

Zum Einfluss möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft

Sebastian Niebuser, Jürgen Jensen, Thomas Wahl, Sönke Dangendorf und Jacobus Hofstede

Zusammenfassung

Der weltweite Anstieg des Meeresspiegels stellt eine der Hauptkonsequenzen des Klimawandels dar. Zur Beurteilung und Auswertung der an Pegeln aufgezeichneten Wasserstandszeitreihen ist daher eine geeignete und möglichst homogene Datenbasis die wesentliche Voraussetzung. Damit keine fehlerhaften Rückschlüsse aus den Analysen der Wasserstandsdaten gezogen werden, muss eine Prüfung und ggf. eine Anpassung der Referenzhöhen der aufgezeichneten Wasserstandswerte an Änderungen der Höhenlage des Pegelstandortes (z. B. Landsenkungen, Setzungen) vorgenommen werden. Insbesondere präzise Angaben zur Höhenlage der Pegel spielen eine übergeordnete Rolle, da die Pegelstandorte tektonischen und anthropogenen Einflüssen unterliegen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einfluss von möglichen Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die MSL-Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven Steubenhöft in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Es handelt sich beim Pegel Cuxhaven Steubenhöft um die längste verfügbare Wasserstandszeitreihe, bestehend aus Tidescheitelwasserständen (Tnw und Thw) für den Bereich der deutschen Nordseeküste, die bis Mitte des 19. Jahrhunderts (1843) ununterbrochen zurückreicht und in digitaler Form vorliegt. Somit bildet diese Wasserstandszeitreihe die wesentliche Grundlage für Rückschlüsse auf historische Wasserstandsentwicklungen sowohl auf regionaler (deutsche Nordseeküste) als auch globaler Ebene. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien ist nur gegeben, wenn ein einheitliches Bezugssystem verwendet wird. Zur Untersuchung des Einflusses möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die MSL-Wasserstandszeitreihe wurden 18 Vergleichspegel herangezogen, die auch Daten vor 1900 aufweisen. Eine von SIEFERT und LASSEN (1985) empfohlene Korrektur wurde auf die MSL-Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven Steubenhöft im Zeitraum von 1855 bis 1900 angewendet. Anschließend wurden sowohl visuelle als auch analytische Vergleichsuntersuchungen (Trend- und Korrelationsanalysen) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich mit anderen Pegeln der Nord- und Ostsee auf das Anbringen dieser Korrektur verzichtet werden sollte, da die MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven Steubenhöft ohne Korrektur besser zu anderen Pegeln passt. Solange keine neuen Erkenntnisse vorliegen, wird aufgrund der vorliegenden Ergebnisse empfohlen, auf eine Korrektur der Wasserstandsaufzeichnungen des Pegels Cuxhaven Steubenhöft zu verzichten.

Schlagwörter

Pegel Cuxhaven (Steubenhöft), Landsenkung, Wasserstandszeitreihen, Nivellement, MSL, Jahreswerte

Summary

Global sea level rise is one of the main consequences of climate change. For analysing recorded water levels at tide gauge sites, a suitable and homogeneous time series is required. Before one can analyze the available data sets, they have to be checked and if necessary adjusted to observed changes in the tide gauge location to avoid misinterpretation. Especially detailed information about the elevation of tide gauge sites is important because they are influenced by tectonic movements and anthropogenic effects. In this paper the focus is on the influence of the subsidence at the lighthouse of Cuxhaven on the MSL water level time series of the tide gauge of Cuxhaven Steubenhöft in the second half of the 19th Century. The tide gauge Cuxhaven Steubenhöft provides the longest and uninterrupted digital time series in the German North Sea (since 1843, restricted to the tidal high (HW) and low water levels (LW)). Thus, this water level time series forms the essential basis for conclusions on historical water level developments on both regional (German North Sea) and global scales. Therefore, the comparability of results from different studies can only be given, if uniform data sets are used. To analyze the influence of subsidence at the lighthouse of Cuxhaven on the MSL water level time series, 18 tide gauge sites were used. The criterion was a data availability that reaches back to the middle of the 19th century. A correction of the raw data as suggested by SIEFERT and LASSEN (1985) was applied to the water level time series of Cuxhaven Steubenhöft in the period of 1855 to 1900. Subsequently, visual, trend and correlation analysis were performed. The comparison with the other tide gauge locations revealed that a correction of the time series is not necessary. The MSL water level time series of Cuxhaven Steubenhöft fits well to the selected reference sites without the correction. As long as no further results suggest otherwise, it is recommended not to correct the water level time series of Cuxhaven Steubenhöft.

Keywords

Tide gauge Cuxhaven (Steubenhöft), subsidence, water level time series, leveling, MSL, annual values

Inhalt

1	Einleitung.....	121
2	Aufgabenstellung.....	122
2.1	Datenverfügbarkeit am Pegel Cuxhaven.....	122
2.2	Untersuchungszeitraum und die Historie des Pegels Cuxhaven.....	123
2.3	Konkretisierung der Aufgabenstellung.....	125
3	Datengrundlage der Vergleichspegel.....	127
4	Berücksichtigung der postglazialen Ausgleichsbewegung.....	128
5	Untersuchungen für Cuxhaven vs. Vergleichspegel.....	130
5.1	Beeinflussung des langfristigen MSL-Trends.....	130
5.2	Visuelle Beurteilung.....	131

5.3	Trendanalysen	134
5.4	Korrelationsanalysen.....	136
5.5	Kombination aus Trend- und Korrelationsanalysen.....	138
5.6	Bewertung der Ergebnisse	139
6	Schlussfolgerung.....	140
6.1	Gründe für eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven.....	141
6.2	Gründe gegen eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven.....	141
6.3	Ausblick.....	142
7	Schriftenverzeichnis	143

1 Einleitung

Global als auch regional betrachtet stellt der Klimawandel den Menschen vor große Herausforderungen. Eine der Hauptkonsequenzen des Klimawandels stellt insbesondere der weltweite Anstieg des Meeresspiegels dar. Um den Meeresspiegelanstieg mit den an Pegeln aufgezeichneten Wasserstandszeitreihen beurteilen und auswerten zu können, ist die maßgebende Voraussetzung eine geeignete und möglichst homogene Datenbasis. Zur Vermeidung fehlerhafter Rückschlüsse aus den zur Verfügung stehenden Datensätzen muss eine Prüfung und ggf. eine Anpassung der Aufzeichnungswerte an festgestellte Änderungen des Pegelstandortes den Untersuchungen vorangestellt werden. Insbesondere präzise Angaben zur Höhenlage der Pegel spielen eine übergeordnete Rolle, da die Pegelstandorte tektonischen und anthropogenen Einflüssen, wie z. B. durch Gasentnahmen (STEFFEN und WU 2011), unterliegen. Im Bereich der deutschen Nordseeküste können diese bis zu einige Millimeter betragen. Eine Nichtberücksichtigung würde systematisch verfälschte Wasserstandsänderungen ergeben, die hinsichtlich ihrer hydrologischen oder klimabedingten Ursachen nicht korrekt interpretiert werden könnten (WANNINGER et al. 2008). In JENSEN und TÖPPE (1986) wurden am Beispiel des Pegels Travemünde Originalaufzeichnungen unter Berücksichtigung der genannten Aspekte aufbereitet, die bis ins Jahr 1826 zurückreichen. Eine Auswertung der Daten hinsichtlich der Entwicklung von Extremwasserständen erfolgte in JENSEN und TÖPPE (1990). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einfluss von möglichen Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die *Mean Sea Level* (MSL)-Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven Steubenhöft (im Weiteren als Pegel Cuxhaven bezeichnet) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Aufgrund der räumlichen Nähe zueinander (s. Abb. 1) wäre der Pegelstandort Cuxhaven maßgeblich von einem Absinken des Cuxhavener Leuchtturms betroffen.

