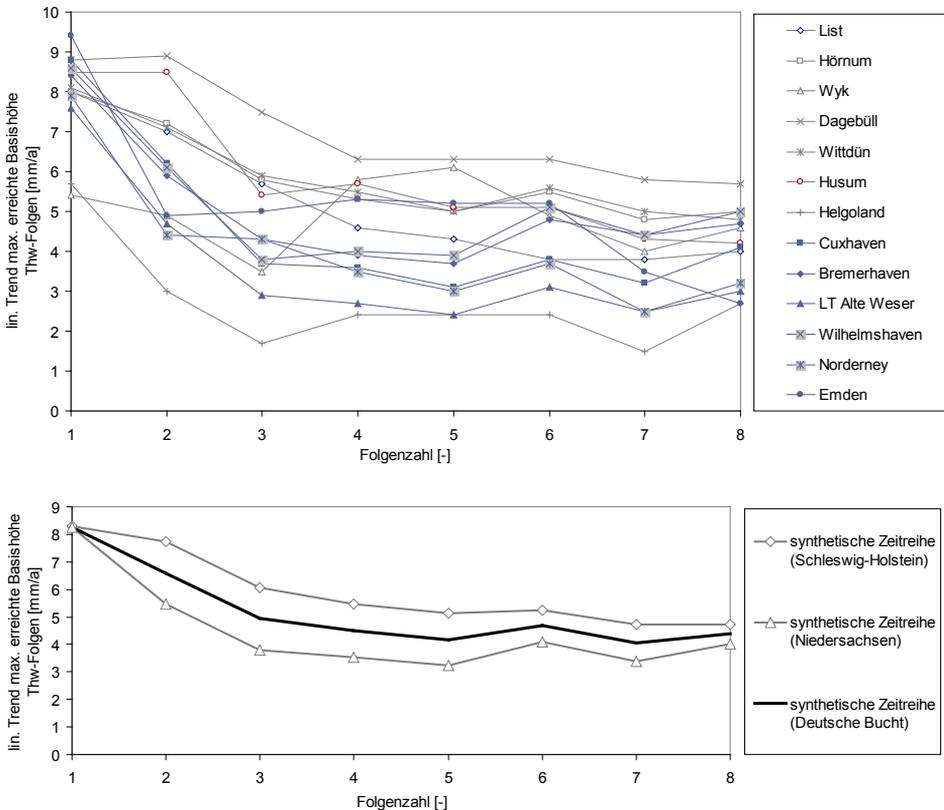


Abb. 36: Lineare Trends für die maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Oben: für die einzelnen Pegel. Unten: zusammengeführt in Form synthetischer Reihen für Schleswig-Holstein, Niedersachsen und die Deutsche Bucht

Das Maximum wird meist für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, erreicht. Nur für zwei Pegel sind es zwei aufeinanderfolgende

Thw, die den maximalen Trend aufweisen oder gleich dem Trend der HThw verlaufen. Dies ist der Pegel Dagebüll, wo der Trend für die Folgenzahl 2 mit 8,9 mm/a nur leicht und innerhalb des 1- σ -Standardfehlers über dem Trend der HThw liegt und der Pegel Husum, der sowohl für Folgenzahl 1 und 2 den Trend von 8,5 mm/a aufweist. Auch für die Thw-Ketten liegen die Trends meist über dem Trend des MThw; Ausnahme ist hier der Pegel Helgoland. Dort ist es umgekehrt: bis auf die Folgenzahl 1 und 2 verlaufen die Trends aller übrigen Folgenzahlen unter dem Trend des MThw des Pegels Helgoland. Für alle Pegel werden die niedrigsten Trends meist für 7 oder 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

Die Trends liegen dabei im Maximum zwischen 7,6 mm/a (LT Alte Weser, Folgenzahl 1) und 9,4 mm/a (Emden, Folgenzahl 1) und im Minimum zwischen 1,5 mm/a (Helgoland, Folgenzahl 7) und 5,7 mm/a (Dagebüll, Folgenzahl 8).

5.2 Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw - und Thw - Folgen

Wie hoch die jeweiligen Mittelwerte der den Trendbestimmungen zugrunde liegenden Zeitreihen der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw über den Auswertungszeitabschnitt sind, wird in Tab. 4, Abb. 37 und Abb. 38 dargestellt. Angelehnt an die übliche Konvention zur Benennung von Tideparametern bzw. Hauptwerten werden diese Mittelwerte in ihrer Gesamtheit als MHnTnw und MHnThw bezeichnet. Das MHThw₁₉₃₇₋₂₀₀₈ ist also wie bekannt das Mittel der HThw des entsprechenden Zeitabschnitts und in diesem Sinne sind die MHnThw₁₉₃₇₋₂₀₀₈ die Mittel der maximal erreichten Basishöhe n hintereinander auftretender Thw des entsprechenden Zeitabschnitts. Aus den Zusammenstellungen kann daher entnommen werden, welche Scheitelwerte (für die Thw) bzw. welches Wasserstandsniveau (für die Tnw) in Bezug auf den jeweiligen Pegelnullpunkt im Mittel einmal pro Jahr für 1 bis 8 Tiden in Folge nicht unterschritten wird.

Insbesondere in der grafischen Darstellung (Abb. 37 für den Zeitabschnitt 1937-2008, 10 Pegel, und Abb. 38 für den Zeitabschnitt 1954-2008, alle 13 Pegel) kann dabei der zu erwartende monotone Abfall der MHnTnw und MHnThw mit zunehmender Kettenlänge, respektive Folgenzahl und der zumindest für die MHnThw relativ gleichartige, nahezu parallele Verlauf der einzelnen Pegel ersehen werden.

Bei den MHnTnw bestehen etwas größere Unterschiede zwischen den einzelnen Pegeln. Die Höhendifferenz unter den einzelnen Pegeln ändert sich stärker mit steigender Folgenzahl. Es finden auch stärkere Wechsel in der Höhenrangfolge der Pegel zwischen verschiedenen Folgenzahlen statt. Dies ist für die MHnThw nur in geringem Maße und geringer Höhendifferenz für die Pegel Husum, Bremerhaven und Wilhelmshaven, aber auch für Norderney und Wittdün der Fall. Bei den MHnTnw trifft dieses Verhalten allerdings für die meisten der betrachteten Pegel zu. Lediglich List weist stets für alle Folgenzahlen das höchste MHnTnw und Wilhelmshaven für alle Folgenzahlen das niedrigste MHnTnw, jeweils bezogen auf den Pegelnullpunkt der einzelnen Pegel, auf. Husum hingegen weist für die Folgenzahl 1, also Einzel-Tnw, den dritthöchsten Wert auf, fällt dann aber für drei und mehr aufeinanderfolgende Tnw relativ zu anderen Pegeln auf den drittletzten Platz ab.

Für den Zeitabschnitt 1954-2008 kann ein grundsätzlich ähnliches Verhalten, wie für den Zeitabschnitt 1937-2008 ausgeführt, beobachtet werden. Bei den MHnThw ist es lediglich Emden, wel-

ches zwar nicht die Rangfolge mit den darüber und darunter liegenden Pegeln wechselt, aber im Vergleich etwas stärker zwischen Folgenzahl 1 und 8 in der Höhe abfällt. Ebenso Helgoland, welches bei den Folgenzahl 1, also dem MHT₁₉₅₄₋₂₀₀₈ den vergleichsweise niedrigsten Wert aufweist, dann mit zunehmender Kettenlänge weniger stark abfällt, und so bis zur Folgenzahl 8 den drittletzten Rang einnimmt.

Tab. 4: Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHT_{nTnw} / MHT_{nThw}) in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008

| Pegel / Folgenzahl | | 1937-2008 | | | | | | | | 1954-2008 | | | | | | | |
|--------------------|-----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| List | Tnw | 616,5 | 564,5 | 527,8 | 503,9 | 488,7 | 475,0 | 466,6 | 456,8 | 621,8 | 571,0 | 532,7 | 507,5 | 490,3 | 476,7 | 468,5 | 459,7 |
| | Thw | 762,8 | 709,9 | 677,3 | 656,1 | 642,5 | 631,4 | 623,4 | 618,1 | 772,1 | 718,3 | 684,6 | 660,4 | 646,4 | 635,5 | 626,8 | 621,9 |
| Hörnum | Tnw | 605,4 | 553,5 | 519,1 | 495,7 | 480,9 | 468,5 | 459,8 | 449,7 | 610,7 | 559,6 | 523,4 | 498,8 | 481,7 | 469,3 | 461,3 | 451,8 |
| | Thw | 776,0 | 723,6 | 692,6 | 672,4 | 658,7 | 647,2 | 639,5 | 633,5 | 786,0 | 732,1 | 700,5 | 677,7 | 663,8 | 653,1 | 644,4 | 638,6 |
| Wyk | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | 610,9 | 548,1 | 503,9 | 476,1 | 455,4 | 441,8 | 432,8 | 420,4 |
| | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | 824,8 | 767,1 | 733,4 | 709,5 | 696,5 | 684,8 | 676,5 | 668,4 |
| Dagebüll | Tnw | 613,7 | 546,9 | 503,6 | 475,6 | 455,6 | 440,3 | 428,4 | 415,8 | 622,6 | 554,9 | 508,9 | 478,8 | 455,9 | 440,6 | 429,4 | 416,6 |
| | Thw | 828,2 | 768,5 | 735,9 | 712,9 | 700,2 | 686,7 | 678,6 | 670,9 | 839,3 | 779,5 | 745,3 | 719,2 | 706,5 | 693,7 | 684,7 | 676,5 |
| Wittdün | Tnw | 596,0 | 539,2 | 502,2 | 476,8 | 460,3 | 447,1 | 438,1 | 426,0 | 602,1 | 545,6 | 506,1 | 480,6 | 461,2 | 447,7 | 440,0 | 427,7 |
| | Thw | 791,8 | 738,6 | 707,6 | 688,5 | 676,1 | 665,0 | 657,9 | 651,3 | 801,6 | 747,3 | 715,6 | 694,2 | 681,2 | 671,1 | 663,3 | 656,2 |
| Husum | Tnw | 606,7 | 519,2 | 466,7 | 436,2 | 411,8 | 398,5 | 388,9 | 379,8 | 614,8 | 528,0 | 474,8 | 441,0 | 414,8 | 401,5 | 392,9 | 383,0 |
| | Thw | 884,1 | 818,1 | 778,1 | 751,8 | 736,6 | 722,7 | 713,4 | 704,1 | 894,9 | 829,6 | 786,4 | 758,3 | 742,0 | 728,5 | 718,4 | 707,7 |
| Helgoland | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | 577,3 | 527,0 | 490,2 | 467,3 | 452,7 | 441,0 | 434,7 | 426,0 |
| | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | 769,0 | 721,5 | 693,0 | 673,4 | 661,1 | 653,9 | 646,5 | 641,3 |
| Cuxhaven | Tnw | 595,7 | 527,3 | 485,2 | 456,7 | 437,0 | 422,6 | 414,3 | 405,4 | 603,8 | 533,9 | 488,8 | 459,9 | 438,4 | 424,6 | 416,7 | 407,2 |
| | Thw | 853,8 | 790,8 | 754,8 | 730,4 | 712,4 | 701,5 | 692,5 | 685,9 | 864,0 | 798,3 | 760,6 | 734,9 | 715,9 | 705,6 | 696,1 | 689,3 |
| Bremerhaven | Tnw | 573,9 | 493,0 | 448,0 | 417,9 | 395,7 | 380,3 | 372,2 | 362,4 | 580,7 | 497,5 | 449,1 | 419,1 | 394,9 | 380,9 | 373,0 | 362,4 |
| | Thw | 871,8 | 812,5 | 774,4 | 752,2 | 734,2 | 723,4 | 715,1 | 708,7 | 881,0 | 820,0 | 779,6 | 756,7 | 738,1 | 727,7 | 718,6 | 712,2 |
| LT Alte Weser | Tnw | 561,4 | 504,4 | 469,1 | 443,4 | 426,2 | 413,1 | 406,7 | 398,7 | 565,4 | 508,1 | 470,4 | 445,3 | 427,9 | 415,1 | 408,7 | 400,9 |
| | Thw | 795,7 | 748,1 | 717,8 | 697,8 | 684,4 | 675,9 | 668,5 | 662,7 | 804,4 | 753,9 | 721,8 | 701,3 | 687,2 | 679,2 | 671,3 | 665,0 |
| Wilhelmshaven | Tnw | 547,3 | 478,1 | 438,0 | 409,3 | 390,5 | 376,4 | 367,9 | 357,0 | 553,4 | 483,1 | 440,0 | 411,4 | 391,3 | 378,2 | 369,4 | 358,5 |
| | Thw | 870,2 | 810,2 | 771,2 | 750,7 | 734,3 | 724,1 | 715,7 | 710,2 | 879,0 | 817,8 | 775,1 | 755,3 | 738,3 | 728,6 | 719,4 | 714,0 |
| Norderney | Tnw | 590,0 | 534,6 | 498,7 | 473,1 | 456,0 | 442,4 | 434,9 | 427,9 | 595,7 | 541,0 | 501,7 | 476,3 | 456,7 | 444,8 | 437,0 | 429,7 |
| | Thw | 790,6 | 743,9 | 707,5 | 688,1 | 673,3 | 663,4 | 656,2 | 650,6 | 798,9 | 749,3 | 711,9 | 691,6 | 676,1 | 666,3 | 658,6 | 652,7 |
| Emden | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | 579,3 | 508,3 | 465,3 | 436,1 | 409,8 | 396,8 | 388,7 | 379,0 |
| | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | 855,1 | 796,0 | 748,7 | 724,7 | 706,7 | 695,1 | 686,1 | 679,1 |

Bei dieser Betrachtung muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass jeweils Wasserstandshöhen, bezogen auf den jeweiligen Pegelnullpunkt betrachtet werden. Ein absoluter Bezugshorizont ist daher aufgrund der in Kap. 3.6 erwähnten Problematik von Landsenkungsraten bzw. Offsetkorrekturen nicht gegeben. Dennoch geben die gemeinsam dargestellten erreichten Basishöhen der verschiedenen Pegel einen sehr guten Überblick über den unterschiedlichen Verlauf von Tnw- und Thw-Scheiteln mit jeweils zunehmenden Kettenlängen.

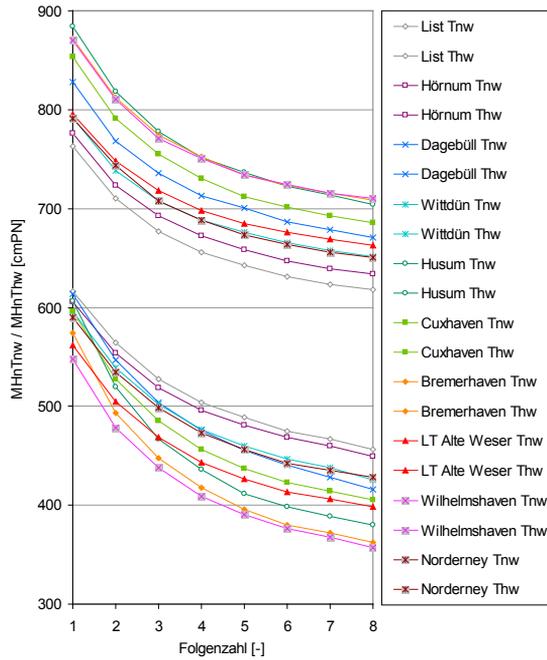


Abb. 37: Mittelwerte der maximal erreichten Basisshöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für den Zeitabschnitt 1937-2008

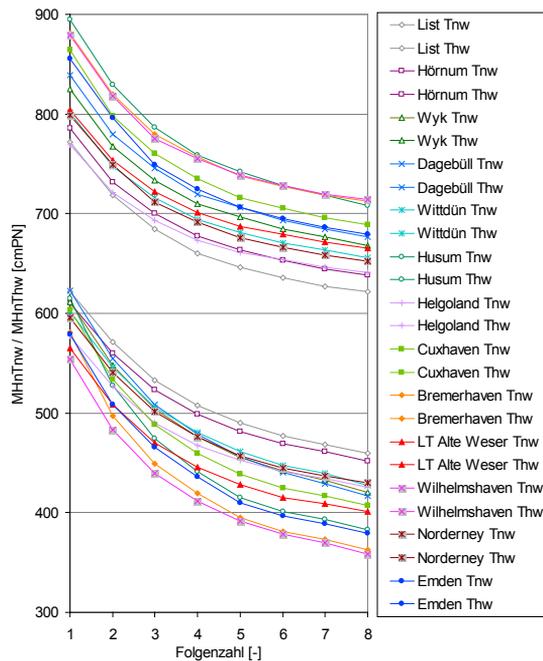


Abb. 38: Mittelwerte der maximal erreichten Basisshöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für den Zeitabschnitt 1954-2008

5.3 Ereignisanzahl und Auftretensverteilung von n hintereinander auftretenden T_{nw}- und T_{thw}-Folgen

Hinsichtlich der Anzahl und Verteilung der aufgetretenen Ereignisse von 1-8 Tiden in Folge nicht unterschrittener Tidescheitel bzw. Wasserstände wurden separate Auswertungen der Tidekettenbestimmung für die T_{nw}- und T_{thw} für jedes Jahr des Auswertungszeitabschnitts durchgeführt. In der Folge wurden aus diesen Häufigkeitsmatrizen Zeitreihen von Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende T_{nw} oberhalb verschiedener Bezugshorizonte ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Pegelzeitreihen zu gewähren, sind diese Bezugshorizonte zum einen auf die jeweiligen MT_{nw} und MT_{thw} der Pegel und des Gesamtauswertungszeitabschnitts und zum anderen auf den jeweiligen Jahres-MSL bezogen. Erstere Auszählung bezieht sich also auf ein über den Auswertungszeitabschnitt konstantes Niveau. Trends des MSL bzw. Trends der T_{nw} oder T_{thw} (jeweils für T_{nw}- und für T_{thw}-Folgen) oder eine erhöhte Sturmaktivität sollten sich also in dieser Auswertung ebenfalls in einer Zunahme entsprechender Kettenereignisse darstellen. Um die Auswirkungen des ansteigenden Meeresspiegels auf die Auftretenshäufigkeit von Tideketten zu eliminieren, wurde in einem zweiten Schritt die Auswertung unter Anwendung eines zeitabhängigen Grenzniveaus in Bezug auf den Jahres-MSL des jeweiligen Pegels durchgeführt. Die parallele Betrachtung von konstanten und zeitabhängig auf den MSL bezogenen Bezugshorizonten ist aus einem weiteren Grund wichtig. In Bezug auf konstante Niveaus kann ersehen werden, mit welcher Häufigkeit und welchem Trend Tidekettenereignisse entsprechender Basishöhe Strandabschnitte, Kliffs, Deckwerke, Warftkanten o.ä. in diesem Höhenbereich besonders belasten. In Bezug auf den jeweiligen Jahres-MSL wird ersichtlich, in wie weit das Verhalten von Tidekettenereignissen gegebenenfalls bei zukünftigen Bauwerksbemessungen gesondert in Bezug auf den Trend des MSL berücksichtigt werden muss.