Wie bereits erwähnt, nehmen Setzungserscheinungen an Pegelnullpunkten, hervorgerufen durch z. B. Vertikalbewegungen, bei der Analyse von gemessenen Wasserstandsdaten eine außerordentliche Rolle ein (WEISS und SUDAU 2011). Insbesondere wenn kausale Zusammenhänge zwischen älteren und neueren Messungen hergestellt werden sollen, ist die Betrachtung eines Höhenunterschiedes Δh (Landeshorizont \rightarrow Pegelfestpunkt \rightarrow Pegelnullpunkt) unumgänglich (SIEFERT und LASSEN 1985). Allerdings muss in jedem Fall nachgewiesen werden können, dass festgestellte Höhenänderungen tatsächlich stattgefunden haben und demnach eine Homogenisierung des Datensatzes durchgeführt werden sollte. Fehlt ein derartiger Nachweis oder lassen die Nivellements Zweifel an der

korrekten Ausführung durch fehlerhafte Anschlussnivellements bzw. durch fehlerhafte Messwerte oder Systemunstimmigkeiten aufkommen, sollte auf eine Korrektur verzichtet werden, da diese die Unsicherheiten des Datenbestandes noch vergrößern kann. Außerdem müssen zur Bestimmung von tatsächlichen Höhenänderungen aus Wiederholungsmessungen gleiche Referenzpunkte gewählt werden, die wiederum als stabil und unverändert angesehen werden können (WANNINGER et al. 2008).

Im Weiteren werden der Umgang und eine mögliche Prüfung der Plausibilität von gemessenen Setzungen am Pegel Cuxhaven vorgestellt, bewertet und eine Empfehlung für den zukünftigen Umgang mit der längsten verfügbaren Wasserstandszeitreihe für den Bereich der deutschen Nordseeküste vorgestellt. Diesem Umgang kommt insofern eine wichtige Bedeutung zu, da eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien nur gegeben sein kann, wenn eine einheitliche Datenbasis bzw. ein vergleichbares Bezugssystem verwendet wird. Die Wasserstandsmessungen am Pegel Cuxhaven stellen die einzigen Beobachtungen im Gebiet der Deutschen Bucht dar, die seit Mitte des 19. Jahrhunderts (1843) ununterbrochen vorliegen und in digitaler Form zur Verfügung stehen und somit die wesentliche Basis für Rückschlüsse auf die historische Wasserstandsentwicklung darstellen. Demzufolge ist die Wasserstandszeitreihe nicht nur regional, sondern auch im Kontext globaler Studien von erheblicher Bedeutung für die Bewertung historischer Wasserstandsentwicklungen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Datenverfügbarkeit am Pegel Cuxhaven

Erste Aufzeichnungen von Tidemessungen liegen für den Standort Cuxhaven ab etwa 1786 vor. Anfänglich handelte es sich dabei um lückenbehaftete Wasserstandsablesungen an einer provisorischen Latte zur Bestimmung von Tidehub und ordinärer Ebbe (LASSEN et al. 1984). Laut JENSEN (1984) liegen schließlich seit 1843 regelmäßige Lattenpegelaufzeichnungen vor. Diese Beobachtungen beschränken sich allerdings auf händisch protokollierte Tidehoch- und -niedrigwasser, die in der Niederlassung Cuxhaven der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) archiviert wurden (vgl. Abb. 2). Ab dem Jahr 1899 wurden schließlich die Wasserstände mit einem Schwimmerschreibpegel am Pegel „Steubenhöft“ erfasst (vgl. Abb. 1). Durch die veränderte Messtechnik liegen seit diesem Zeitpunkt vollständig auf Pegelbögen aufgezeichnete Tidekurven vor. Dank der Digitalisierung dieser Tidekurven (veranlasst durch Dipl.-Ozean. Ralph Annutsch, i. R., ehemals BSH) sind seit 1918 bis heute Stundenwerte der Wasserstände vorhanden (DANGENDORF et al. 2013). Seit 1996 zeichnet schließlich ein digitaler Tidepegel minutlich die Wasserstände auf (MÜLLER-NAVARRA et al. 2013).

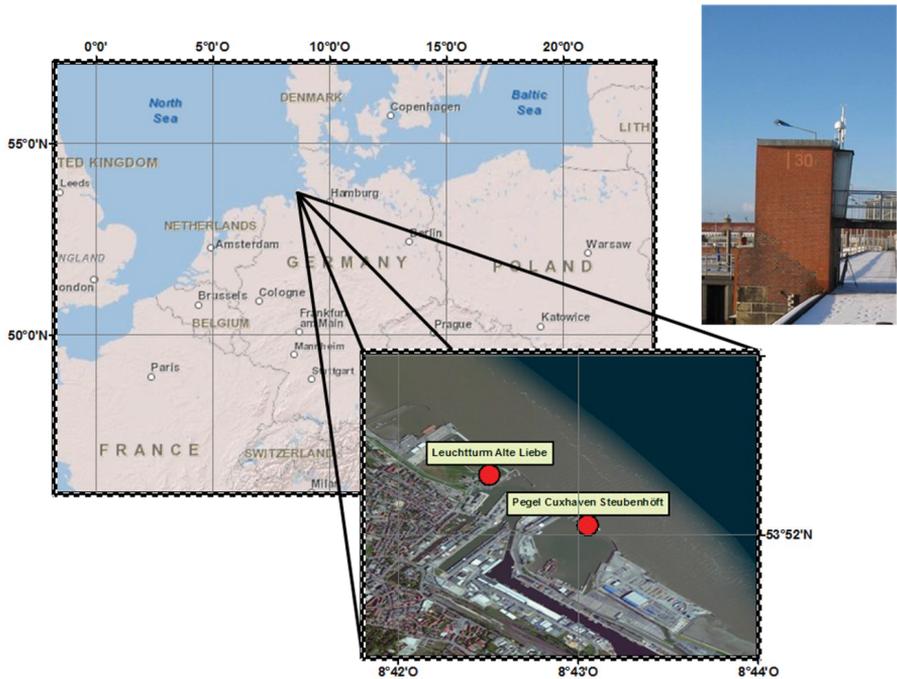


Abbildung 1: Lage des Pegels Cuxhaven und Darstellung des Pegelhauses (WEB 1).

Jahre 1845. Monat Februar.

Hamburg						Cuxhaven						
Zeit		Stand		Bemerkungen		Zeit		Stand		Bemerkungen		
Uhr	Minut	höchster	niedrigster			über Null	unter Null	Uhr	Minut			höchster
1	a. m.	5	55	1	3 1/2	5	12	45	0	3	0 3/4	
		10	50	6	3 1/2	10	5	35	9	1	0	1 1/2
	p. m.	6	35	1	1 1/2	5	1	15	1	1	0	2 1/2
		11	25	6	0	10	0	5	2	1 1/2	0	3 1/2
	a. m.	6	45	1	1	1	1	45	2	4	0	3 1/2
		12	0	5	9	1	1	30	2	4	0	4
	p. m.	7	35	1	6	1	1	20	2	4	0	6
	a. m.	12	35	6	1 1/2	1	1	10	2	5 1/2	0	6
		8	15	1	1 1/2	1	1	10	9	5	0	7
	p. m.	1	20	7	2 1/2	0	1	10	9	5	1	2
	a. m.	9	0	1	0	1	1	50	10	5	1	2
		10	5	1	0	3/4	1	40	10	5	0	7
	p. m.	2	50	7	4 1/2	0	3/4	30	9	6	0	7
		10	35	7	4 1/2	0	3/4	20	9	6	0	1 1/2
	a. m.	3	30	1	1 1/2	0	3/4	10	10	1	0	10
		11	20	1	0	1	1	10	10	1	0	10
	p. m.	4	10	9	2 1/4	0	1	55	11	2 1/2	0	10
		11	5	1	10 1/4	0	1	40	12	2	2	3

Abbildung 2: Wasserstandsaufzeichnungen der Pegel Hamburg und Cuxhaven für Februar 1845. Die Höhen sind in der Einheit Hamburger Fuß und Zoll aufgetragen, die Zeiten sind lokale Uhrzeiten (MÜLLER-NAVARRA et al. 2013).

2.2 Untersuchungszeitraum und die Historie des Pegels Cuxhaven

Als Grundlage für die Untersuchungen wird der Zeitraum von 1855 bis 1900 herangezogen. Konkret wird überprüft, ob die festgestellten Höhenbewegungen am Pegelfestpunkt

des Cuxhavener Tidepegels (vgl. z. B. SIEFERT und LASSEN 1985) auf Basis vergleichender Betrachtungen mit anderen langen Pegelzeitreihen bestätigt werden können und somit eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe erforderlich machen.

Zum geschichtlichen Hintergrund: Im März des Jahres 1855 brachte Lentz am Granitsockel des Cuxhavener Leuchtturms ein Höhenschild an, das später durch eine in den Granit gehauene Kerbe ersetzt wurde. Die Höhe leitete Lentz aus seinem Nivellement von Hamburg nach Cuxhaven ab (vgl. Tab. 1). Durch diese bauliche Kontrollmarke war einerseits der Pegelnullpunkt für die Nachwelt gesichert und andererseits ein Anschlusspunkt für weitere Höhenmessungen geschaffen.

In SIEFERT und LASSEN (1985) wurden die in Tab. 1 aufgeführten Nivellements ausgewertet und eine Senkungstendenz des Leuchtturms Cuxhaven aus den abnehmenden Höhenwerten der Pegelkontrollmarke in Form der eingehauenen Kerbe abgeleitet. Vorgegangen waren laut SIEFERT und LASSEN (1985) zeitaufwendige Umrechnungen von Fuß- in Metermaße für ältere Nivellements sowie die Bestimmung vergangener Änderungen von Höhenfestpunkten.

Tabelle 1: Übersicht durchgeführter Nivellements für den Betrachtungszeitraum (SIEFERT und LASSEN 1985).

Lentz	1854/55 Hamburg-Cuxhaven
Taack	Nachmessungen von Otterndorf bis Cuxhaven
Preußische Landesaufnahme	1875 mit Ergänzungsmessungen bis 1912
Seibt (im preußischen geodätischen Institut, später Büro für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen)	1876/77; 1881; 1885; 1890; 1883/84 Gradmessung Nivellement Anclam-Cuxhaven
Nivellements im Amte Ritzebüttel (heutiges Cuxhaven)	1864 bis 1912
Hamburger Vermessungsbüro in Cuxhaven	1912-1935
Reichsamt für Landesaufnahme	1914-1935
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt - Landesvermessung-	1950-1981
Bundesanstalt für Gewässerkunde	
Vermessungsamt der Freien und Hansestadt Hamburg	
Nordseeküstennivellement I (NKN I)	1926 bis 1931
Nordseeküstennivellement II (NKN II)	1949-1955

In Abb. 3 ist die angesprochene und von SIEFERT und LASSEN (1985) abgeleitete Senkungstendenz (blau) mit der zugehörigen Regressionsgeraden (rot) aus LASSEN et al. (1984) dargestellt. Der Korrelationskoeffizient zwischen den nivellierten Höhen der Kerbe am Leuchtturm mit der Regressionsgeraden beträgt $r = -0,97$.

Aus den so erhaltenen Senkungen und „unter Zugrundelegung aller Erkenntnisse und der Umrechnung vom „alten“ auf das „neue System“ (NN a.S. auf NN n.S.) sind die Wasserstände in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern für Cuxhaven“ nach SIEFERT und LASSEN (1985, S. 70) um die in Tab. 2 aufgeführten Beträge anzupassen. Daraus ergibt sich für den relevanten Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 die in Abb. 3 dargestellte Korrekturkurve.

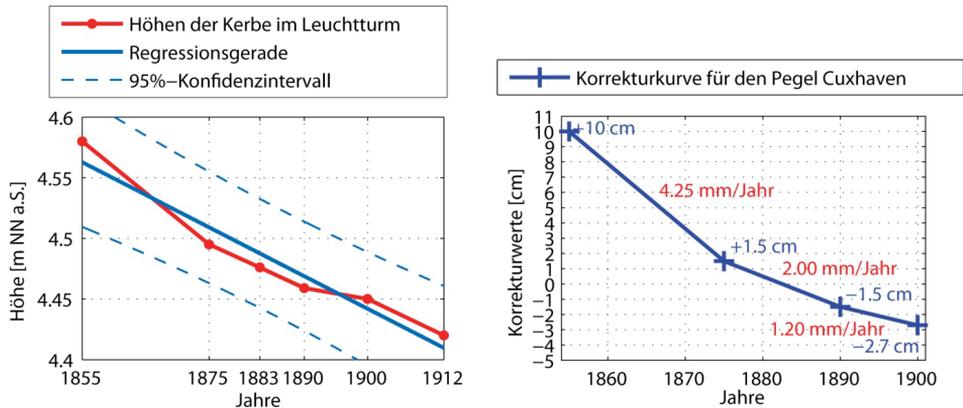


Abbildung 3: Ermittelte Senkungstendenz des Leuchtturms Cuxhaven von 1855 bis 1912 mit Regressionsgeraden aus LASSEN et al. (1984) (links) und Korrekturkurve für die Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven von 1855 bis 1900 aus SIEFERT und LASSEN (1985) (rechts).

Tabelle 2: Stützpunkte der Korrekturkurve für den Pegel Cuxhaven (SIEFERT und LASSEN 1985).

vor 1855	unbekannt
von 1855 bis 1875	gleichmäßig von +10 cm auf +1,5 cm
bis 1890	gleichmäßig auf -1,5 cm
bis 1900	gleichmäßig auf -2,7 cm
ab 1900	unverändert (die Angaben in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern sind auf „a.S.“ bezogen, gelten aber für „n.S.“ als richtig, da sich zwei Annahmen gegeneinander aufheben, und zwar -2,7 cm und +2,5 cm)
ab 1936	keine Korrekturen außer den angegebenen PNP-Verschiebungen

2.3 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Aus der in Abb. 3 gezeigten Korrekturfunktion zum Ausgleich des Einflusses von Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die Wasserstandsbeobachtungen ergibt sich die grundlegende Frage, ob die Anpassung der Aufzeichnungen zwischen 1855 und 1900 vorgenommen werden muss. Aufgrund der häufigen Verwendung des Pegels Cuxhaven als Indikator für die gesamte Deutsche Bucht (vgl. z. B. DANGENDORF et al. 2012) bzw. als repräsentativen Standort für Hochwasserrisikoanalysen, auch als Eingangspiegel der Stadt Hamburg (OUMERACI et al. 2009, 2012; WAHL et al. 2011, 2012), kommt dieser Fragestellung eine entscheidende Bedeutung zu. Neue Untersuchungen zeigen, dass eine Eignung des Pegels Cuxhaven als Indikator des MSL für die gesamte Deutsche Bucht nicht gegeben ist, da das gemeinsame Signal (im Wesentlichen dekadische Variabilität) anderer Nordseepiegel nicht vollständig wiedergegeben wird (ALBRECHT et al. 2011). Allerdings bezieht sich diese Erkenntnis auf Aufzeichnungen nach 1924, weshalb diese Aussage nicht unmittelbar auf den hier betrachteten Untersuchungszeitraum übertragen werden kann.