Die Gesamtauswertung umfasst dabei alle Wasserstände zwischen NNT_{nw} und HHT_{nw} bzw. zwischen NNT_{thw} und HHT_{thw} der Bezugszeiträume in 1 cm Stufen. Für die Übersichtsdarstellungen in Anhang 2 des Abschlussberichtes sowie für die Trendübersichten wurden jeweils drei Bezugshorizonte ausgewählt. Für die

- T_{nw} konstant: MT_{nw} + 150 cm, MT_{nw} + 200 cm, MT_{nw} + 250 cm,
- T_{nw} zeitabhängig: MSL + 0 cm, MSL + 50 cm, MSL + 100 cm,
- T_{thw} konstant: MT_{thw} + 0 cm, MT_{thw} + 100 cm, MT_{thw} + 200 cm,
- T_{thw} zeitabhängig: MSL + 100 cm, MSL + 200 cm, MSL + 300 cm.

Mit der Auswahl dieser Niveaus für die Übersichtsdarstellung sollen dabei jeweils die extremen T_{nw}- und T_{thw}-Kettenereignisse sowie die für Fragestellungen der Binnenentwässerung bei den T_{nw} bzw. Sturmflutsituationen bei den T_{thw} abgedeckt werden. Andererseits wäre es auch nicht zweckmäßig, als Bezugshorizont beispielsweise für die Abgrenzung von T_{nw}-Ketten einen Wert von MT_{nw} + 0 cm zu wählen, da sich die Mehrzahl aller normalen T_{nw} in dieser Größenordnung bewegen und so sehr hohe Überschreitungszahlen aller Folgenlängen auftreten, welche zudem keine praktische Relevanz z.B. für die Sielentwässerung aufweisen. Für die T_{thw}-Ketten wurde zur unteren Abgrenzung allerdings das entsprechende Niveau MT_{thw} + 0 cm in die Übersicht mit aufgenommen.

Aufgrund dieser Herangehensweise sind jeweils die verschiedenen Auswertungen, basierend auf den konstanten Bezugsniveaus, zwischen den Pegel vergleichbar. Ebenso die Auswertungen, basierend

auf den zeitabhängigen Bezugsniveaus. Nicht notwendigerweise direkt vergleichbar sind jedoch konstantes und zeitabhängiges Bezugsniveau innerhalb eines Pegels. Dies ist darin begründet, dass die MThw bzw. MTnw der verschiedenen Pegel unterschiedliche Differenzen zum entsprechenden MSL aufweisen (unabhängig davon, dass zudem der MSL des jeweiligen Jahres genutzt wird). Nur wenn z.B. das MTnw des Bezugszeitabschnitts in der Größenordnung von 150 cm unterhalb des MSL des Bezugszeitabschnitts liegt, lässt sich mit hoher Berechtigung der Unterschied zwischen konstantem und zeitabhängigem Bezugshorizont darstellen. Dies trifft beispielsweise für die Tnw-Folgen des Pegels Cuxhaven und LT Alte Weser zu.

Der Pegel Cuxhaven ist exemplarisch für die vergleichbaren Bezugshorizonte $MTnw + 200$ cm (konstant) und $MSL + 50$ cm (zeitabhängig) für Folgenzahlen von 1-3 in Abb. 39 abgebildet. Die Überschreitungszahlen bzw. Ereignishäufigkeit von entsprechenden Tnw-Folgen ist in Form der roten Säulen dargestellt. Wie zu erkennen ist, reichen die Überschreitungszahlen von 0 bis 10 Ereignisse pro Jahr für die Folgenzahl 1, 0 bis 2 Ereignisse pro Jahr für die Folgenzahl 2 und für Tideketten mit 3 Tnw in Folge $\geq MTnw + 200$ bzw. $\geq MSL + 50$ cm wurde nur 1991 ein einziges Ereignis ermittelt. Weiterhin ist über die Ereigniszahl ein linearer Trend ermittelt worden, dessen Anstieg jeweils in der linken Hälfte der Zeitreihendarstellung aufgeführt ist. Die nominellen Werte sind dabei von der jeweiligen Ereignisanzahl des untersuchten Bezugshorizonts und der untersuchten Folgenzahl abhängig. Daher ist es ebenfalls nur zulässig, Trendzahlen jeweils gleicher Bezugshorizonte bzw. vergleichbarer Bezugsniveaus zu vergleichen. Eine Interpretation hat vorsichtig zu geschehen, da die entsprechenden Trendanstiege durch nur sehr wenige Ereignisse gestützt werden. Dies zeigen auch die $1-\sigma$ -Standardfehler, welche jeweils in der gleichen Größenordnung der angegebenen Trends liegen (rund 50% bis 150% der Trendwerte). Die zu Beginn des Kapitels erwähnte Annahme, dass sich aus der zeitabhängigen Wahl des Bezugshorizonts auf Basis des jeweiligen Jahres-MSL im Vergleich zu einem konstanten Niveau eine Reduktion des Trends des Auftretens von Tideketten ergibt, kann am Beispiel der Tnw-Folgen des Pegels Cuxhaven bestätigt werden.

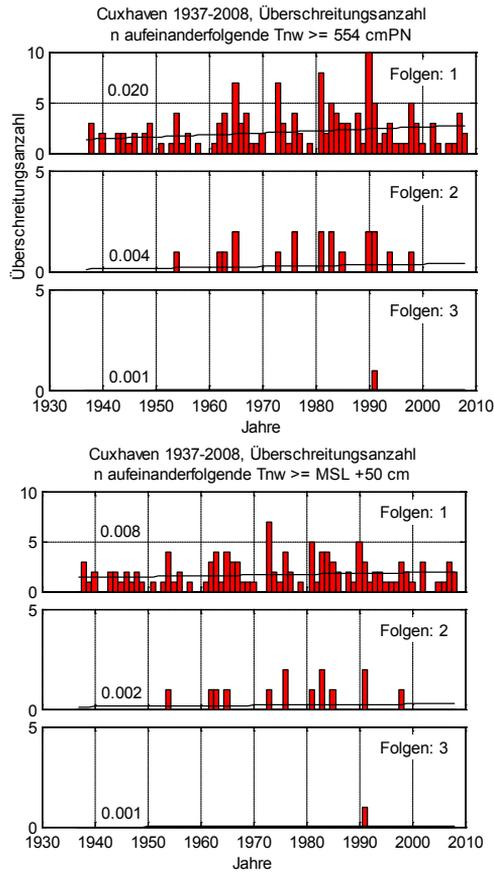


Abb. 39: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungsanzahlen durch 1-3 aufeinanderfolgende Tnw (Folgen 4-8 unbesetzt). Oben: \geq $M_{Tnw_{1937-2008}} + 200$ cm = 554 cm, unten: \geq MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

Auch, wenn der verbleibende nominelle Trend für den zeitabhängigen Bezugshorizont am Pegel Cuxhaven (Zeitabschnitt 1937-2008) sehr gering und nahe Null ist, finden sich die höheren Ereigniszahlen in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitabschnitts. Mit Ereigniszahlen von 1 bzw. 2 Ketten pro Jahr ist diese Betrachtung allerdings nicht signifikant.

Wie für die Tnw und Thw des Pegels Cuxhaven, zeigt sich auch für die Tnw des Pegels LT Alte Weser, die Tnw des Pegels Wilhelmshaven, die Thw des Pegels Emden und die Tnw des Pegels Husum ein ausgeglichenes Bild ohne signifikante Trends, bzw. mit Ausnahmen (Husum, LT Alte Weser) bei den Tnw auch mit negativen Trends. Für alle übrigen Pegel und die jeweils nicht genannten Parameter der gerade aufgeführten Pegel ergibt sich jedoch eine erkennbare Häufung von Ereignissen, welche pegelübergreifend zwischen etwa Mitte der 70er bis Mitte/Ende der 90er Jahre zu beobachten ist. Diese Häufung ist dabei sowohl für die konstanten Bezugshorizonte als auch für die zeitabhängigen Bezugshorizonte vorhanden. Abb. 40 und Abb. 41 sollen dies exemplarisch anhand der mittleren der drei Bezugshorizonte für Tnw- und Thw-Folgen des Pegels List verdeutlichen.

In Tab. 5 und Tab. 6 sind die entsprechenden Trendwerte aufgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde sich dabei auf den jeweils höchsten Bezugshorizont der zeitabhängigen MSL-

Beschickung beschränkt. Alle Trendwerte der übrigen Bezugshorizonte finden sich in den Überschreitungsgrafiken innerhalb des Anhang 2 des Abschlussberichtes. Zur besseren Lesbarkeit wurde die führende Null vor dem Dezimaltrennzeichen nicht aufgeführt.

In Tab. 5 sind die Ergebnisse der linearen Trendanalysen auf Basis der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden $T_{nw} \geq MSL + 100$ cm des jeweiligen Jahres in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 für alle Pegel zusammengestellt und in Tab. 6 finden sich die entsprechenden Ergebnisse für Thw-Ereignisse $\geq MSL + 300$ cm des jeweiligen Jahres.

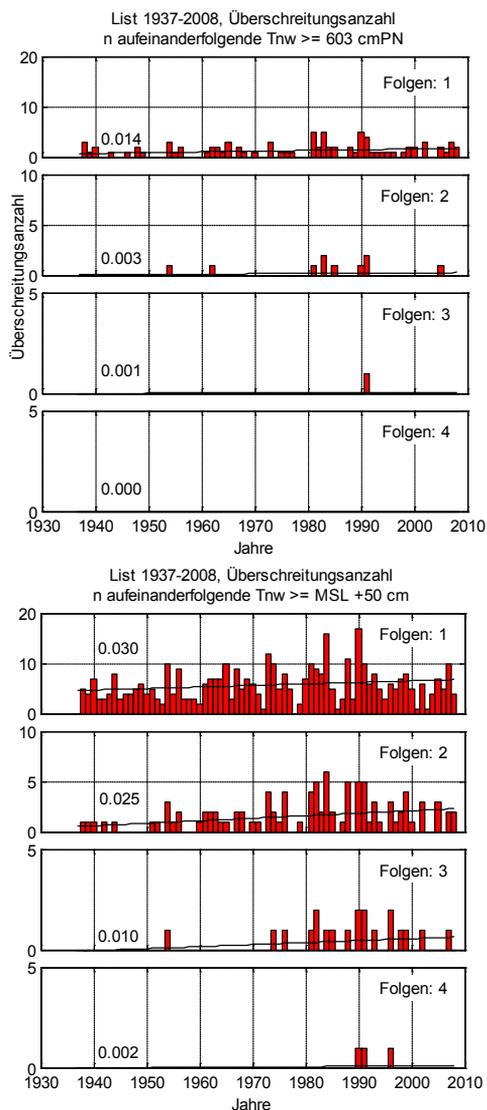


Abb. 40: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende T_{nw} (Folgen 5-8 unbesetzt).
 Oben: $\geq MT_{nw1937-2008} + 200$ cm = 603 cm, unten: $\geq MSL + 50$ cm des jeweiligen Jahres

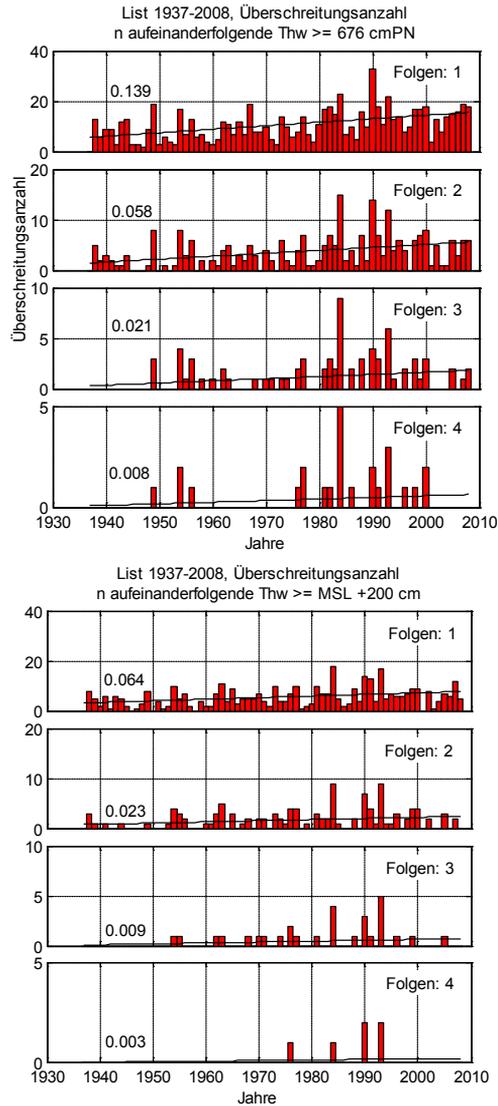


Abb. 41: List 1937-2008, Überschreitungen durch 1-4 aufeinanderfolgende Thw (Folgen 6-8 für MSL besetzte Reihe unbesetzt). Oben: $\geq MThw_{1937-2008} + 100 \text{ cm} = 676 \text{ cm}$, unten: $\geq \text{MSL} + 200 \text{ cm}$ des jeweiligen Jahres

Tab. 5: Ergebnisse der linearen Trendanalysen (Ereignisse/a) der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden $T_{nw} \geq MSL + 100$ cm in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008

| Pegel / Ereigniszahl | | 1937-2008 | | | | | | | | 1954-2008 | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|-----------|-------|------|---|---|---|---|---|-----------|-------|------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| List | Tnw | ,012 | ,002 | ,001 | | | | | | ,004 | -,002 | ,001 | | | | | |
| Hörnum | Tnw | ,004 | ,001 | ,001 | | | | | | -,005 | -,002 | ,001 | | | | | |
| Wyk | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | ,004 | -,002 | ,001 | | | | | |
| Dagebüll | Tnw | ,010 | ,000 | | | | | | | ,001 | -,002 | | | | | | |
| Wittdün | Tnw | ,006 | ,001 | ,001 | | | | | | -,004 | -,002 | ,001 | | | | | |
| Husum | Tnw | ,008 | -,001 | | | | | | | -,002 | -,004 | | | | | | |
| Helgoland | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | -,004 | -,003 | | | | | | |
| Cuxhaven | Tnw | ,006 | -,001 | | | | | | | -,007 | -,003 | | | | | | |
| Bremerhaven | Tnw | ,003 | | | | | | | | -,004 | -,001 | | | | | | |
| LT Alte Weser | Tnw | -,001 | -,000 | | | | | | | -,003 | -,001 | | | | | | |
| Wilhelmshaven | Tnw | ,000 | ,000 | | | | | | | -,003 | ,000 | | | | | | |
| Norderney | Tnw | ,000 | -,000 | | | | | | | -,008 | -,001 | | | | | | |
| Emden | Tnw | - | - | - | - | - | - | - | - | -,002 | ,000 | | | | | | |
| synth. Zeitreihe (S H) | Tnw | ,008 | ,001 | ,001 | | | | | | -,000 | -,002 | ,001 | | | | | |
| synth. Zeitreihe (Niedersachsen) | Tnw | ,002 | -,000 | | | | | | | -,004 | -,001 | | | | | | |
| synth. Zeitreihe (Dt. Bucht) | Tnw | ,005 | ,000 | ,001 | | | | | | -,003 | -,002 | ,001 | | | | | |