Unabhängig von der Eignung des Pegels Cuxhaven als MSL-Indikator für die gesamte Deutsche Bucht wären Änderungen in den Wasserständen fehlerbehaftet ermittelt worden (z. B. säkularer Meeresspiegelanstieg), wenn einerseits der Zeitraum von 1855 bis

1900 den Untersuchungen zugrunde lag und andererseits die „falsche“ Zeitreihe für die Untersuchungen herangezogen wurde. Denn ein kontinuierliches Sinken des Leuchtturms führt selbst bei gleichbleibenden Wasserständen zu höheren Pegelablesungen. Damit würde eine Trendermittlung zwangsläufig zu erhöhten Anstiegsraten führen.

In der Literatur finden sich sowohl Arbeiten, die eine Anpassung der Wasserstandszeitreihen für entsprechende Untersuchungen vorgenommen haben (z. B. JENSEN 1984; JENSEN et al. 1992; HOFSTEDE 1990) wie auch Arbeiten, in welchen bewusst darauf verzichtet wurde (z. B. JENSEN et al. 1988, 2011a, 2011b; WAHL et al. 2010, 2011). Hierbei resultieren die begründeten Zweifel an der ermittelten Senkungstendenz aus einer Untersuchung von Lentz, die in LASSEN et al. (1984) beschrieben steht. Als Grundlage dienten mittlere Jahreswasserstände (etwa halbe Tidehöhe; entspricht mittlerem Tidehalbwasser $MT1/2w$ (vgl. JENSEN et al. 2011a für die Definition und den Unterschied MSL und $MT1/2w$)) sowie die Ergebnisse des Nivellements von Hamburg nach Cuxhaven (vgl. Tab. 1, 1. Zeile), das von Lentz selbst durchgeführt wurde. Lentz kommt allerdings zu dem Schluss, dass sich weder durch die Gegenüberstellung der mittleren Jahreswasserstände noch durch das Nivellement ein Sinken des Leuchtturms vermuten bzw. nachweisen lässt.

LASSEN et al. (1984) vermuten hingegen keine hohe Genauigkeit des Lentz'schen Nivellements bis Harburg, weshalb diese Vermutung auch für die Nivellementslinie bis Cuxhaven aufgestellt wird. Eine Zusammenstellung von Widersprüchen in den Messungen kann allerdings aufgrund fehlender Rückmessungen nicht erfolgen. Daher kommen LASSEN et al. (1984) zu dem Schluss, dass Lentz's Annahme nicht aufrechterhalten werden kann und der Leuchtturm wie in Abb. 3 im Zeitraum von 1855 bis 1912 gleichmäßig um etwa 16 cm gesackt ist. So wurde die Korrektur als nachgewiesene Setzung in JENSEN (1984) angenommen und der verwendete Datensatz angepasst. An dieser Stelle gilt es allerdings die Frage zu beantworten, wie mit der einschränkenden Aussage in LASSEN et al. (1984, S. 114) „...Lentz vermutet sogar einen Fehler in seinem Nivellement von 1855 kurz vor Cuxhaven...“ umzugehen ist? Ohne die Berücksichtigung des Lentz'schen Nivellements von 1855 würde sich die sehr starke Senkungsrate von 4,25 mm/Jahr für den Zeitraum 1855 bis 1875 nicht in der Form ergeben wie in Abb. 3 dargestellt. Außerdem kann anhand der veröffentlichten Ergebnisse nicht gänzlich geklärt werden, ob die ermittelten Höhenunterschiede aus dem Nivellement vollständig auf lokale Setzungen im Bereich des Cuxhavener Leuchtturms zurückzuführen sind. Ebenso können diese teilweise aus Unterschieden in großräumigeren Vertikalbewegungen zwischen den Ausgangspunkten des Nivellements (Bremen und Hamburg) und dem Endpunkt Cuxhaven zurückzuführen und schließlich in den Messungen erfasst worden sein. Diese und weitere unbeantwortete Fragen haben dazu geführt, dass die Korrektur z. B. im KFKI-Projekt AMSeL („Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“) nicht berücksichtigt, jedoch ebenso wie die Unsicherheiten weiterer historischer Pegeldata diskutiert wurde (s. u. und JENSEN et al. 2011a).

Im Folgenden werden verschiedene Analysemethoden auf den Datensatz von Cuxhaven ohne (Cuxhaven oK) und mit Korrektur (Cuxhaven mK) der Wasserstände angewendet. Dabei werden optische Vergleiche sowie Trend- und Korrelationsanalysen mit Pegeln durchgeführt, für welche ebenfalls Aufzeichnungsdaten zwischen 1855 und 1900 verfügbar sind. Diese Auswertungen werden auf Basis von MSL-Jahreswerten durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Aussage bzw. eine Empfehlung

aussprechen zu können, wie in Zukunft mit dem Datensatz des Pegels Cuxhaven umzugehen ist und so eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen in zukünftigen Studien durch Berücksichtigung eines einheitlichen Datensatzes zu gewährleisten.

3 Datengrundlage der Vergleichspegel

Für die Vergleichsbetrachtungen wurden 18 Pegelstandorte ausgewählt, für die Daten aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zur Verfügung stehen und die sich im erweiterten räumlichen Umfeld des Pegels Cuxhaven an der Nord- und Ostseeküste sowie eines Pegel an der Atlantikküste befinden. In Tab. 3 (Spalte 1) sind die 18 Pegelstandorte aufgelistet, die für die Vergleichsuntersuchungen mit Cuxhaven genutzt werden sollen. Abb. 4 zeigt die geographische Lage der Nord- und Ostseepegel sowie die des Atlantikpegels. In Spalte 2 und 3 von Tab. 3 sind die zur Verfügung stehenden Aufzeichnungszeiträume aufgeführt. Es werden jeweils MSL-Jahreswerte verwendet, die auf der Homepage des Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL, <http://www.psmsl.org/>) u. a. für die Nordsee zur Verfügung gestellt werden. Die Daten der Ostseepegel stammen aus der Veröffentlichung von HAHN und RIETSCHEL (1938).

Tabelle 3: Ausgewählte Pegel für die Vergleichsuntersuchungen.

Pegel	Datenverfügbarkeit		Datenlücken 1855-1900 [%]	GIA-Korrektur [mm/Jahr] (pos. = Senkung)
	von	bis		
Cuxhaven	1843	2011	0	0,36
Brest	1807	2011	9	0,22
Sheerness	1833	2006	83	-0,08
Delfzijl	1826	2011	0	0,37
West Terschelling	1887	2011	70	0,43
Harlingen	1865	2009	22	0,36
Den Helder	1832	2011	0	0,30
Ijmuiden	1871	2011	37	0,16
Hoek van Holland	1864	2011	20	0,04
Vlissingen	1862	2009	15	-0,06
Pillau	1816	1935	0	-0,39
Stolpmünde	1858	1935	7	-0,39
Kolberg	1816	1935	0	-0,35
Swinemünde	1811	1935	0	-0,28
Barhöft	1878	1935	50	0,00
Warnemünde	1883	1935	61	-0,05
Schleimünde	1874	1935	41	0,00
Travemünde	1855	1935	0	0,09
Amsterdam	1800	1900	0	0,17*
*Mittelwert aus Den Helder, Ijmuiden und Hoek van Holland $((0,30+0,16+0,04)/3 = 0,17)$				

Wichtig für die weitere Herangehensweise und insbesondere für die Beurteilung der Ergebnisse sind Lücken in den Aufzeichnungsdaten für den Untersuchungszeitraum von

1855 bis 1900, welche in Spalte 4 in Tab. 3 prozentual aufgeführt sind. So ist es z. B. fraglich, inwiefern belastbare Trends bzw. Vergleiche mit dem Pegelstandort Sheerness ermittelt werden können, wenn 83% des Betrachtungszeitraumes lückenbehaftet sind. In den entsprechenden Kapiteln wird schließlich der Datensatz von Cuxhaven an die vorhandene Datengrundlage des Vergleichspegels angepasst (vgl. Kap. 5.2). Das bedeutet, dass für die Untersuchungen nur die Jahreswerte verwendet werden, die an beiden Pegeln gleichermaßen vorhanden sind.

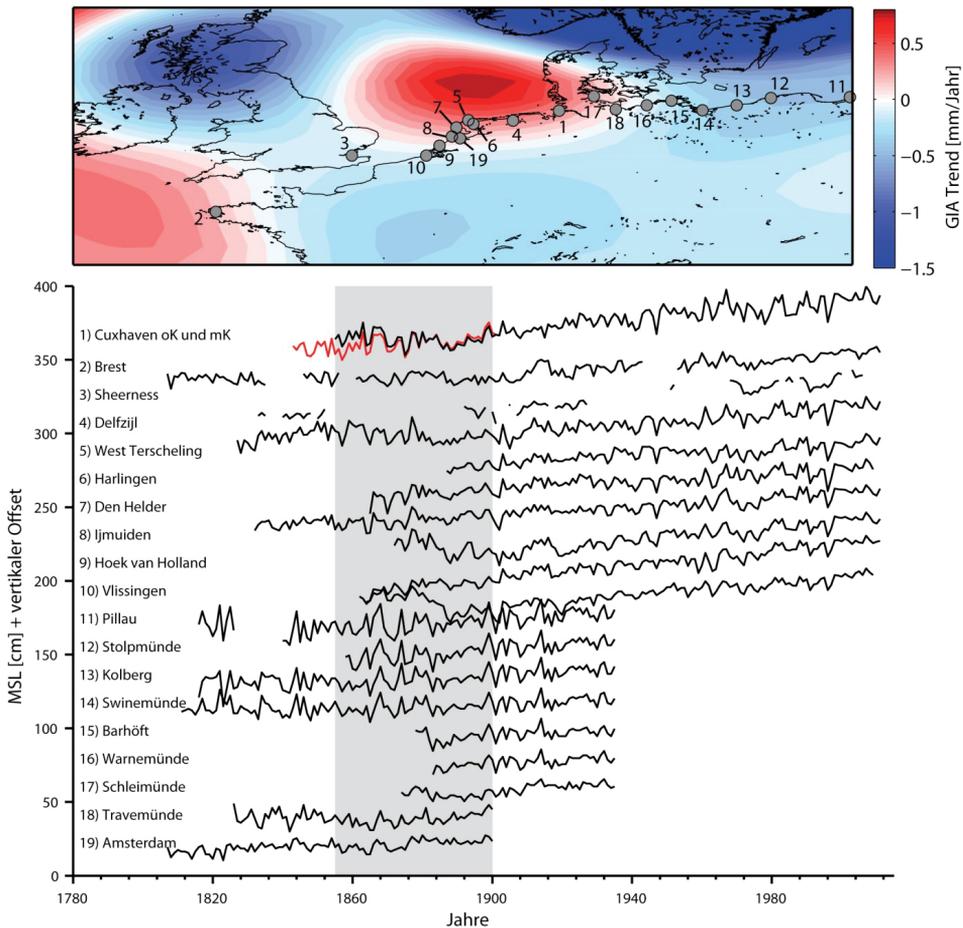


Abbildung 4: Geografische Lage aller Vergleichspegel inklusive des GIA „Fingerprints“ nach PELTIER (2004) (oben) mit den zugehörigen MSL-Zeitreihen (schwarz) aller Pegel. Außerdem sind die MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK (rot) als auch Cuxhaven mK (schwarz) dargestellt. Die grau schraffierte Fläche kennzeichnet die Untersuchungsperiode von 1855–1900.

4 Berücksichtigung der postglazialen Ausgleichsbewegung

Die MSL-Zeitreihen der in Tab. 3 aufgeführten Pegel sollen für vergleichende Untersuchungen mit der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK hinsichtlich interannueller/

dekadischer Variabilität und Trendentwicklung genutzt werden. Nach WANNINGER et al. (2008) ist eine wichtige Voraussetzung, dass die Höhenlagen der Pegel und der Pegelnullpunkte während der Untersuchungsdauer konstant bzw. bekannt sind und damit korrigiert werden können. Einflüsse aus tektonischen sowie anthropogenen Einwirkungen (z. B. Bergbau, Grundwasser- oder Gasentnahmen) erzeugen vertikale Bewegungen der Erdoberfläche, die sich ebenfalls auf die Pegelstandorte auswirken. Insbesondere wenn es darum geht, Trends unterschiedlicher Pegelaufzeichnungen miteinander zu vergleichen, ist es wichtig, den Einfluss vertikaler Landbewegungen zu berücksichtigen. Die Überlagerung von Wasserstandsänderungen und den rezenten Krustenbewegungen führen, wenn sie nicht berücksichtigt werden, zu scheinbaren Änderungen in den Wasserständen und hydrologische bzw. klimabedingte Wasserstandsänderungen können nicht korrekt erfasst werden. Etwaige Unterschiede in den relativen Trends sind in dem Fall auf ebensolche Landbewegungseffekte zurückzuführen (WANNINGER et al. 2008).

Um diesen Effekte auszuschließen, wurden alle MSL-Zeitreihen um den Einfluss postglazialer Ausgleichbewegungen (*engl. Glacial Isostatic Adjustment* (GIA)) korrigiert. Hierzu wurden entsprechende Daten von der Webseite des Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL, <http://www.psmsl.org/>) (PELTIER 2004) verwendet. GIA ist ein globales Phänomen mit regional unterschiedlicher Ausprägung und beschreibt großskalige Landhebungen/-senkungen der Erdoberfläche infolge von Schmelzprozessen in der Landeisbedeckung seit der letzten Eiszeit. Zwar können auch andere geologische Vorgänge (z. B. Tektonik, vulkanische Aktivitäten oder Grundwasser- und Gasentnahmen) für Bewegungen in der Erdoberfläche verantwortlich sein, jedoch ist GIA der einzige durch numerische Modelle erfassbare Prozess. Die Auswirkungen der geologischen Vorgänge können sich mit dem GIA-Effekt überlagern und diesen verstärken oder auch verringern. Für verschiedene Megacities wurden so z. B. in NICHOLLS (2010) Landsenkungen über das 20. Jahrhundert hinaus ermittelt, die bis zu mehrere Meter betragen können. In Arbeiten der jüngeren Vergangenheit werden GIA-Modellergebnisse zur Berücksichtigung der Vertikalbewegungen verwendet (vgl. CHURCH und WHITE 2006; HOLGATE und WOODWORTH 2004; JEVREJEVA et al. 2006, 2008). Kürzlich zeigten zudem WAHL et al. (2013), dass die GIA-Korrektur in der Nordsee flächenmäßig zu den aktuell noch immer homogensten Ergebnissen führt. Eine Übersicht der GIA-Daten und der Modellierung liefern STEFFEN und WU (2011).