Tab. 6: Ergebnisse der linearen Trendanalysen (Ereignisse/a) der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden Thw \geq MSL + 300 cm in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008

| Pegel / Ereigniszahl | | 1937-2008 | | | | | | | | 1954-2008 | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|-----------|------|------|------|------|---|---|---|-----------|-------|-------|------|------|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| List | Thw | ,005 | ,001 | | | | | | | ,005 | ,001 | | | | | | |
| Hörnum | Thw | ,009 | | | | | | | | ,004 | | | | | | | |
| Wyk | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | ,010 | -,001 | ,001 | ,001 | | | | |
| Dagebüll | Thw | ,034 | ,006 | ,002 | ,001 | | | | | ,015 | ,001 | ,002 | ,000 | | | | |
| Wittdün | Thw | ,011 | ,001 | | | | | | | ,008 | ,001 | ,000 | ,000 | | | | |
| Husum | Thw | ,053 | ,026 | ,007 | ,003 | ,001 | | | | ,034 | ,013 | ,003 | ,002 | ,002 | | | |
| Helgoland | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | ,001 | | | | | | | |
| Cuxhaven | Thw | ,016 | ,004 | ,002 | ,001 | ,001 | | | | -,001 | -,002 | -,000 | ,001 | ,001 | | | |
| Bremerhaven | Thw | ,035 | ,014 | ,004 | ,002 | ,001 | | | | ,007 | ,004 | ,002 | ,002 | ,001 | | | |
| LT Alte Weser | Thw | ,011 | ,003 | ,000 | | | | | | ,009 | ,002 | -,000 | | | | | |
| Wilhelmshaven | Thw | ,037 | ,014 | ,004 | ,002 | ,001 | | | | ,009 | ,004 | ,001 | ,001 | ,001 | | | |
| Norderney | Thw | ,010 | ,002 | | | | | | | ,005 | ,002 | | | | | | |
| Emden | Thw | - | - | - | - | - | - | - | - | ,012 | ,004 | ,002 | ,001 | | | | |
| synth. Zeitreihe (SH) | Thw | ,022 | ,009 | ,004 | ,002 | ,001 | | | | ,013 | ,003 | ,001 | ,001 | ,002 | | | |
| synth. Zeitreihe (Niedersachsen) | Thw | ,022 | ,007 | ,003 | ,002 | ,001 | | | | ,007 | ,002 | ,001 | ,001 | ,001 | | | |
| synth. Zeitreihe (Dt. Bucht) | Thw | ,022 | ,008 | ,003 | ,002 | ,001 | | | | ,009 | ,002 | ,001 | ,001 | ,001 | | | |

6. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der Verweildauern der Tidewasserstände in der Deutschen Bucht

Nach den Auswertungen zur Entwicklung des MSL und der Tideketten sollen hier nun die Ergebnisse zu den Betrachtungen der Verweildauern der Tidewasserstände dargestellt und diskutiert werden. Die zugrunde liegende Auswertemethodik wurde in Kap. 3.8 beschrieben.

Die Verweildauer definiert die Zeit, in der sich ein Wasserstand innerhalb vorgegebener Grenzen bewegt. Für die Auswertung der Verweildauern in der Deutschen Bucht werden die Grenzbereiche als Höhenstufen definiert, die jeweils 20 cm umfassen. Die Entwicklung der Verweildauern wird in unterschiedlichen Zeitabschnitten analysiert. Um saisonale Differenzen ausfindig zu machen, werden daher sowohl Kalenderjahre, als auch Sommerhalbjahre und Winterhalbjahre ausgewertet. Die entsprechenden Untersuchungen ermöglichen einen Überblick über die jeweiligen Verläufe der Exposition von Watt und Vegetation, der potenziellen Belastung von Küsten, Stränden, Deckwerken, Deichen etc. sowie ebenso wie die Tideketten über potenzielle Be- oder Verhinderung der Binnenentwässerung.

Diese Auswertungen sind nur für Zeitreihenabschnitte möglich, für die mindestens stündliche Wasserstandsaufzeichnungen vorliegen; nur auf Basis einer Scheitelzeitreihe ist keine Bestimmung von Verweilzeiten möglich. Die Auswertung der Verweildauern beschränkt sich damit für fast alle untersuchten Pegel auf den Zeitabschnitt von 1994, bzw. 1997, 1999 und 2000 bis 2008. Lediglich für den Pegel Cuxhaven liegen bis 1918 zurückreichend mindestens Stundenwerte lückenlos digital vor

(Abb. 2). Aus diesem Grund konnten aussagekräftige Untersuchungen über den Verlauf der Verweildauern nur für den Pegel Cuxhaven durchgeführt werden.

Für die Auswertung von Verweildauern von Sturmflutwasserständen konnte darüber hinaus auf durchgehend digitalisierte Ganglinien eines Sturmflutkollektivs von 311 Ereignissen für den Pegel Cuxhaven (Zeitabschnitt 1901 bis 2008) und 199 Ereignissen für den Pegel Hörnum (Zeitabschnitt 1936 bis 2008) aus dem Projekt XtremRisK (OUMERACI et al., 2009) zurückgegriffen werden.

6.1 Ergebnisse der Verweildaueruntersuchungen der Pegel

Für den Pegel Cuxhaven liegt über das gesamte verfügbare Datenkollektiv die einzige, langjährig durchlaufende Zeitreihe von Stundenwerten vor. Abb. 42 zeigt die Entwicklung der Auswertung von allen Wasserstandswerten eines Jahres über mittlere Tiden und Verweildauern von Einzeljahren (Abb. 42 Mitte und links) und schließlich zur Aneinanderreihung der jährlichen mittleren Tide vom Start des Gesamtauswertungszeitabschnitts 1918 bis zum Ende 2008 in Form einer durchlaufenden Kurvenfläche (Abb. 42 rechts). Mit dieser durchlaufenden, dreidimensionalen Kurvenfläche sind verschiedene Betrachtungen möglich. Anhand der Konturlinien ist bereits in der isometrischen Perspektive ein ansteigender Trend des Gesamtniveaus der mittleren Tide erkennbar. Abb. 43 stellt diese Kurvenfläche der jährlichen Mittleren Tide auf der linken Hälfte als Seitenansicht dar und zeigt damit den bereits aus übrigen Zeitreihenuntersuchungen bekannten Verlauf der MThw- als auch der MTnw-Scheitel. Auf der rechten Hälfte der Abb. 43 ist die Kurvenfläche von der Stirnseite dargestellt und zeigt damit die Umhüllende aller mittleren Jahrestiden.

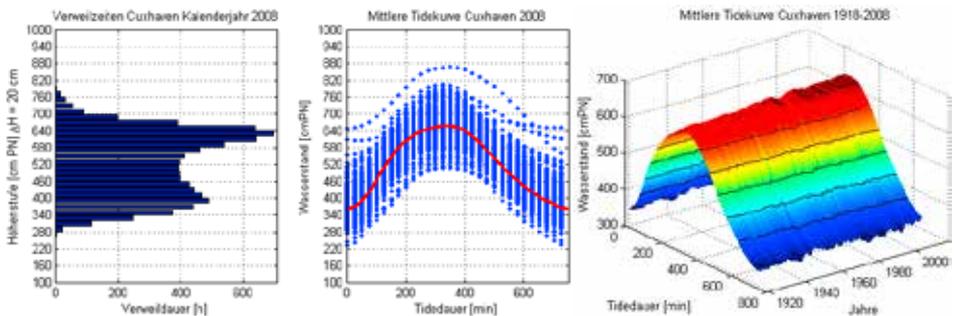


Abb. 42: Pegel Cuxhaven: Verweildauer Verteilung für das Kalenderjahr 2008 (links), Mittlere Tide (durchgezogene Linie) und ausgedünnte Punktplots aller Einzeltiden (Punkte) des Kalenderjahr 2008 und Verlauf der jährlichen Mittleren Tide von 1918 bis 2008 (rechts)

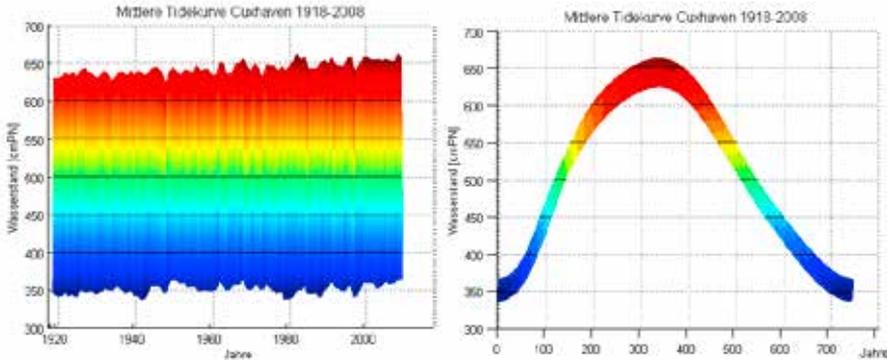


Abb. 43: Pegel Cuxhaven, Darstellung der Kurvenfläche der jährlichen Mittleren Tide von 1918 bis 2008 (Links: Seitenansicht, Wasserstand bezogen auf Jahre, Rechts: Stirnansicht, Wasserstand bezogen auf Tidedauer)

Eine weitere Art der Darstellung ergibt sich in Form einer senkrechten Draufsicht (Abb. 44). Auf der Ordinate ist die Tidedauer in Minuten und auf der Abszisse ist die Zeit aufgetragen. Die Wasserstände, bezogen auf den Pegelnullpunkt, sind als Konturflächen und -linien im Abstand von 50 cm dargestellt. Anhand der Konturflächen kann der Verlauf der durch jeweils gleiche Wasserstände eingenommene Anteil an der Gesamtdauer einer Tide nachvollzogen werden. Sie geben damit Auskunft über die Zunahme mittlerer Verweildauern des Wasserstands oberhalb verschiedener Niveaus, bezogen auf den Pegelnullpunkt und ohne Berücksichtigung des MSL-Verlaufs.

Um diese Zunahme zu quantifizieren, wurden an die Konturlinien des Wasserstands von 400 cmPN und 600 cmPN jeweils für den Flutast (jeweils obere Trendlinie in Abb. 44) und den Ebbast (jeweils untere Trendlinie in Abb. 44) lineare Trends angepasst. Die schwarzen Trendgeraden spannen so den Anteil der Tidedauer auf, in der der Wasserstand am Pegel Cuxhaven oberhalb 600 cmPN verweilt. Während diese Verweildauer 1918 180 min betrug, lag sie 2008 bei 244 min und weist somit eine Zunahme von 36% bei einem mittleren jährlichen Trend von 0,7 min/a auf. Analog spannen die weißen Linien den Anteil der Tidedauer auf, in der der Wasserstand am Pegel Cuxhaven oberhalb 400 cmPN verweilt. 1918 betrug diese Verweildauer 559 min und sie wächst bis 2008 auf 598 min. Eine Erhöhung und Aufsteilung der mittleren Tidekurve zeigt sich also auch in Form der Verweildauerzunahme, die für niedrigere Tidewasserstände einen geringeren Wert annimmt. Hier mit einer Zunahme von 7% der mittleren Verweildauer über 400 cmPN, entsprechend einem mittleren jährlichen Trend von 0,43 min/a. In den Verweildauern innerhalb der Tidedauer lässt sich also für den Pegel Cuxhaven ein ähnlicher Effekt wie für die in JENSEN und MUDERSBACH (2007) beschriebene Zunahme des Tidehubs durch unterschiedliche Anstiege von MT_{nw} und MTh_w zeigen.

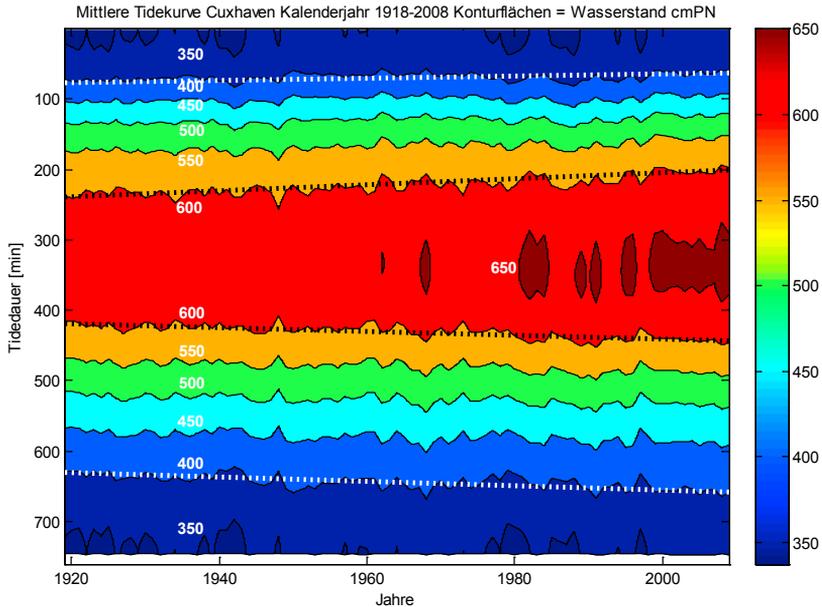


Abb. 44: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weiße Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN

Die Zeitreihen für die Sommerhalbjahre 1918-2008 und Winterhalbjahre 1917/18-2007/08 wurden auf gleiche Weise ausgewertet. Die entsprechenden Ergebnisse sind gemeinsam mit den vorgenannten Werten für die Kalenderjahre in Tab. 7 zusammengestellt.

Tab. 7: Pegel Cuxhaven, mittlere Verweildauerzunahme

| | Kalenderjahre | Sommerhalbjahre | Winterhalbjahre |
|---|---------------|-----------------|-----------------|
| Verweildauer ≥ 400 cmPN 1918 | 559 min | 562 min | 549 min |
| Verweildauer ≥ 400 cmPN 2008 | 598 min | 588 min | 599 min |
| Verweildauer ≥ 600 cmPN 1918 | 180 min | 187 min | 165 min |
| Verweildauer ≥ 600 cmPN 2008 | 244 min | 239 min | 232 min |
| Prozentuale Zunahme Verweildauer ≥ 400cmPN | 7% | 5% | 9% |
| Prozentuale Zunahme Verweildauer ≥ 600cmPN | 36% | 28% | 41% |
| linearer Trend Zunahme Verweildauer ≥ 600cmPN | 0,70 min/a | 0,29 min/a | 0,55 min/a |
| linearer Trend Zunahme Verweildauer ≥ 400cmPN | 0,43 min/a | 0,57 min/a | 0,74 min/a |

Wie diesen Ergebnissen zu entnehmen ist, sind sowohl für die Verweildauern oberhalb 400 cmPN als auch 600 cmPN die weitaus stärksten Zunahmen im Winterhalbjahr zu verzeichnen. Auch die Darstellung der Konturflächen für die Sommerhalbjahre (Abb. 45) und Winterhalbjahre (Abb. 46) zeigt die stark unterschiedlichen Verläufe, die sich bei den Winterhalbjahren insbesondere durch eine deutlich höhere interannuelle Varianz der Verweildauern auszeichnet.