Die verbleibenden Effekte können beispielsweise durch ausreichend lange *Continuous Global Positioning System* (CGPS) Messungen erfasst werden. Aktuelle Studien bestätigen das und verwenden das CGPS, um kontinuierliche Messungen der Vertikalbewegungen direkt oder in unmittelbarer Nähe der Pegel auszuwerten (WÖPPELMANN et al. 2007, 2009; SCHÖNE et al. 2009; SUDAU und WEISS 2011). Auf diese Weise sind sehr genaue Abschätzungen der Vertikalbewegungen möglich und unter der Annahme, dass dieser Prozess linear verläuft (SCHÖNE et al. 2009), ist es möglich, verfügbare Wasserstandsdaten um die Vertikalbewegungen zu korrigieren (z. B. WOODWORTH et al. 2009).

Die für die ausgewählten Pegelstandorte ermittelten Landsenkungs- bzw. Landhebungsraten sind in Tab. 3 (Spalte 5) zusammengefasst aufgeführt. Es stehen für jeden Pegelstandort drei Werte zur Verfügung, die jeweils unterschiedliche Zeiträume abbilden. Der erste Wert beschreibt die mittlere Landsenkungs- bzw. Landhebungsrate der letzten 250 Jahre, der zweite Wert den prognostizierten Wert für die kommenden 250 Jahre und der dritte und in dieser Arbeit verwendete Wert bildet die mittlere Landsenkungs- bzw.

Landhebungsrate für die Gegenwart (engl.: *average present-day rate*) ab. Da für den Pegelstandort Amsterdam keine GIA-Korrekturen verfügbar sind, wurde der Mittelwert der Standorte Den Helder, Ijmuiden und Hoek van Holland angesetzt. Grund für die Wahl der Standorte zur Mittelwertbildung ist die geographische Lage des Pegels Amsterdam zu den drei gewählten Pegelstandorten.

5 Untersuchungen für Cuxhaven vs. Vergleichspegel

5.1 Beeinflussung des langfristigen MSL-Trends

Bevor mit den Auswertungen zu dem beschriebenen Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 begonnen wird, soll der Einfluss der Korrektur auf den langfristigen Trend der MSL-Zeitreihe am Pegel Cuxhaven aufgezeigt werden. Konkret wurde der Trend für den Zeitraum 1855 bis 2011 bestimmt. Zwar liegen MSL-Jahreswerte für die Cuxhaven-Zeitreihe seit 1843 vor, jedoch sind Informationen über mögliche Korrekturen erst ab 1855 verfügbar. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse bzw. Vermengung von korrigierten und nicht-korrigierten Daten zu vermeiden, wird auf die Betrachtung des Zeitraums vor 1855 verzichtet. Die GIA-Korrekturen wurden für die Auswertung bereits angebracht. Abb. 5 zeigt die MSL-Zeitreihe von Cuxhaven oK und mK sowie die lineare Trendentwicklung, die auch in Tab. 4 zusammengefasst ist.

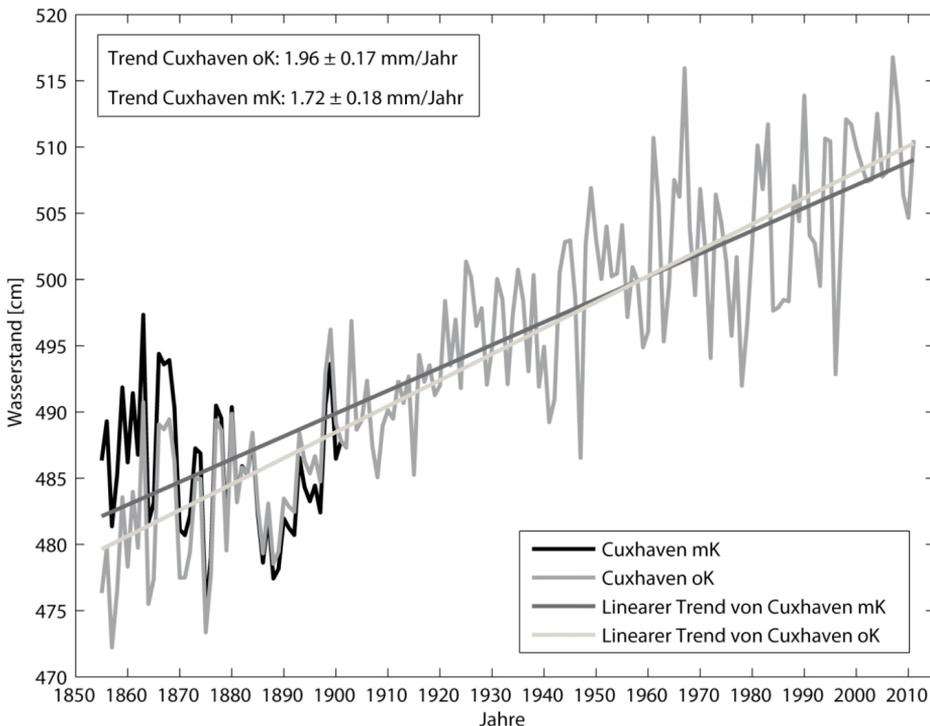


Abbildung 5: Langfristiger Trend der MSL-Zeitreihen oK und mK am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1855 bis 2011.

Tabelle 4: Langfristiger Trend der MSL-Zeitreihen oK und mK am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1855 bis 2011.

MSL-Zeitreihe	Trend nach GIA-Korrektur für den Zeitraum 1855 bis 2011 [mm/Jahr]
Cuxhaven oK	1,96 ± 0,17
Cuxhaven mK	1,72 ± 0,18

Es ist deutlich zu sehen, dass eine Korrektur der MSL-Jahreswerte im Zeitraum von 1855 bis 1900 am Pegel Cuxhaven eine Reduktion des linearen Trends um 0,24 mm/Jahr zur Folge hat. Dies entspricht mehr als 10% des Trends bezogen auf die MSL-Zeitreihe ohne Korrektur und hat somit einen nicht unerheblichen Einfluss auch auf langfristige Auswertungen. Trendbetrachtungen über den gesamten Aufzeichnungszeitraum einer Wasserstandszeitreihe stellen die wichtigsten Anhaltspunkte für Wasserstandsänderungen dar. Entsprechend wirken sich (nicht) berücksichtigte Höhenänderungen der Pegelstandorte aus. Deutlich stärker wirkt sich natürlich die Korrektur bei Untersuchungen der Trends für den Beobachtungszeitraum von 1855 bis 1900 (vgl. Kap. 5.3) aus, da hier der gesamte Zeitraum unmittelbar von der etwaig anzubringenden Korrektur betroffen ist.

5.2 Visuelle Beurteilung

Die folgenden Abb. 6 bis 9 zeigen beispielhaft den Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit weiteren ausgewählten langen MSL-Nordsee-Pegelzeitreihen aus Tab. 3. Konkret handelt es sich um die Pegelstandorte Brest, Delfzijl, Harlingen und Hoek van Holland (siehe Legende unten rechts). Alle MSL-Zeitreihen sind um den Einfluss postglazialer Ausgleichbewegungen (GIA) korrigiert worden. Die angegebenen Trends beziehen sich lediglich auf den Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Cuxhaven-Zeitreihen auf den Zeitraum reduziert, für welchen auch MSL-Jahreswerte des Vergleichspegels vorhanden sind. Deshalb unterscheiden sich die Trends in den Cuxhaven-Zeitreihen oK und mK leicht, je nachdem, wie viele Werte des Vergleichspegels vorhanden sind. Die jeweilige Angabe, ob der Trend von Cuxhaven oK bzw. mK als signifikant unterschiedlich gekennzeichnet ist, bezieht sich auf das Konfidenzintervall auf dem 95%-Signifikanzniveau des Vergleichspegels. Befindet sich der Trend von Cuxhaven oK bzw. mK innerhalb des Vertrauensintervalls des Vergleichspegels, so wird er als „nicht signifikant unterschiedlich“ und anderenfalls als „signifikant unterschiedlich“ bezeichnet.

In diesem Abschnitt wird allerdings nur auf die optische Vergleichbarkeit eingegangen. Weitere Erläuterungen zu den in den Grafiken angegebenen Trends für alle Vergleichspegel werden in Kap. 5.3 und 5.5 geliefert.

Augenscheinlich passt die MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK deutlich besser zu den MSL-Zeitreihen der Pegel Brest und Delfzijl als die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK. Für die Pegel Harlingen und Hoek van Holland wiederum scheint die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK besser übereinzustimmen.

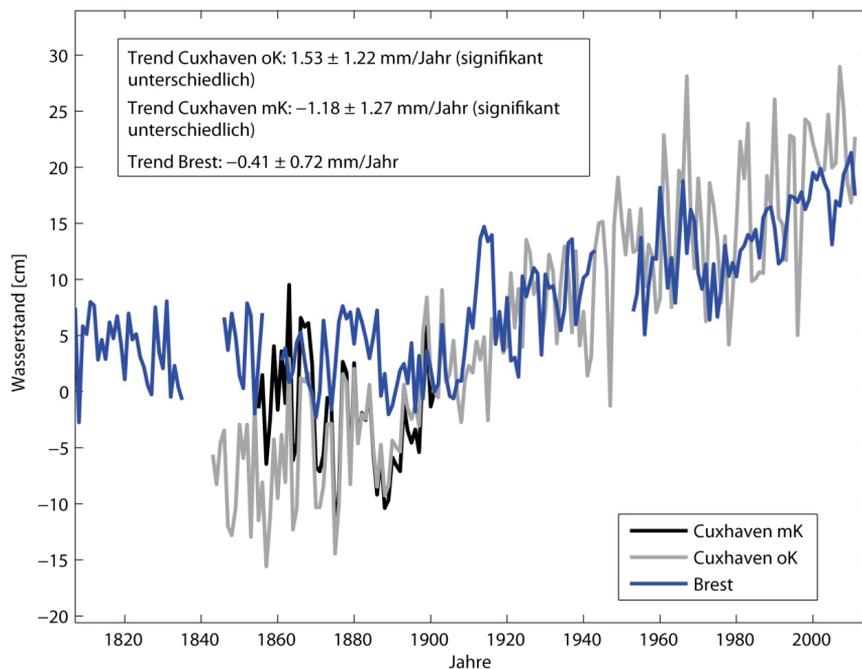


Abbildung 6: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Brest.

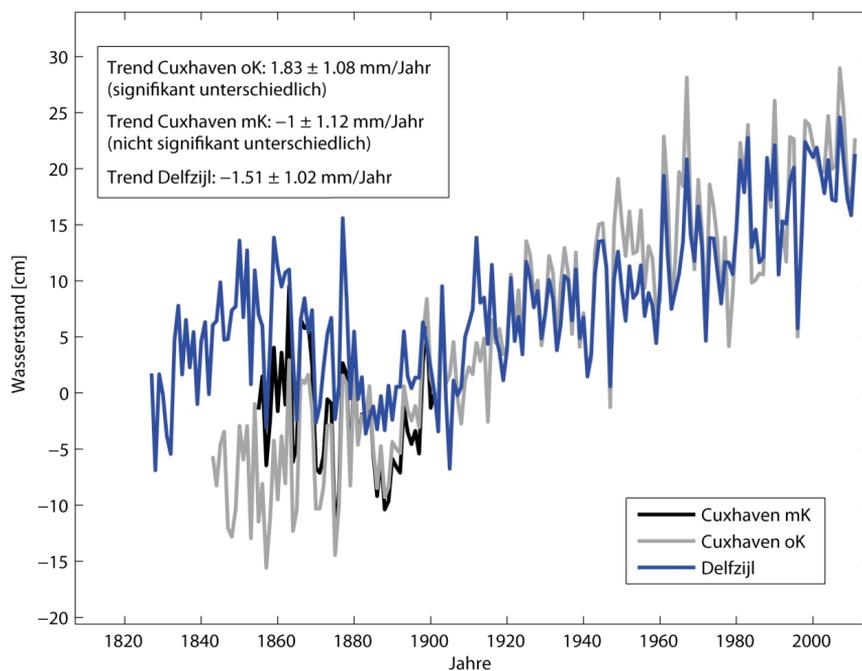


Abbildung 7: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Delfzijl.

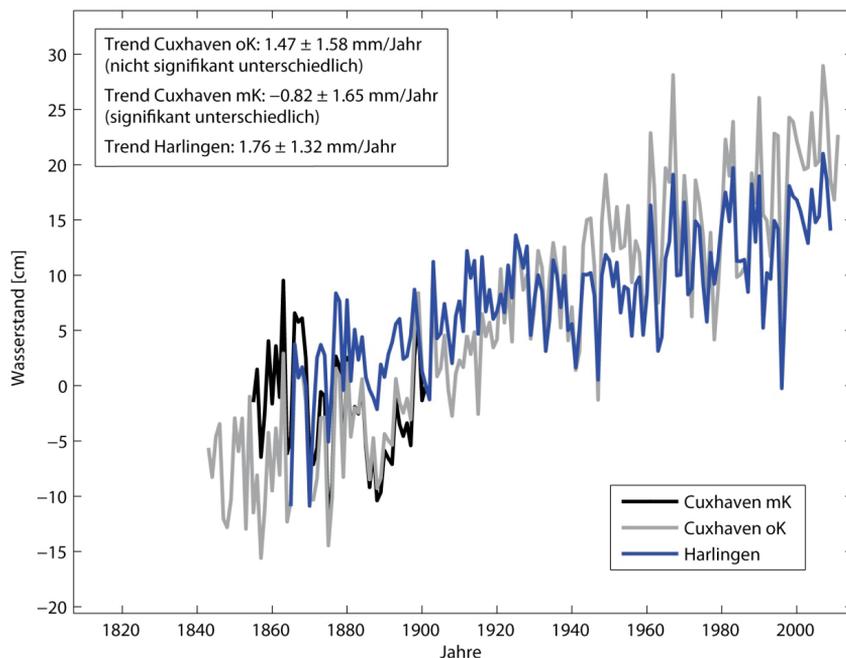


Abbildung 8: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Harlingen.