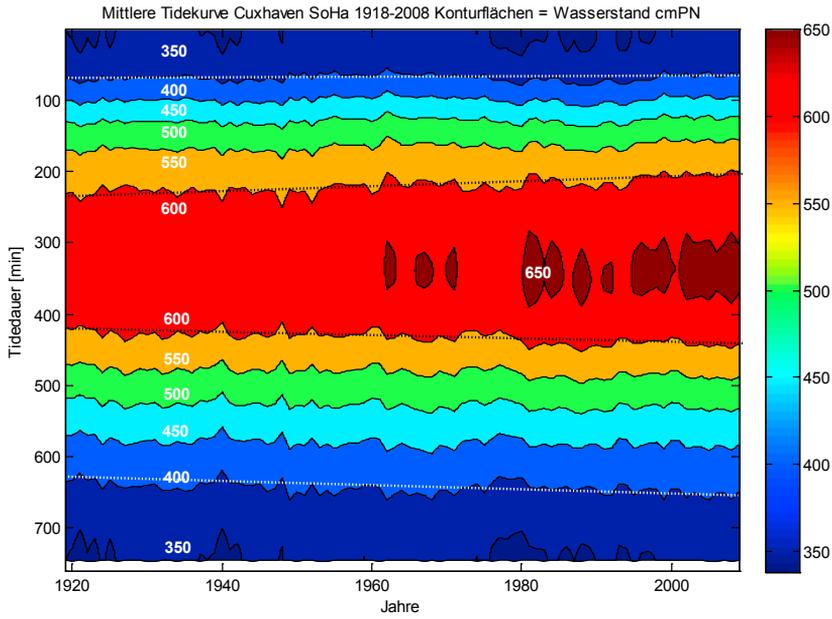


Abb. 45: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven für Sommerhalbjahre von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weiße Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN

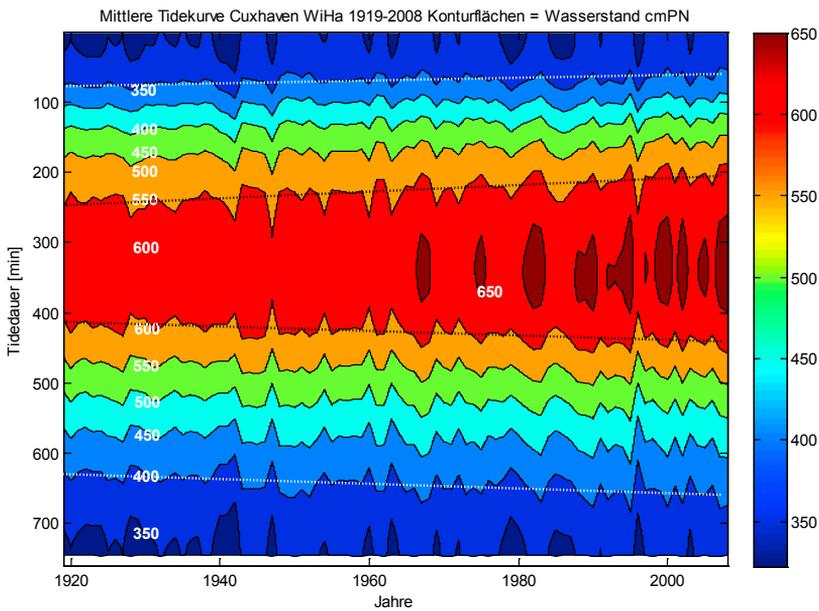


Abb. 46: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven für Winterhalbjahre von 1917/18 bis 2007/08. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weiße Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN

Analog zur Herangehensweise der Zusammenstellung eines Flächenverlaufs der mittleren Tidekurve über den Gesamtbeobachtungszeitabschnitt, kann der Verlauf der Verweildauern über den Gesamtzeitabschnitt erstellt und visualisiert werden. Es werden also nicht die mittleren Tidekurven der einzelnen Jahre (Abb. 42, Mitte), sondern die Verweildauern je Höhenstufe der einzelnen Jahre (Abb. 42, links) aneinander gereiht. Es resultiert die in Abb. 47 in isometrischer Perspektive dargestellte Folge von Verweildauersäulen. Jede einzelne Säule zeigt dabei, wie lang sich der Wasserstand im jeweiligen Jahr innerhalb der jeweiligen Höhenstufe aufgehalten hat.

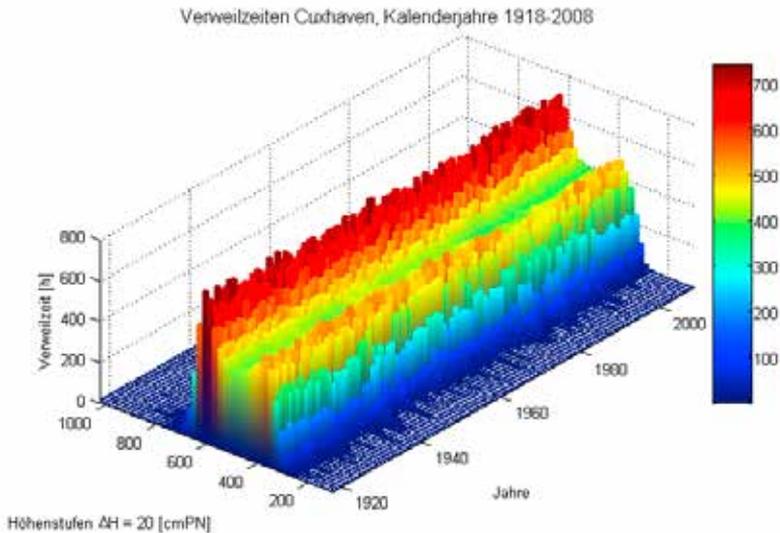


Abb. 47: Verlauf der jährlichen Verweildauern für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben die Verweilzeit in Stunden pro Jahr an (Isometrie)

In der Aufsicht, welche in der Ordinate die Höhenstufen oberhalb des Pegelnullpunkts und in der Abszisse die Jahre zeigt, wird der Verlauf der Höhenverteilungen deutlicher (Abb. 48). Der Farbwert der einzelnen Elemente gibt wie in Abb. 47 die Verweildauer in Stunden an; in leeren Elementen hielt sich der Wasserstand während des gesamten Jahres nicht auf. Somit sind in dieser Ansicht Jahre mit extremen Scheitelwasserständen einfach durch die Verteilung der Randelemente gut erkennbar. Weiterhin kann die bimodale Verteilung der Verweildauerkurve mit zwei deutlichen Scheiteln, einmal um die Thw und einmal um die Tnw herum gut in Form der zwei „Gipfelkämme“ verfolgt werden. Die obere Kammlinie kann aufgrund der hohen Verweildauern von 600 und mehr Minuten durch die rotschattierten Elemente in Abb. 48 sehr einfach wahrgenommen werden. Die untere Kammlinie weist niedrigere Verweildauerspitzen auf und tritt im Vergleich in der Aufsicht nicht ganz so deutlich hervor. Beide Gipfelkämme wurden daraufhin auf ihre Trends untersucht und die entsprechenden Ausgleichslinien ebenfalls in Form der gestrichelten schwarzen Linie in Abb. 48 dargestellt.

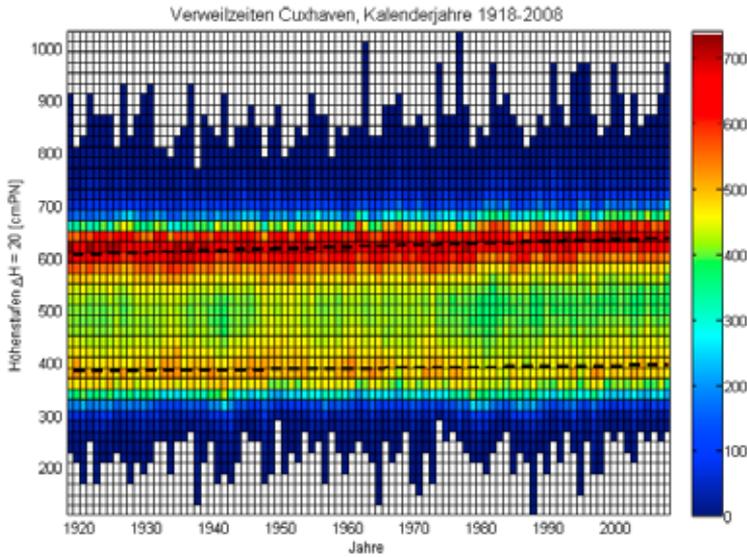


Abb. 48: Verlauf der jährlichen Verweildauern für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben die Verweildauer in Stunden pro Jahr an (Aufsicht)

Um diese Anstiegsraten der Höhenstufen der höchsten Verweildauern zu bestimmen, wurde eine entsprechende Teilmenge aller Verweildauerelemente ≥ 600 h/a erzeugt und diesen Elementen als Gewichtungswert die Verweildauer oberhalb des Grenzwertes von 600 h/a zugeordnet. Aus dieser Teilmenge, die in Abb. 49 dargestellt ist, wurde durch lineare Regression sowohl eine ungewichtete als auch gewichtete Trendgerade bestimmt. Die gewichtete Trendgerade ergibt somit eine Anstiegsrate von 0,25 cm/a für Verweildauern ≥ 600 h/a am Pegel Cuxhaven an.

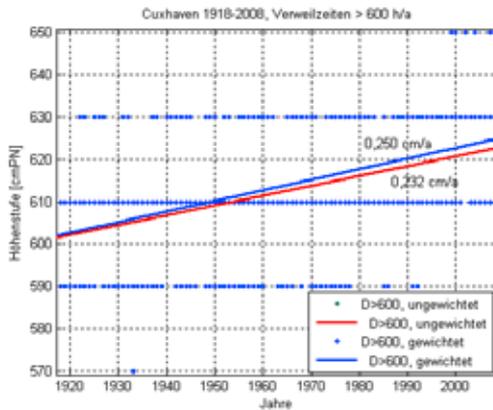


Abb. 49: Pegel Cuxhaven: Verteilung jährlicher Verweildauern ≥ 600 h/a in Bezug auf Höhenstufe und Jahr (Punkte) sowie lineare Trends (ungewichtet: rote Linie, gewichtet: blaue Linie)

In ähnlicher Weise wurden die Anstiegsraten der Höhenstufen der Verweildauern untersucht, die den unteren, weniger ausgeprägten Kamm der Wasserstände um den Tnw herum bilden (Abb. 50). Eine Separation aller Verweildauerelemente ≥ 450 h/a, welche den unteren Gipfelbereich defi-

nieren, würde ohne Nebenbedingung auch alle Verweildauern des oberen, in Abb. 49 dargestellten Kamms um die Thw-Wasserstände herum erfassen. Daher wurde zusätzlich die Nebenbedingung herangezogen, dass nur Höhenstufen unterhalb 500 cmPN zu der Teilmenge zugelassen werden. Die ermittelte Anstiegsrate für für Verweilzeiten ≥ 450 h/a und Höhenstufen < 500 cmPN beträgt 0,1 cm/a.

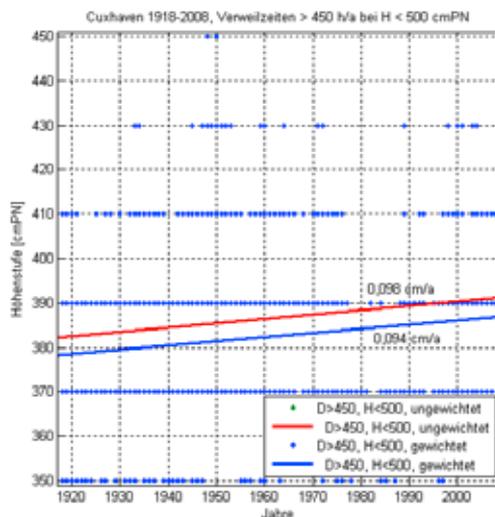


Abb. 50: Pegel Cuxhaven: Verteilung jährlicher Verweildauern ≥ 450 h/a (für Höhenstufen unterhalb 500 cmPN) in Bezug auf Höhenstufe und Jahr (Punkte) sowie lineare Trends (ungewichtet: rote Linie, gewichtet: blaue Linie)

Auch in den jährlichen Verweildauern schlägt sich also der Anstieg der Tidewasserstände, der für Thw und Tnw zudem unterschiedlich aussfällt, nieder. Während es 1918 ein Niveau von 602,1 cmPN war, welches im Mittel länger als 600 h/a durch den Wasserstand erreicht wurde, hat sich dieses Niveau bis zum Jahr 2008 auf 624,9 cmPN erhöht. Dies entspricht einer Erhöhung von 3,8%, bzw. einem Anstieg von 0,25 cm/a. Für Verweildauern niedriger Wasserstände hat sich das Niveau von 378,2 cmPN, welches 1918 im Mittel länger als 450 h/a durch den Wasserstand eingenommen wurde, auf 386,8 cmPN bis zum Jahr 2008 erhöht. Dies entspricht einer Erhöhung von 2,3%, bzw. einem Anstieg von 0,09 cm/a.

Entsprechend des betrachteten Verhaltens muss es also Höhenstufen geben, in welcher die Verweildauer des Wasserstandes einen ansteigenden Trend aufweist. Aber ebenso Höhenstufen, wo die Verweildauern absteigenden Trend aufweisen. Dies kann gezeigt werden, wenn für beliebige Höhenstufen Jahreszeitreihen der entsprechenden Verweildauern separiert und dargestellt werden. So zeigt Abb. 51 den Verweilzeitenverlauf der Höhenstufen von 620-640 cmPN, 640-660 cmPN und 660-680 cmPN von 1918-2008 (Benennung in der Grafik jeweils durch die Mitte der Höhenstufen). Die ebenfalls dargestellten, ermittelten linearen Trends weisen unterschiedliche Anstiegsraten zwischen 1,24 h/a (Höhenstufe 620-640 cmPN) und 2,71 h/a (Höhenstufe 660-680 cmPN) auf. Demgegenüber zeigt Abb. 52 für die Höhenstufen von 560-580 cmPN, 580-600 cmPN und 600-620 cmPN abfallende Trends zwischen -0,61 h/a (Höhenstufe 600-620 cmPN) und -1,266 h/a (Höhenstufe 580-600 cmPN).

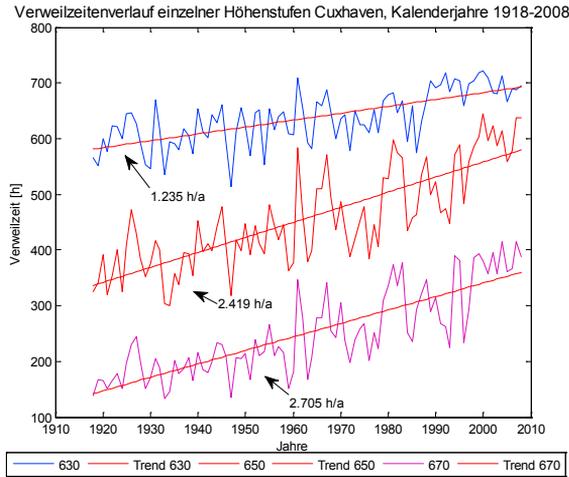


Abb. 51: Verweilzeitenverlauf einzelner Höhenstufen (620-640 cmPN, 640-660 cmPN und 660-680 cmPN, jeweils mit Stufenmitte gekennzeichnet) mit steigenden Trendverläufen, Cuxhaven, 1918-2008

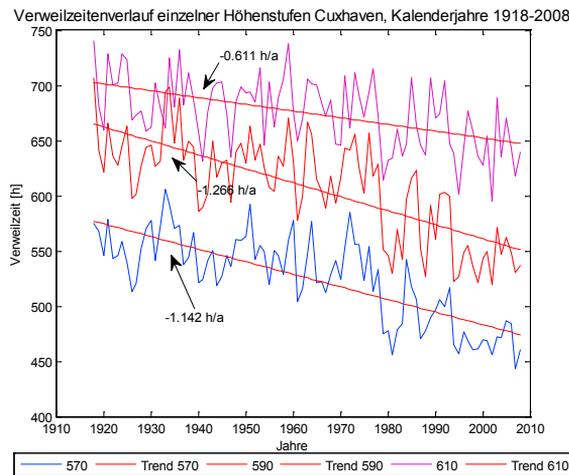


Abb. 52: Verweilzeitenverlauf einzelner Höhenstufen (560-580 cmPN, 580-600 cmPN und 600-620 cmPN, jeweils mit Stufenmitte gekennzeichnet) mit fallenden Trendverläufen, Cuxhaven, 1918-2008

Insgesamt ist für den Pegel Cuxhaven festzuhalten, dass durch die Auswertung langjährig vorliegender Aufzeichnungen des Wasserstands in wenigstens Stundenintervallen aussagekräftige Trendaussagen sowohl zu anteiligen Veränderungen von Verweildauern und Wasserstandshöhen innerhalb der mittleren Tide (Abb. 44) als auch bezogen auf die mittlere Verweildauer innerhalb eines Jahres (Abb. 48) gewinnen lassen.

Für die übrigen untersuchten Pegel wurden, wie eingangs des Kapitels erwähnt, ohne Trendbetrachtungen die jährlichen Verweildauern bestimmt und über den für alle Pegel gemeinsam verfügbaren Zeitabschnitt 2000 bis 2008 als Mittlere Verweildauern jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) dargestellt. Da verfügbare Stundenwerte für die beiden Pegel Norderney und Emden erst mit Beginn des Kalenderjahrs 2000

vorlagen, ist für diese beiden Pegel der Auswertzeitabschnitt der Winterhalbjahre um 1 Jahr verkürzt von 2001 bis 2008. Diese Auswertung zeigt dabei die Form der Verteilung der Verweildauern über unterschiedliche Höhenstufen für alle untersuchten Pegel und die Unterschiede zwischen Kalenderjahren und den Teilzeiträumen Sommer- und Winterhalbjahr. Auf den folgenden Seiten sind die entsprechenden Verweildauern von Abb. 53 bis Abb. 56 dargestellt (entsprechende Zahlenwerte sind tabellarisch in Anhang 2 des Abschlussberichtes aufgeführt).

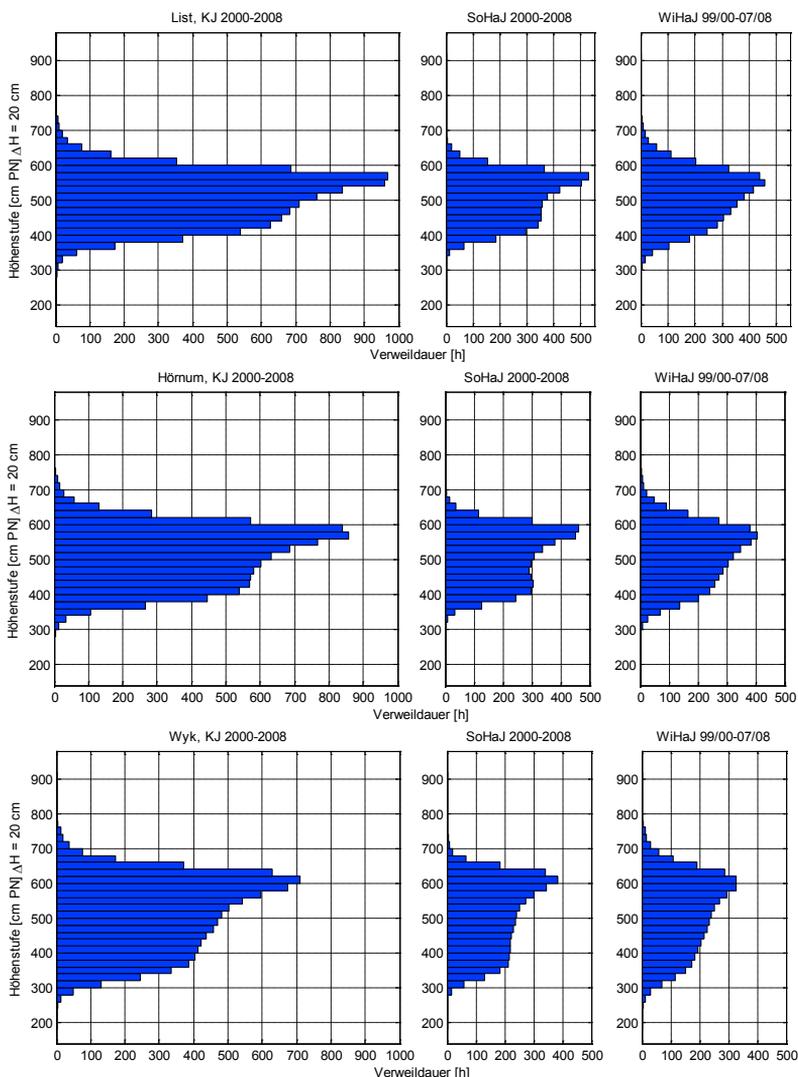


Abb. 53: Pegel List, Hörnum und Wyk. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnul)

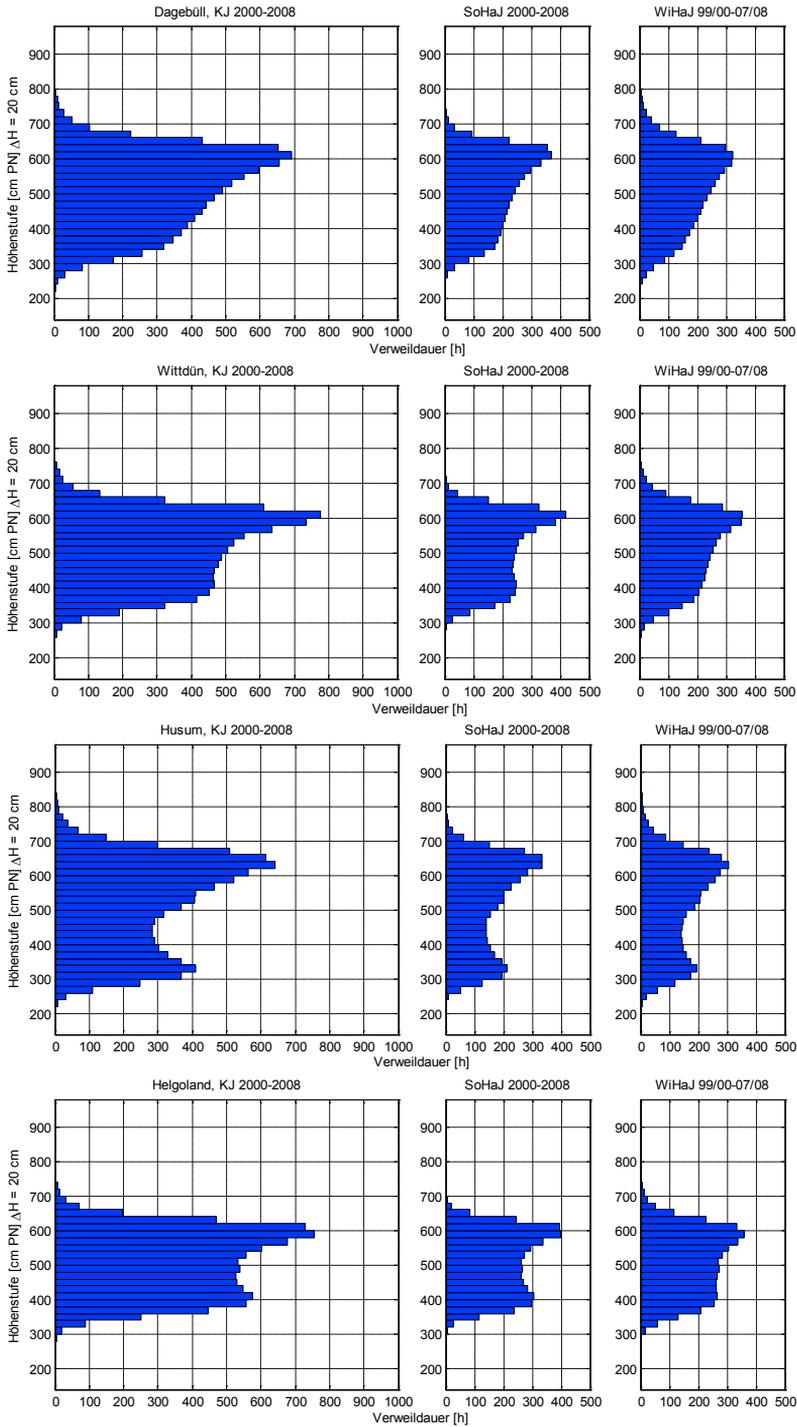


Abb. 54: Pegel Dagebüll, Wittdün, Husum und Helgoland. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnul)

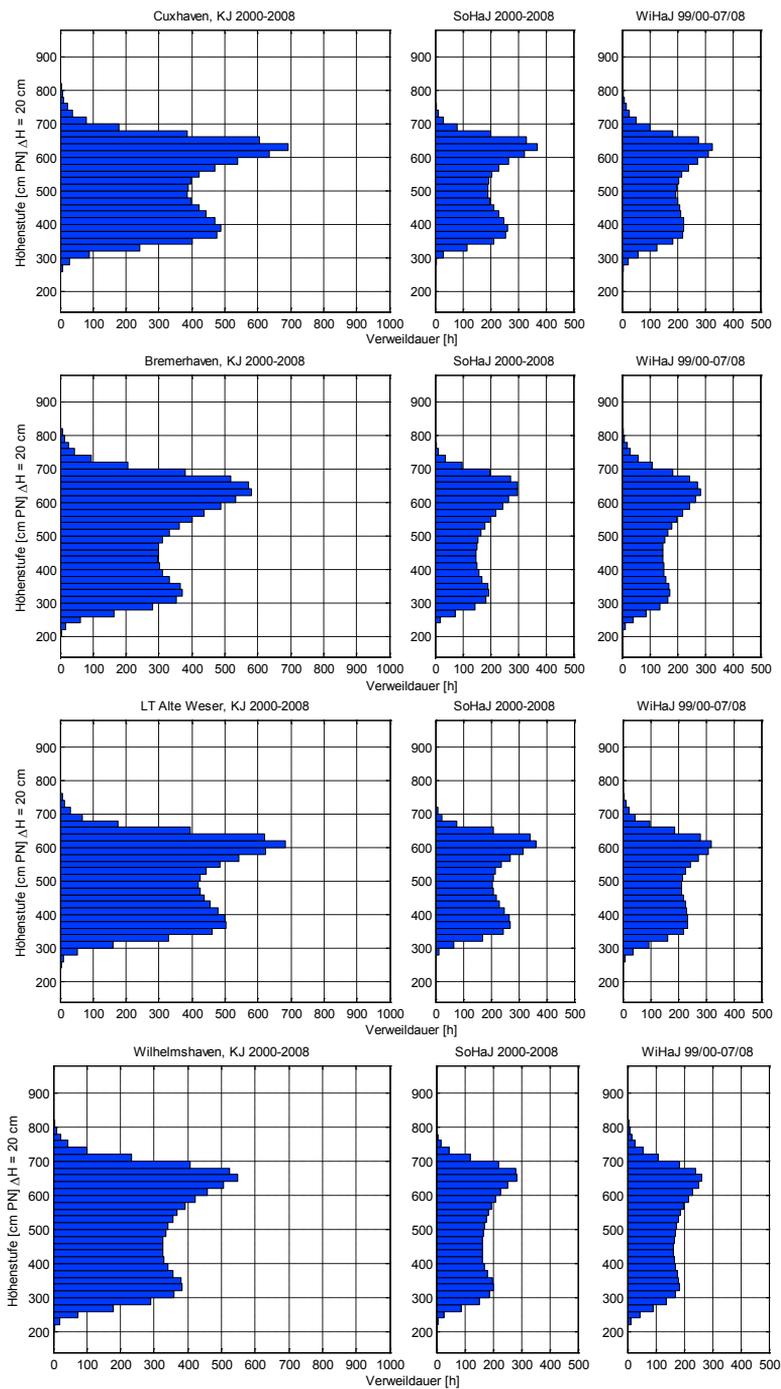


Abb. 55: Pegel Cuxhaven, Bremerhaven, LT Alte Weser und Wilhelmshaven. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnul)

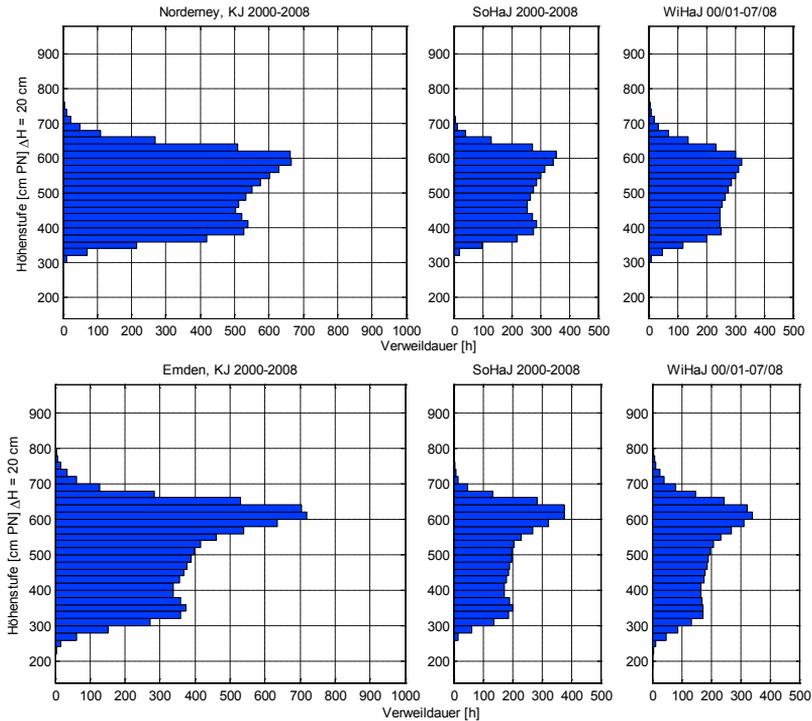


Abb. 56: Pegel Norderney und Emden. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnul)

In Abb. 57 sind die jährlichen Verweildauern (2008) der einzelnen Pegel entsprechend ihrer geographischen Verteilung um eine Übersichtskarte der Deutschen Bucht angeordnet. Hier wird deutlich, dass die Verteilung der Verweildauern der Wasserstände einem Nord-Süd Unterschied unterliegt. Während die Pegel der schleswig-holsteinischen Küste bis auf Husum eine unimodale Verteilung mit Schwerpunkt der Verweildauern nahe dem mittleren Tidehochwasser aufweisen, zeigen die niedersächsischen Pegel und Husum eine stark bimodal ausgeprägte Verteilung mit Maxima jeweils nahe dem mittlerem Tidehoch- und Tideniedrigwasser.

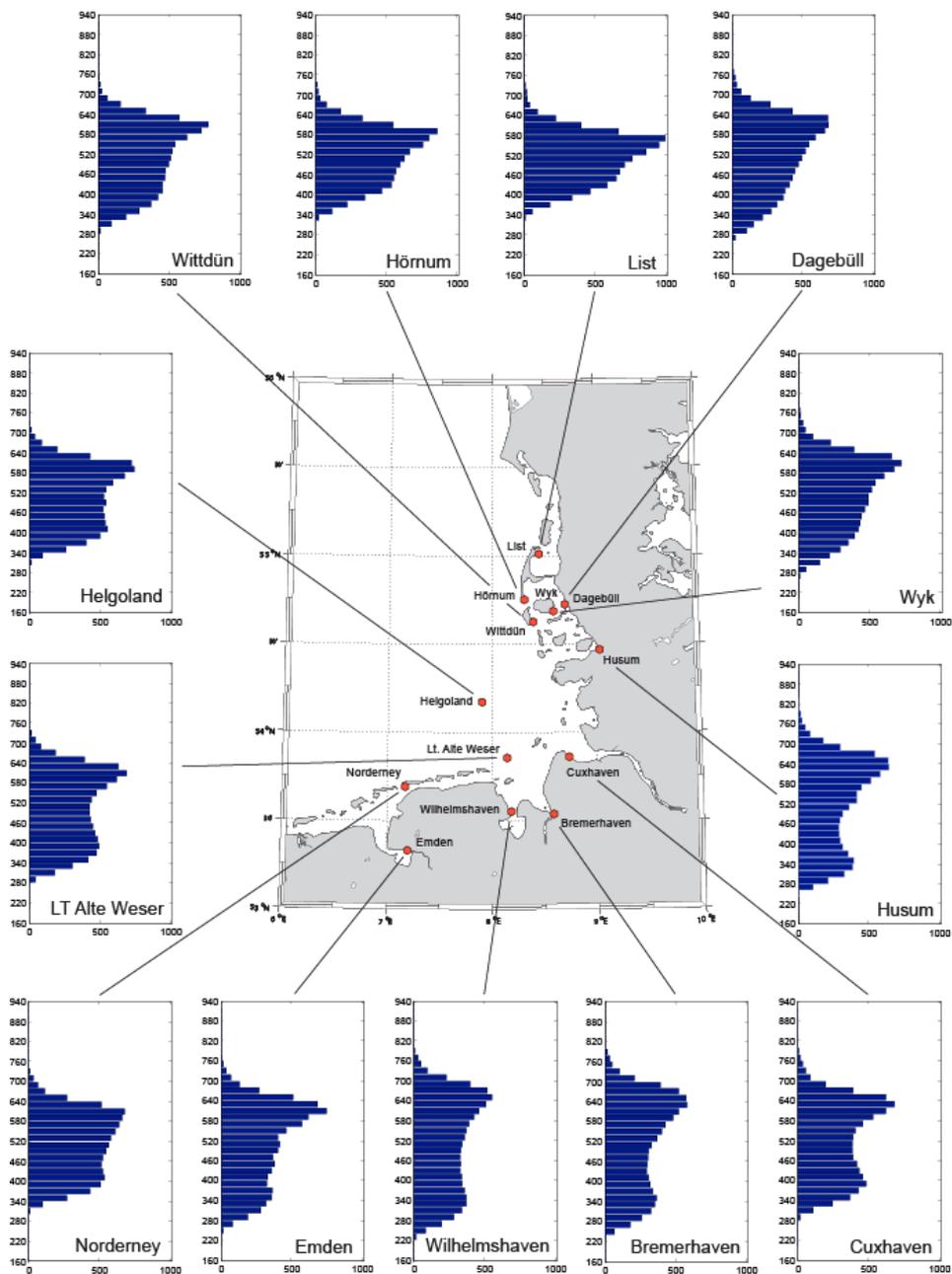


Abb. 57: Jährliche Verweildauern für die Untersuchungspegel (Kalenderjahr 2008)

6.2 Verweildauern von Sturmfluten am Pegel Hörn um und Cuxhaven

Wie in Kap. 6 erwähnt, konnte für die Auswertung von Verweildauern über die Zeiträume hinaus, für die durchgehende digitalisierte Wasserstandsaufzeichnungen vorliegen, auf durchgehend digitalisierte Ganglinien eines Sturmflutkollektivs von 311 Ereignissen für den Pegel Cuxhaven (Zeitabschnitt 1901 bis 2008) und 199 Ereignissen für den Pegel Hörnum (Zeitabschnitt 1936 bis 2008) aus dem Projekt XtremRisK (OUMERACI et al., 2009) zurückgegriffen werden. In der Folge können also auch die Ausprägungen der Sturmfluttätigkeit für diese beiden Pegel hinsichtlich des Parameters Verweildauer untersucht werden.

Für die Auswertung der Verweildauern von Sturmflutwasserständen in der Deutschen Bucht werden alle Sturmfluten seit 1901 für den Pegel Cuxhaven bzw. seit 1936 für den Pegel Hörnum ausgewertet. Die Ereignisse wurden anhand der allgemeinen Sturmflutdefinition des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ausgewählt und ausgewertet. Eine Sturmflut definiert sich nach den in Tab. 8 aufgeführten Grenzwerten über dem MThw eines Pegels. Die Grenzwerte zur Definition variieren also von Jahr zu Jahr und sind abhängig von den lokalen Verhältnissen an einem Pegelstandort. Dies beinhaltet, dass an einem Pegel ein Sturmflutereignis auftritt, welches an einem anderen Pegel nicht der Definition entspricht und somit nicht im Kollektiv auftritt. Für die Auswahl der Sturmfluten am Pegel Cuxhaven wurden alle Sturmflutereignisse untersucht, die einen Wasserstand größer 1,5 m über dem jeweiligen Jahres-MThw erreicht haben; für den Pegel Hörnum wurde gemäß dem Projekt XtremRisk (OUMERACI et al., 2009) ein entsprechender Äquivalenzwert über einen quantilsbasierten Ansatz von 1,4 m über dem jeweiligen Jahres-MThw herangezogen.

Tab. 8: Grenzwerte zur Definition einer Sturmflut

| Definition | Wasserstandsgrenzwert |
|------------------------|--------------------------|
| Sturmflut | 1,5 bis 2,5 m über MThw |
| schwere Sturmflut | 2,5 bis 3,5 m über MThw |
| sehr schwere Sturmflut | mehr als 3,5 m über MThw |

Aufgrund der größeren Datendichte ergeben sich somit 311 Sturmflutereignisse für den Pegel Cuxhaven zwischen 1901 und 2008, während am Pegel Hörnum lediglich 199 Ereignisse aus dem Zeitabschnitt zwischen 1936 und 2008 Berücksichtigung finden. Zur Entwicklung der Sturmflutverweildauern innerhalb dieser Zeitspanne werden die Verweildauern als Jahreswerte ausgewertet. Damit gehen also pro Jahr unterschiedlich viele Sturmflutereignisse mit in die Untersuchung ein, wodurch in einigen Jahren mehrere Sturmflutereignisse und in anderen Jahren gar keine Sturmflutereignisse zu verzeichnen sind. Die Sturmflutverweildauer eines einzelnen Jahres ist demnach definiert als die Anzahl der Überschreitungen eines definierten Grenzwasserstands pro Jahr. Für die Auswertung wird die Verweildauer in der Folge in Stunden analysiert.

Abb. 58 zeigt die Entwicklung der kumulierten jährlichen Sturmflutverweildauern für den Pegel Hörnum zwischen 1936 und 2007. Die Entwicklung der jährlichen Verweildauern ist sehr großen Schwankungen unterworfen. Trotz dieser erheblichen Schwankungen lässt sich eine kontinuierliche Zunahme der Sturmflutverweildauern von Beginn der Untersuchungen bis Anfang der 90er Jahre festhalten, welche sich sowohl in der linearen Regressionsgeraden (grün dargestellt) als auch in zentrisch aufgetragenen 19-jährigen gleitenden Mittel manifestiert. In den beiden darauffolgenden Jahr-

zehnten ist dann eine eher gegenläufige Entwicklung zu beobachten, die zu einer leichten Abnahme der Sturmflutverweildauern führt. Dieser Verlauf stimmt mit den Erkenntnissen von HOFSTEDÉ (2009) überein, der die Verweildauern für die Pegel List und Husum untersuchte. Die Untersuchungen beinhalten dabei jedoch nicht die Entwicklung des säkularen Meeresspiegelanstiegs, der in dieser Arbeit in der Auswahl der Sturmfluten Berücksichtigung findet und zu leicht verringerten Tendenzen innerhalb der Stichprobe führt.

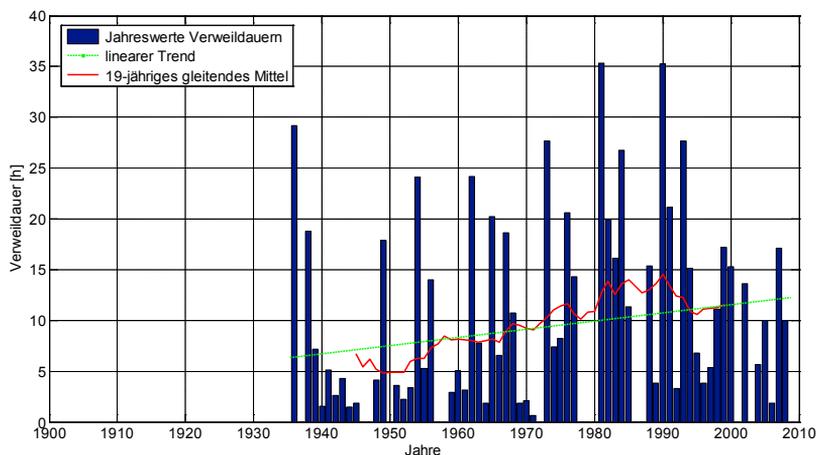


Abb. 58: Entwicklung der kumulierten jährlichen Verweildauern für Sturmflut-Wasserstände am Pegel Hörnum 1936-2008. Grenzwert zur Definition einer Sturmflut zeitabhängig nachgeführt

Da bei dieser Betrachtung Einzelereignisse zu Jährlichkeiten aufsummiert werden, muss die begriffliche Verknüpfung der Verweildauer mit der Intensität differenziert betrachtet werden. Kommt es in einer jährlichen Periode zu mehreren kleinen Sturmflutereignissen, summiert sich die jährliche Verweildauer zu ähnlich hohen Werten auf, wie es bei es nur ein oder zwei sehr extremen Sturmfluten gegeben ist. Daher ist der Begriff der Sturmflutintensität in diesem Fall nur im Zusammenhang mit der zeitlichen Überschreitung eines definierten Sturmflutgrenzwertes zu sehen. Die Grafiken geben dagegen keinerlei Informationen darüber, ob die Sturmfluten auch höher aufgelaufen sind als in den Jahren zuvor. Da mit der Intensität einer Sturmflut häufig vordergründig die Höhe einer Sturmflut assoziiert wird, muss auch für die Einzelereignisse eine getrennte Betrachtung durchgeführt werden.

In Abb. 59 sind daher alle Einzelereignisse in ihrer zeitlichen Reihenfolge mit den tatsächlichen Sturmflutverweildauern dargestellt. Während es in der Periode zwischen 1936 und 1991 zu insgesamt zu 8 Ereignissen gekommen ist, bei denen die Wasserstände einen Sturmflutgrenzwert um mehr als 10 Stunden überschritten haben, verzeichnet die Periode zwischen 1992 und 2007 kein einziges Ereignis dieser Größenordnung. Sturmflutereignisse mit geringerer Verweildauer treten dagegen häufiger auf als zuvor. Wird eine lineare Regressionsgerade durch das Streudiagramm gelegt, zeichnet sich eine insgesamt eher rückläufige Entwicklung bezüglich der Länge der Sturmflutverweildauern ab. Eine Approximation der Verweildauern durch ein Polynom 4. Grades zeigt eine periodische Entwicklung. Aus der Abbildung lässt sich also schlussfolgern, dass die Sturmfluten im letzten Drittel des Untersuchungszeitabschnitts zwar gehäuft auftreten, die Verweildauer einzelner Sturmflu-

ten hierbei aber nicht an die Werte des bisherigen Beobachtungszeitabschnitts, insbesondere zwischen Mitte der 70er bis Mitte der 90er Jahre, heranreicht.

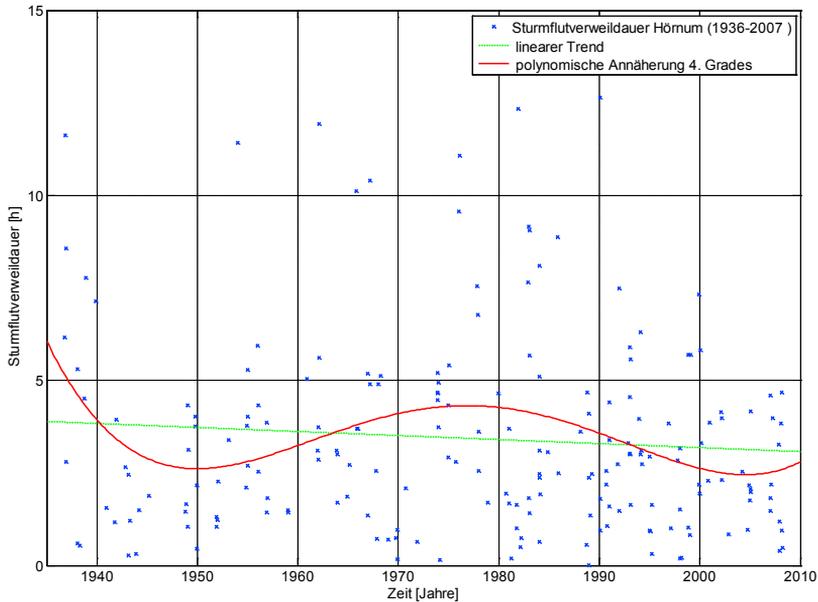


Abb. 59: Entwicklung der Sturmflutverweildauern für Einzelereignisse am Pegel Hörnum

Eine ähnliche Entwicklung bezüglich der jährlichen Verweildauern kann auch am Pegel Cuxhaven in Abb. 60 für diesen Zeitabschnitt beobachtet werden. Allerdings steht hier ein etwas größeres Datenkollektiv zur Verfügung. Die Mehrinformation, die sich aus dem größeren Datenkollektiv gewinnen lässt, relativiert die Erkenntnisse vom Pegel Hörnum ein wenig, da die Verweildauern vor 1936 auf einem etwas höheren Niveau liegen, als in den Jahren zuvor. Dadurch fällt der lineare Trend für die Periode 1901 bis 2008 etwas geringer aus, als für den Zeitabschnitt 1936 bis 2008 am Pegel Hörnum. Betrachtet man die Ergebnisse der Untersuchungen von HOFSTEDÉ (2009) für den Pegel Husum, welche eine Periode von 1868-2006 umfassen, lässt sich feststellen, dass auch hier ähnliche Entwicklungen in den Daten beobachtet wurden. In diesem Datensatz lässt sich weiterhin eine zyklische Entwicklung erkennen, die die etwas höheren Werte zu Beginn des 20. Jahrhunderts erklären. Sie deutet die Entwicklung von weniger intensiven Sturmfluten Ende des 19. Jahrhunderts zu intensiveren Sturmfluten Anfang des 20. Jahrhunderts mit einer Abschwächung in der Mitte und einem Wiederanstieg Ende des 20. Jahrhunderts relativ gut an. Wie für den Pegel Hörnum, sind in Abb. 61 auch für den Pegel Cuxhaven alle Einzelereignisse in ihrer zeitlichen Reihenfolge mit den tatsächlichen Sturmflutverweildauern dargestellt.

Um Tendenzen im Zusammenhang mit der Entwicklung der MSL abschätzen zu können werden für die Trenduntersuchungen die selben Zeiträume gewählt wie in den Untersuchungen zum MSL. Die Zeiträume umfassen die Perioden zwischen 1901-2008, 1937-2008, 1951-2008 und 1970-2008 (siehe Tab. 9). Im Gegensatz zum MSL, bei dem ein verstärkter Anstieg im Zeitabschnitt zwischen 1971 und 2008 zu verzeichnen ist, deutet sich für den gleichen Zeitabschnitt eine Beruhigungsphase hinsichtlich der Sturmflutintensität an.

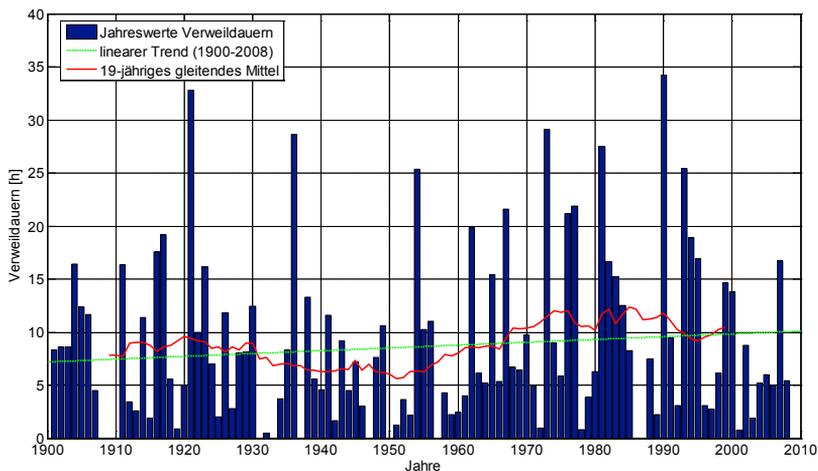


Abb. 60: Entwicklung der kumulierten jährlichen Verweildauern für Sturmflut-Wasserstände am Pegel Cuxhaven 1901-2008. Grenzwert zur Definition einer Sturmflut zeitabhängig nachgeführt

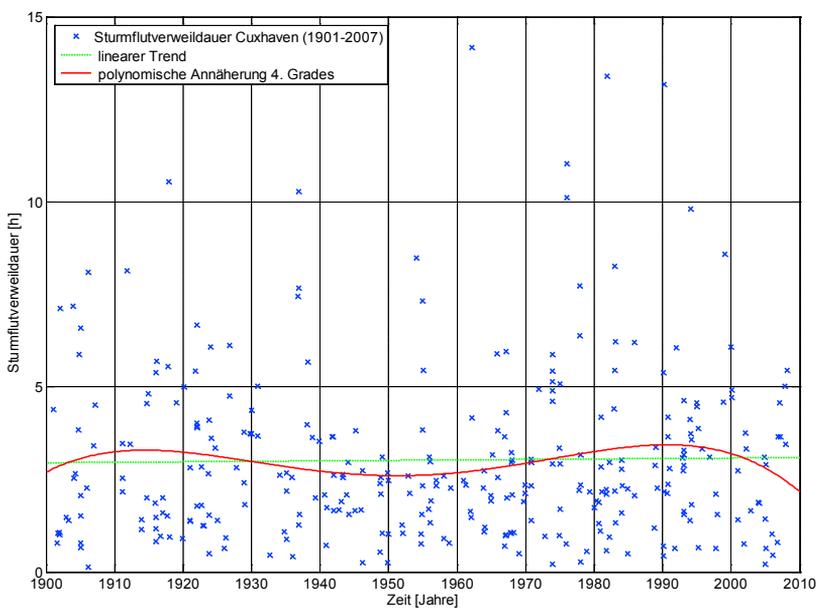


Abb. 61: Entwicklung der Sturmflutverweildauern für Einzelereignisse am Pegel Cuxhaven

Tab. 9: Lineare Trends der jährlichen Sturmflutverweildauer für unterschiedliche Zeiträume

| Pegel | Lineare Trends [min/Jahr] für unterschiedliche Zeiträume (incl. Standardfehler) | | | |
|----------|---|-------------|-------------|---------------|
| | 1901-2008 | 1937-2008 | 1951-2008 | 1971-2008 |
| Hörnum | - | 6,34 ± 0,21 | 4,08 ± 9,03 | -1,20 ± 20,25 |
| Cuxhaven | 1,36 ± 2,89 | 3,77 ± 5,33 | 1,44 ± 7,97 | -6,99 ± 29,32 |

7. Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Ziel des Forschungsvorhabens AMSeL war es, die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht über einen möglichst langen Zeitabschnitt auf Basis hochaufgelöster Pegel­daten zu analysieren und gleichzeitig Untersuchungen zu Verweildauern und Tideketten durchzuführen. Einer der Arbeitsschwerpunkte bestand in der Datenrecherche und Aufbereitung qualitativ hochwertiger Zeitreihen. Dabei konnten Qualitätsunterschiede zwischen den historischen (vor 1936) und neueren Datensätzen (ab 1936) festgestellt werden. Bei der Generierung langer Zeitreihen des relativen Mean Sea Levels (RMSL) wurden sowohl hochaufgelöste Daten, als auch Scheitelwerte in Kombination mit dem k-Wert Verfahren genutzt. Dabei kamen verschiedene Stationaritätstests zur Anwendung, wodurch eine hohe Qualität der generierten RMSL-Zeit­reihen gewährleistet ist. Aus den Analysen dieser Zeitreihen hat sich ergeben, dass ein langfristiger Meeresspiegelanstieg zu verzeichnen ist. Über die letzten Jahrzehnte hinweg konnte eine Beschleunigung im Anstieg identifiziert werden, welche jedoch unter Berücksichtigung aller verfügbaren Daten nach heutigem Kenntnisstand nicht als außergewöhnlich in den letzten 170 Jahren bezeichnet werden kann. Eine signifikante zusätzliche Beschleunigung im RMSL-Anstieg im Bereich der Deutschen Bucht, welche als anthropogen verursacht bezeichnet oder dem Klimawandel zugeschrieben werden kann, ist demnach nicht eindeutig nachweisbar. Die aktuell hohen Anstiegsraten verdeutlichen gleichzeitig die Notwendigkeit der regelmäßigen Aktualisierung der hier vorgestellten Ergebnisse. Dies wird auf Basis der erarbeiteten Methoden und den entstandenen Softwarelösungen zukünftig mit weniger Aufwand verbunden sein, als es in der hier zugrunde liegenden Bearbeitung der Fall war. Aus dem Vergleich der ermittelten Anstiegsraten für die Bereiche Schleswig-Holstein und Niedersachsen haben sich höhere relative Anstiegsraten für den Bereich Schleswig-Holstein ergeben, welche zum Teil auf stärkere vertikale Landbewegungen (in diesem Fall Landsenkung) zurückzuführen sind. Ein einfacher Ansatz zur Ermittlung der vorherrschenden Vertikalbewegungen an den hier berücksichtigten Pegelstandorten auf Basis der RMSL-Zeit­reihen wurde vorgestellt und führte insgesamt zu plausiblen Ergebnissen. Aus dem Vergleich der MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht mit einer globalen und einer Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion konnten zunächst neue Erkenntnisse bezüglich der Entwicklung des MSL in der Vergangenheit erzielt werden. Gleichzeitig konnten wichtige Erkenntnisse für den Umgang mit möglichen zukünftigen Meeresspiegelentwicklungen im Rahmen der regionalen Küstenschutzplanung gezogen werden. Bei den Vergleichsbetrachtungen konnten deutliche Unterschiede in der MSL-Entwicklung über die letzten ca. 150 Jahre in der Deutschen Bucht und im globalen Mittel festgestellt werden. Beim Vergleich der MSL-Rekonstruktionen für die Deutsche Bucht und den Nord-Ost-Atlantik konnte über größere Zeitabschnitte des betrachteten Zeitabschnittes ein ähnliches Verhalten nachgewiesen werden. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte die Empfehlung abgeleitet werden, für aktuelle Küstenschutzfragen auf die verfügbaren regionalisierten Meeresspiegelszenarien zurückzugreifen, wie sie beispielsweise von KATSMAN et al. (2008 und 2011) und LOWE et al. (2009) abgeleitet wurden. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit aufgezeigt und diskutiert, die nun verfügbare lange MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht direkt zur Ableitung von Szenarien über wenige Dekaden hinweg zu nutzen.

Aus den Analysen zu Verweildauern und Tideketten geht hervor, dass für die jeweils abzuleitenden Parameter positive Trends zu verzeichnen sind. Für die durch unterschiedlich lange T_{nw}-Ketten erreichten Wasserstände liegen die Trends in der Mehrzahl über den Trends des jeweiligen MT_{nw}

und oft auch über dem Trend des jeweiligen MSL. Auch für die Thw-Ketten liegen die Trends meist über dem Trend des MThw, was in diesem Fall gleichbedeutend mit einer Überschreitung der Anstiegsrate des MSL ist.

Bezüglich der Häufigkeit solcher Kettenereignisse erscheint eine signifikante Trendbestimmung aufgrund der geringen Anzahl entsprechender extremer Ereignisse sowie der Beeinflussbarkeit des Trends durch unterschiedlich entlang der Zeitachse angeordnete Einzelereignisse schwierig. Generell wird jedoch die Schlussfolgerung gestützt, dass eine Berücksichtigung des Jahres-MSL (zeitabhängig) sinnvoll und trendreduzierend ist, aber dass dennoch ein gehäuftes Auftreten von Ereignissen, sowohl von Tnw- als auch Thw-Ketten, in den Jahren zwischen Mitte der 70er bis Mitte/Ende der 90er zu beobachten ist. Die Bestimmung des MSL als Referenz für das Auftreten und den Trendverlauf von Kettenereignissen ist damit eine wichtige, jedoch allein nicht hinreichende Größe.

Auch bei den Verweildauern, die langjährig nur für den Pegel Cuxhaven analysiert werden konnten, ist festzuhalten, dass durch die Auswertung langjährig vorliegender Aufzeichnungen des Wasserstands in mindestens Stundenintervallen aussagekräftige Trendaussagen sowohl zu anteiligen Veränderungen von Verweildauern und Wasserstandshöhen innerhalb der mittleren Tide als auch bezogen auf die mittlere Verweildauer innerhalb eines Jahres gewinnen lassen.

Während im Rahmen des dreijährigen Forschungsvorhabens viele interessante und für die Praxis relevante Fragestellungen bearbeitet und teilweise abschließend beantwortet werden konnten, so haben sich während der Bearbeitung auch viele weitere Fragen ergeben. Im Nachfolgenden soll der aus Sicht der Autoren bestehende Forschungsbedarf zu den hier behandelten Themen dargestellt werden. Hierdurch sind weitere unverzichtbare Erkenntnisse zur Verbesserung des Verständnisses des komplexen Systems Ozean und dessen dynamischen Verhaltens zu erwarten.

Beginnend bei den Wasserstandsdaten, welche die Grundlage für die hier vorgestellten Ergebnisse liefern, hat sich bei verschiedenen Arbeitsschritten die Notwendigkeit weiterer Digitalisierungskampagnen von Pegeldaten für ein besseres Verständnis der stattgefundenen Änderungen und der Reduzierung der Unsicherheiten gezeigt. Neben längeren Zeitreihen mit hochaufgelösten Daten sind auch die historischen Daten unverzichtbar, um belastbarere Aussagen ableiten zu können. Trotz der bekannten Unsicherheiten bei diesen Daten aus dem 19. und von Anfang des 20. Jahrhunderts, können sie einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Gesamtunsicherheit leisten. Je mehr lange Zeitreihen verfügbar sind, desto eher sind statistische Verfahren, wie sie beispielsweise in DANGENDORF (2010) beschrieben sind, für die Homogenisierung der Zeitreihen anwendbar.

Bei der Generierung der RMSL-Zeitreihen für die gewählten Untersuchungspegel konnte zwar einerseits der Nutzen des k-Wert Verfahrens (besonders in Kombination mit Stationaritätstests) nachgewiesen werden. Andererseits konnte festgestellt werden, dass auch durch Berücksichtigung dieses Ansatzes nicht dieselbe Qualität bei den RMSL-Zeitreihen erzielt werden kann, wie es auf Basis hochaufgelöster Daten der Fall ist. Hier gilt es weitere Optimierungsansätze zu prüfen.

Beim Vergleich mit der MSL-Rekonstruktion für den Nord-Ost-Atlantik konnte zwar eine gute Übereinstimmung mit der MSL-Rekonstruktion für die deutsche Nordseeküste festgestellt werden, dennoch ergeben sich auch hier, besonders in Bezug auf die ermittelten Anstiegsraten, gewisse Unterschiede. Eine Ausdehnung des hier berücksichtigten Untersuchungsgebietes auf die gesamte Nordsee lässt wichtige Hinweise darüber zu, ob zumindest innerhalb dieses Gebietes ein vergleichbares Verhalten in der MSL-Entwicklung in der Vergangenheit zu beobachten war. Die Beantwortung dieser Frage spielt eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, den Begriff „regional“ genauer zu definie-

ren, wenn über „regionale“ Meerspiegelszenarien diskutiert wird. Stellt sich bei einer solchen großräumigeren Untersuchung heraus, dass auch innerhalb des Nordseebeckens signifikant unterschiedliche Entwicklungen stattgefunden haben, muss über noch kleinräumigere Betrachtungen für die Ableitung von Szenarien nachgedacht werden.

Neben den Pegeldaten können bei zukünftigen Studien auch Satellitendaten berücksichtigt werden, die heute eine Länge > 15 Jahre aufweisen und damit länger zurückreichen als viele der verfügbaren hochaufgelösten Pegelzeitreihen. Hierdurch lassen sich Rückschlüsse über die langfristige Entwicklung des MSL im Küstenbereich im Vergleich zum offenen Ozean ziehen (siehe z.B. WHITE et al. 2005). Gleichzeitig können weitere Parameter (wie z.B. atmosphärischer Luftdruck) oder abgeleitete Indizes wie die Nordatlantische Oszillation in die Untersuchungen einfließen und zu einem besseren Verständnis der stattfindenden Prozesse beitragen.

Aus Sicht des deutschen Küstenschutzes ist eine Ausdehnung der Untersuchungen auf den Bereich der Ostsee ein unverzichtbarer nächster Schritt, um auch hier wichtige Erkenntnisse zunächst für die stattgefundenen, aber auch für die zukünftige Entwicklung des MSL abzuleiten.

Obwohl die hier vorgestellten Analysen und Ergebnisse alle auf Jahreswerten basieren, sind im Rahmen der Projektbearbeitung zusätzlich RMSL-Monatswerte für alle Untersuchungspegel generiert worden. Diese können die Grundlage für detaillierte Analysen der interannuellen Variabilität und deren Entwicklung bilden, wobei gleichzeitig weitere periodische Anteile, die hier nur ansatzweise berücksichtigt wurden, näher betrachtet und untersucht werden können.

Es wurde mehrfach auf die Notwendigkeit der Entwicklung regionaler MSL-Szenarien auf Basis von Modellstudien hingewiesen, welche bei der Planung regionaler Küstenschutzstrategien genutzt werden können. Um die Ergebnisse solcher Studien mit Hilfe von Beobachtungsdaten validieren zu können, sind lange und qualitativ hochwertige Beobachtungszeitreihen des MSL erforderlich, die um den Effekt der vertikalen Landbewegungen korrigiert sind. Während hier ein einfacher Ansatz für eine erste Abschätzung der Trends der Landbewegungen genutzt wurde, sind in Zukunft die Ergebnisse aus CGPS-Messungen (Continuous Global Positioning System) für diesen Zweck heranzuziehen. Bei der Ableitung von Szenarien über wenige Dekaden hinweg kann auf Basis der hier erzielten Ergebnisse empfohlen werden, auch direkt auf lange und qualitativ hochwertige MSL-Rekonstruktionen zurückzugreifen und Extrapolationsverfahren anzuwenden. Geeignete Methoden, die u.a. eine Abschätzung der Unsicherheiten zulassen sind zu entwickeln.

Unter dem Gesichtspunkt des Überflutungsrisikos sind vergleichende Untersuchungen zur Entwicklung der Extremwasserstände und des RMSL im Bereich der Deutschen Nordseeküste zu empfehlen. Diese lassen Erkenntnisse darüber erwarten, ob die beobachteten Trends in den Extremwasserständen (z.B. JENSEN, 1985; MUDERSBACH, 2010) sich einzig durch Änderungen im RMSL erklären lassen, oder ob ggf. andere Faktoren eine Rolle spielen, die in diesem Fall zu identifizieren sind (MUDERSBACH et al., zur Veröffentlichung eingereicht).

Ein starker Hinweis in diese Richtung wird auch durch die o.g. Ergebnisse zum Trendanstieg der durch unterschiedlich lange T_{nw} bzw. T_{hw}-Ketten erreichten Wasserstände gegeben, welche in der Mehrzahl über den Trends des jeweiligen MT_{nw}/MT_{hw} und oft auch über dem Trend des jeweiligen MSL liegen. Hier sollte eine tiefer gehendere stochastische Betrachtung von Eintrittsraten und möglichen Periodizitäten entsprechender Kettenereignisse im Vergleich sowohl mit dem RMSL als auch unterschiedlichen Quantilen des Tidewasserstands erfolgen.

Wird der Gesichtspunkt des Überflutungsrisikos nicht nur auf die Belastung „extremer Tidewasserstand“, sondern auch auf „hoher Binnenwasserstand“ bzw. „behinderte Binnenentwässerung“ ausgedehnt, so geben die hier vorgelegten Auswertungen Hinweise auf den Belastungsbeitrag von der Seeseite in Form ansteigender MSL bzw. Tideketten und Verweildauern. Ein vollständiges Bild der Belastungssituation lässt sich jedoch nur aus der Verknüpfung von Tide- und binnenseitiger Belastung zeichnen. Eine Erweiterung der in FRANK (2007) durchgeführten Untersuchungen zu bivariaten Auftretenswahrscheinlichkeiten von Binnenhochwasserereignissen und Thw-Folgen, sowohl in Bezug auf anzuwendende Methodiken und heranzuziehende Parameter, als auch auf den Untersuchungsraum Deutsche Bucht, ist daher zu empfehlen.

Tideketten können im Grunde als Realisierungen unterschiedlicher Windstau- bzw. Sturmflut-Ereignisse in Bezug auf die astronomische Gezeit aufgefasst werden. Hier sollte geprüft werden, inwieweit auch für die Deutsche Bucht durch eine dedizierte Analyse dieser stochastischen und deterministischen Anteile eine nochmals verbesserte Sicht und eine Quantifizierung von extremen einzelnen und in Folge auftretenden Tidescheitelwasserständen erlangt werden kann. Beispiele für Modell- und Ensemblegestützte Untersuchungen für Großbritannien bzw. die gesamte Nordsee geben u.a. LOWE et al. (2001) und WOTH, WEISSE und VON STORCH (2005).

8. D a n k s a g u n g

Das Forschungsvorhaben AMSeL wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) gefördert (Fördernummer: 03KIS068). Das Vorhaben wurde fachlich vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet. Im Rahmen der regelmäßigen Treffen mit der projektbegleitenden Gruppe wurden wichtige Hinweise für die Erarbeitung der hier dargestellten Ergebnisse aus den Reihen der Teilnehmer gegeben. Mitglieder der projektbegleitenden Gruppe waren:

Christoph Blasi, Stefanie Dibbern, Dr. Gabriele Gönnert, Marko Kastens, Dr. Sylvin Müller-Navarra, Dietrich Rupert, Dr. Astrid Sudau, Frank Thorenz (Obmann), als Gast: Detlef Schaller.

Wir bedanken uns außerdem bei den Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes und der Länder für die Bereitstellung der benötigten Daten und die Unterstützung bei Rückfragen jeglicher Art zu den verwendeten Datensätzen.

9. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- ALBRECHT, F.; WAHL, T.; JENSEN J. and WEISSE, R.: Regional mean sea level changes in the German Bight in the 20th century, *Ocean dynamics* (in press), 2011.
- AUGATH, W.: Stand und Weiterentwicklung der Höhenüberwachung der niedersächsischen Nordseeküste. *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, 43, 78-92, 1993.
- BARNETT, T. P.: The estimation of global sea level change: a problem of uniqueness. *J. Geophys. Res.*, 89, C5, 7980–7988, 1984.
- BEHRE, K.-E.: Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*. 28, 9-63, 2003.

- BLASI, C.: Anwendung des Gaußschen Tiefpassfilters auf mittlere Tidehochwasserstände zur Evaluierung der Wasserstandsentwicklung an vier ausgewählten Pegeln der deutschen Nordseeküste. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 35, 22-28, 1991.
- BOX, G. E. P. and JENKINS, G. M.: Time Series Analysis- forecasting and control. Holden-Day, London, 1976.
- BUNGENSTOCK, F. and SCHÄFER, A.: The Holocene relative sea-level curve for the tidal basin of the barrier island Langeoog, German Bight, Southern North Sea. Global and Planetary Change, 66(1-2), 34-51, 2009.
- CAZENAIVE, A.; DOMINH, K.; GUINEHUT, S.; BERTHIER, E.; LLOVEL, W.; RAMILLIEN, G.; ABLAIN, M. and LARNICOL, G.: Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. Global and Planetary Change, 65, 83–88, 2008.
- CHURCH, J. A.; GREGORY, J. M.; HUYBRECHTS, P.; KUHN, M.; LAMBECK, K.; NHUAN, M. T.; QIN, D. and WOODWORTH, P. L.: 'Changes in Sea Level', In: Climate Change 2001, The Scientific Basis, eds. Houghton and Ding, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001.
- CHURCH, J.A.; WHITE, N.J.; COLEMAN, R.; LAMBECK, K. and MITROVICA, J.X.: Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period. In: Journal of Climate, 17, 2609-2625, 2004.
- CHURCH, J. A. and WHITE, N. J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise. Geophys. Res. Lett., 33, L01602. doi:10.1029/2005GL024826, 2006.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; AARUP, T.; WILSON, S. W.; WOODWORTH, P. L.; DOMINGUES, C. M.; HUNTER, J. R. and LAMBECK, K.: Understanding global sea levels: past, present and future. Sustain Sci 3(1), 9–22. doi: 10.1007/s11625-008-0042-4, 2008.
- DANGENDORF, S.: Anwendung analytischer Verfahren zur Detektion von Instationaritäten in Wasserstandszeitreihen am Beispiel der Deutschen Bucht, Diplomarbeit, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen (unveröffentlicht), 2010.
- DOMINGUES, C.M.; CHURCH, J.A.; WHITE, N.J.; GLECKLER, P.J.; WIJFFELS, S.E.; BARKER, P.M. and DUNN, J.R.: Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. Nature 453, 1090-1093. doi:10.1038/nature07080, 2008.
- DREBES, H.: Untersuchungen über die Bemessungsgrundlagen tideabhängiger Entwässerungssysteme. Mitteilungen aus dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie u. landwirtschaftlichen Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Bd. 22, 123-249, Hannover, 1971.
- FRANK, T.: Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 34, Dissertation, Dresden, 2007.
- FÜHRBÖTER, A. und JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, 42, 78-100, 1985 .
- FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergien. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, Heft 65, 1979.
- FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstieges an der deutschen Nordseeküste. Wasser und Boden, Heft 9, 1986.
- GHIL, M.; ALLEN, M.R.; DETTINGER, M. D.; IDE, K.; KONDRASHOV, D.; MANN, M. E.; ROBERTSON, A. W.; SAUNDERS, A.; TIAN, Y.; VARADI, F. and YIOU, P.: Advanced spectral methods for climatic time series. Rev. Geophys., 40(1), 1003, doi:10.1029/2000RG000092, 2002.
- GOLYANDINA, N.; NEKRUTKIN, K. and ZHIGLEÏĀVSKLĀI, A. A.: Analysis of time series structure. SSA and related techniques. Chapman & Hall/CRC (Monographs on statistics and applied probability, 90), Boca Raton, Florida, 2001.
- GÖNNERT, G.; ISERT, K.; GIESE, H. und PLÜß, A.: Charakterisierung der Tidekurve. Die Küste, 68, 2004.

- GÖNNERT, G.; JENSEN, J.; VON STORCH, H.; THUMM, S.; WAHL, T. und WEISSE, R.: Der Meeresspiegelanstieg - Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. *Die Küste*, 76, 2009.
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C. and JEVREJEVA, S.: Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. In: *Climate Dynamics*, Jg. 34, 461–472. doi: 10.1007/s00382-008-0507-2., 2009.
- HAIGH I. D.; NICHOLLS, R. J. and WELLS, N. C.: Mean sea-level trends around the English Channel over the 20th century and their wider context. *Continental Shelf Research* 29, 2083-2098, 2009.
- HOFSTEDE, J.: Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten: Rückblick und Ausblick. In: Schüttrumpf, Holger (Hg.): 39. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2009. *Wasserrwirtschaft und Klimawandel - Fakten, Folgen, Aufgaben*, 2009.
- HOLGATE, S. J. and WOODWORTH, P. L.: Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s, *Geophysical Research Letters*, 31, L07305, 2004.
- HOLGATE, S. J.: On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01602, doi:10.1029/2006GL028492, 2007.
- HUNTER, J. R.: Estimating Sea-Level Extremes Under Conditions of Uncertain Sea-Level Rise. *Climatic Change*, 99, 331-350, 2010.
- IKÜS: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik, Abschlussbericht, http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/forschung/ikues, 2008.
- IOC: Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume 3 - Reappraisals and recommendations as of the year 2000. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides No. 14. IOC, Paris, 2002.
- JANSEN, E.; OVERPECK, J.; BRIFFA, K. R.; DUPLESSY, J.-C.; JOOS, F.; MASSON-DELMOTTE, V.; OLAGO, D.; OTTO-BLIESNER, B.; PELTIER, W. R.; RAHMSTORF, S.; RAMESH, R.; RAYNAUD, D.; RIND, D.; SOLOMINA, O.; VILLALBA, R. and ZHANG, D.: Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste, *Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig*, vol. 83, 441-550, 1984.
- JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. *Dissertation*, TU Braunschweig, 1985.
- JENSEN, J.; MÜGGE, H. E. und VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 47, 1988.
- JENSEN, J.; MÜGGE, H. E. und SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Buch. *Die Küste*, 53, 1992.
- JENSEN, J.; HOFTEDE, J.; KUNZ, H.; DE RONDE, J.; HEINEN, P. and SIEFERT, W.: Long Term Water Level Observations and Variations. *Coastal Zone '93, Special Volume "Coastlines of the Southern North Sea"*, 1993.
- JENSEN, J. und SPIEB, V.: Untersuchungen zur Häufigkeit von Tnw-Sprüngen und Tnw-Ketten-Erhöhungen an der Westküste Schleswig-Holsteins, Bericht, *Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)*, Universität Siegen (unveröffentlicht), 1996.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H. und Wardenga, U.

- (Hrsg.), Berichte zur Deutschen Landeskunde, Themenheft: Küstensenarien, Band 81, Heft 2, 99-112, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig, 2007.
- JEVREJEVA, S.; GRINSTED, A.; MOORE, J. C. and HOLT, S.: Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *J. Geophys. Res.*, 111, C09012. doi:10.1029/2005JC003229, 2006.
- JEVREJEVA, S.; MOORE, J. C.; GRINSTED, A. and WOODWORTH, P. L.: Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08715, doi:10.1029/2008GL033611, 2008.
- JEVREJEVA, S.; MOORE, J. C. and GRINSTED, A.: How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100. In: *Geophysical Research Letters*, Jg. 37, L07703. doi:10.1029/2010GL042947, 2010.
- KATSMAN, C. A.; HAZELEGER, W.; DRIJFHOUT, S. S.; VAN OLDENBORGH, G. J. and BURGERS, G. J. H.: Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. *Climatic Change*, 2008.
- KATSMAN, C. A.; STERL, A.; BEERSMA, J. J.; VAN DEN BRINK, H. W.; HAZELEGER, W. and 15 co-authors: Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example. *Climatic Change* (in press), 2011.
- KRAMER, J.: Neue Siele und Schöpfwerke in Ostfriesland. *Die Küste*, 18, 47-74, 1969.
- LASSEN, H.; LINKE, G. and BRAASCH, G.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste. *Zeitschr. f. Vermessungsw. und Raumordng.*, H. 2, 1984.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, 50, 65-96, 1989.
- LENTZ, H.: Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel. Otto Meissner, Hamburg, 1879.
- LAWA und BMV (Hg.): Pegelvorschrift. Berlin und Bonn, 26, 27, 28, 31, 1997.
- LAWA: Weitergehende Auswertung von Tidekurven und deren Standardisierung. 1. Aufl. Kulturbuchverlag, Berlin, 18, 2001.
- LOWE, J. A.; HOWARD, T. P.; PARDAENS, A.; TINKER, J.; HOLT, J.; WAKELIN, S.; MILNE, G.; LEAKE, J.; WOLF, J.; HORSBURGH, K.; REEDER, T.; JENKINS, G.; RIDLEY, J.; DYE, S. and BRADLEY, S.: UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2009.
- LOWE, J. A.; GREGORY, J. M. and FLATHER, R. A.: Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Climate Dynamics*, 18, 179-188, 2001.
- LÜDERS, K.: Sturmtidenketten. Jahresbericht 1973 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung, Band XXV, 1973.
- MANN, H. B.: Nonparametric Test Against Trend. *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, 13, 245-259, 1945.
- MANN, M. E.: On smoothing potentially non-stationary climate time series. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07214, doi:10.1029/2004GL019569, 2004.
- MANN, M. E.: Smoothing of climate time series revisited. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16708, doi:10.1029/2008GL034716, 2008.
- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J. and ZHAO, Z. C.: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M.,

- Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- MILLER, L. and DOUGLAS, B. C.: Gyre-scale atmospheric pressure variations and their relation to 19th and 20th century sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16602. doi:10.1029/2007GL030862, 2007.
- MITCHUM, G. T.; NEREM, R. S.; MERRIFIELD, M. A. and GEHRELS, W. R.: Modern Sea-Level-Change Estimates, in *Understanding Sea-Level Rise and Variability* (eds J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup, W. S. Wilson), Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 2010.
- MITROVICA, J. X.; TAMISIEA, M. E.; DAVIS, J. L. and MILNE, J. L.: Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea level change. *Nature* 409, 1026–1029, 2001.
- MITROVICA, J. X.; GOMEZ, N. and CLARK, P. U.: The Sea-Level Fingerprint of West Antarctic Collapse, *Science*, 323, 753, doi: 10.1126/science.1166510, 2009.
- MOORE, J. C.; GRINSTED, A. and JEVREJEVA S.: The new tools for analyzing the time series relationships and trends. *Eos Trans. AGU*, 86-24, 2005.
- MUDERSBACH, C.: Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik – Methoden und Anwendungen auf Pegelwasserstände an der Deutschen Nord- und Ostseeküste. *Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen*, Band 1, ISSN 1868-6613, 2010.
- MUDERSBACH, C.; WAHL, T. and JENSEN, J.: Trends in extreme sea levels along the German North Sea coastline compared to regional mean sea level changes, *Continental Shelf Research* (zur Veröffentlichung eingereicht).
- MÜGGE, H. E. and JENSEN, J.: Untersuchungen zum Pegelstandort Büsum. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen DGM*, 35. Jahrgang, Heft 1, 1991.
- NICHOLLS, R. J.: Impacts of and Responses to Sea-Level Rise, in *Understanding Sea-Level Rise and Variability* (eds J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup and W. S. Wilson), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444323276.ch5, 2010.
- NICHOLLS, R. J.; MARINOVA, N.; LOWE, J.A.; BROWN, S. and VELLINGA, P.: Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. A* 2011 369, 161-181, 2011.
- OUMERACI, H.; JENSEN, J.; GÖNNERT, G.; PASCHE, E.; KORTENHAUS, A.; NAULIN, M.; WAHL, T.; THUMM, S.; UJEYL, G. and BURZEL, A.: Extremsturmfluten an offenen Küsten und in Ästuargebieten: Risikoeermittlung und -beherrschung im Klimawandel. Vortrag anlässlich des 14. KFKI-Seminars zur Küstenforschung, Bremerhaven, 2009.
- PELTIER, W. R.: Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea level history. In: *Sea Level Rise*, edited by B. C. Douglas, M. S. Kearney, and S. P. Leatherman, Elsevier, New York., 2001.
- PELTIER, W. R.: Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G(VM2) model and GRACE, *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 32, 111–149, doi: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359, 2004.
- PUGH, D. T.: *Changing sea levels. Effects of tides, weather and climate.* Cambridge University Press, 2004.
- RAHMSTORF, S.: A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise, *Science*, 315, 5810, 368–370. doi: 10.1126/science.1135456, 2007.
- RAHMSTORF, S.; CAZENAVE, A.; CHURCH, J. A.; HANSEN, J. E.; KEELING, R. F.; PARKER, D. E. and SOMERVILLE, R. C. J.: Recent climate observations compared to projections. *Science* 316, 709, 2007.

- RAY, R. D. and DOUGLAS, B. C.: Experiments in Reconstructing Twentieth-Century Sea Levels, *Progress in Oceanography* (in press), 2011.
- ROHLING, E.; GRANT, K.; HEMLEBEN, C.; SIDDALL, M.; HOOGAKKER, B.; BOLSHAW, M. and KUCERA, M.: High rates of sea-level rise during the last interglacial period. *Nat. Geosci.* 1, 38–42, 2008.
- SALAS, J. D.; DELLEUR, J. W.; YEJJEVICH, V. M. and LANE, W. L.: Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications, Littleton, United States, 1980.
- SALAS J. D.: Analysis and modelling of hydrologic time series. In: D.R.Maidment, ed. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill Inc., 19.1–19.72, 1993.
- SCHÖNE, T.; SCHÖN, N. and THALLER, D.: IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (II-GA): scientific benefits. *Journal of Geodesy*, 83, 249–261, 2009.
- SCHÖNFELD, W. und JENSEN, J.: Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln. *Die Küste*, 52, 1991.
- SCHÜTTE, H.: Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste. *Jb. Oldenburg, Ver. Altertumskunde Landesgesch.* 16, Oldenburg, 1908.
- SHENNAN, I. and WOODWORTH, P. L.: A comparison of late Holocene and twentieth-century sea-level trends from the UK and North Sea region. *Geophysical Journal International*, 109, 96–105, 1992.
- SIEFERT, W. und LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen. *Die Küste*, 42, 1985.
- VON STORCH, H. and ZWIERS, F. W.: *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, ISBN 0 521 45071 3, 494 pp, 1999.
- WOTH, K.; WEISSE, R. and VON STORCH, H.: Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics*, 56 (1), 3–15, 2005.
- SUDAU, A. und WEISS, R.: Der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf langwellige Wasserstandsbeobachtungen, In: *Mitteilungen des IWW - 40. IWASA, Internationales Wasserbausymposium Aachen* (in press), 2011.
- TÖPPE, A. und BROCKMANN, T.: Tidewasserstände am Pegel Bensenel seit 1825. *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau*, H. 120, Braunschweig, 1992.
- TRENBERTH, K. E.; JONES, P. D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN TANK, A.; PARKER, D.; RAHIMZADEH, F.; RENWICK, J. A.; RUSTICUCCI, M.; SODEN, B. and ZHAI, P.: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- VELLINGA, P. et al.: Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of The Netherlands. *International Scientific Assessment carried out at request of the Delta Committee. Scientific report WR-2009-05*. KNMI, Alterra, The Netherlands, 2008.
- VERMEER, M. and RAHMSTORF, S.: Global sea level linked to global temperature. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 106, H. 51, 21527–21532. doi: 10.1073/pnas.0907765106., 2009.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and 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.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10:171-179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010, 2010.

- WAHL, T.; JENSEN, J.; FRANK, T. and HAIGH, I. D.: Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years, *Ocean Dynamics*. doi: 10.1007/s10236-011-0383-X (online first), 2011a.
- WAHL, T.; FRANK, T. and JENSEN, J.: Regional patterns of sea level change in the German North Sea related to global patterns – Are IPCC projections reliable for regional planning purposes, 34th IAHR world congress, Brisbane, Australia, (zur Veröffentlichung angenommen), 2011b.
- WANNINGER, L.; ROST, C.; SUDAU, A.; WEISS, R.; NIEMEIER, W.; TENGEN, D.; HEINERT, M.; JAHN, C. H.; HOST, S. and SCHENK, A.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken, *Die Küste*, 76, 2009.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Globale Umweltveränderungen): *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer*. Sondergutachten, Berlin, 2006.
- WHITE, N. J.; CHURCH, J. A. and GREGORY, J. M.: Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000. *Geophysical Research Letters*, 32, L01601, 2005.
- WOODWORTH, P. L.: Trends in UK mean sea level, *Mar. Geod.*, 11, 57– 87, 1987.
- WOODWORTH, P. L.: A search for accelerations in records of European mean sea level, *Int. J. Climat.*, 10, 129–143, 1990.
- WOODWORTH, P. L.; TSIMPLIS, M. N.; FLATHER, R. A. and SHENNAN, I.: A review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges. *Geophys. J. Int.*, 136, 651–670, 1999.
- WOODWORTH, P.; WHITE, N. J.; JEVREJEVA, S.; HOLGATE, S. J.; CHURCH, J. A. and GEHRELS, W. R.: Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century time scales. *Int. J. Climatol.*, 29, 777–789, doi:10.1002/joc.1771, 2008.
- WOODWORTH, P. L.; TEFERLE, F. N.; BINGLEY, R. M.; SHENNAN, I. and WILLIAMS, S. D. P.: Trends in UK mean sea level revisited. *Geophys. J. Int.*, 176(22), 19–30. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03942.x, 2009.
- WOODWORTH, P. L.; POUVREAU, N. and WÖPPELMANN, G.: The gyre-scale circulation of the North Atlantic and sea level at Brest. *Ocean Sci.* 6, 185-190, 2010.
- WÖPPELMANN, G.; POUVREAU, N. and SIMON, B.: Brest sea level record: A time series construction back to the early eighteenth century, *Ocean Dynamics*, 56(5-6), 487–497, doi: 10.1007/s10236-005-0044-z, 2006.
- WÖPPELMANN, G.; MIGUEZ, B. M.; BOUIN, M. N. and ALTAMIMI, Z.: Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change* 57, 369-406, 2007.
- WÖPPELMANN, G.; POUVREAU, N.; COULOMB, A.; SIMON, B. and WOODWORTH, P. L.: Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L22605, 2008.
- WÖPPELMANN, G.; LETETREL, C.; SANTAMARIA, A.; BOUIN, M. N.; COLLILIEUX, X.; ALTAMIMI, Z.; WILLIAMS, S. D. P. and MIGUEZ, B. M.: Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12607, 2009.