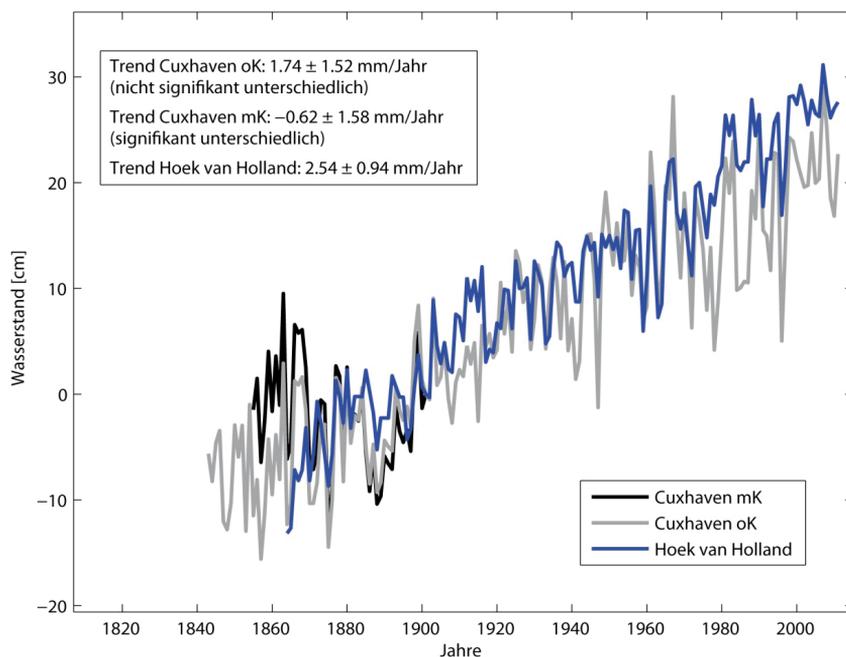


Abbildung 9: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Hoek van Holland.

Insgesamt ist eine visuelle Beurteilung der verschiedenen Pegelzeitreihen auf deren Übereinstimmung schwierig, da alle MSL-Zeitreihen eine deutliche inter-annuelle Variabilität aufweisen, die dem langfristigen Trend überlagert ist (eine Reduktion der Variabilität könnte hier bereits einen besseren Aufschluss geben). Eben dieser Trend wird durch das Anbringen der Korrekturfunktion am Pegel Cuxhaven deutlich beeinflusst. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, einerseits die Korrelation zwischen dem Pegel Cuxhaven und anderen langen Pegeln aber vor allem auch die Trends, die sich an verschiedenen Pegeln für den Zeitraum 1855 bis 1900 ergeben, vergleichend zu betrachten, wie in den folgenden Kapiteln durchgeführt. Dabei soll überprüft werden, ob durch einen Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit weiteren langen MSL-Pegelzeitreihen aus Nord- und Ostsee analytisch nachgewiesen werden kann, dass eine Korrektur der Zeitreihe des Pegels Cuxhaven, in der Art wie von SIEFERT und LASSEN (1985) vorgeschlagen, zu empfehlen ist.

5.3 Trendanalysen

Tabelle 5: Ergebnisse der Trendanalysen für den Zeitraum von 1855 bis 1900 der 18 Vergleichspegel und Cuxhaven oK sowie mK (grau hinterlegte Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt).

Pegel	Trend nach GIA-Korrektur für den Zeitraum 1855 bis 1900 [mm/Jahr]	
Cuxhaven oK	1.83	\pm 1.08
Cuxhaven mK	-1.00	\pm 1.12
Brest	-0.41	\pm 0.72
Sheerness	-3.57	\pm 8.82
Delfzijl	-1.51	\pm 1.02
West Terschelling	2.87	\pm 3.09
Harlingen	1.76	\pm 1.32
Den Helder	1.50	\pm 0.78
Ijmuiden	-4.12	\pm 2.26
Hock van Holland	2.54	\pm 0.94
Vlissingen	-4.01	\pm 1.28
Pillau	1.85	\pm 1.30
Stolpmünde	2.38	\pm 1.32
Kolberg	1.91	\pm 1.00
Swinemünde	1.27	\pm 0.92
Barhöft	1.21	\pm 2.88
Warnemünde	4.60	\pm 2.13
Schleimünde	-0.84	\pm 1.38
Travemünde	1.41	\pm 0.76
Amsterdam	1.37	\pm 0.59

Tab. 5 und Abb. 10 fassen die Ergebnisse der linearen Trendanalysen der MSL-Zeitreihen für mehrere Pegel über die Periode 1855 bis 1900 tabellarisch und grafisch zusammen.

Für jeden der berücksichtigten Vergleichspegel ist in Tab. 3 weiterhin angegeben, wie viel Prozent der MSL-Jahreswerte im Zeitraum 1855 bis 1900 fehlen. Alle Pegel, bei denen mehr als 25% der Daten fehlen, können aufgrund der großen Datenlücken nicht für belastbare Trendvergleiche genutzt werden. Außerdem ist der Pegel Vlissingen nicht herangezogen worden, da hier die Vermutung besteht, dass die verfügbaren Daten aus dem 19. Jahrhundert fehlerhaft sind (WAHL et al. 2013). Somit können insgesamt 11 Pegel für belastbare Vergleiche mit den MSL-Zeitreihen des Pegels Cuxhaven herangezogen werden, für die in Tab. 5 auch die Trends sowie das jeweilige Konfidenzintervall auf dem 95%-Signifikanzniveau aufgeführt sind.

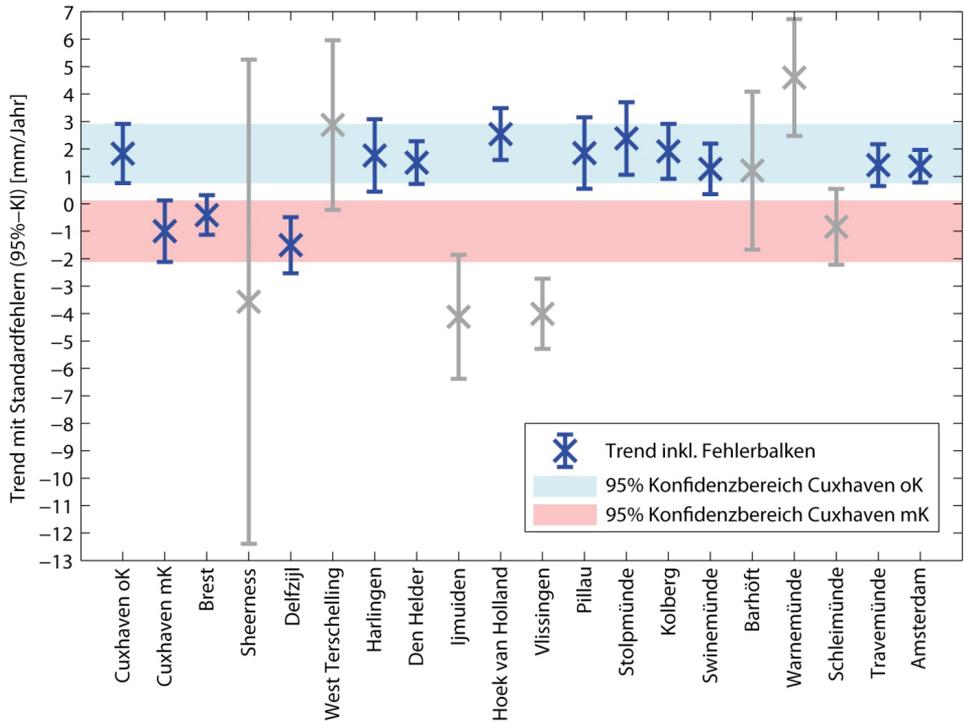


Abbildung 10: Ergebnisse der Trendanalysen mit Fehlerbalken auf dem 95%-Signifikanzniveau für die 18 Vergleichspegel und Cuxhaven oK sowie mK (grau hinterlegte Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt; die farbigen Balken stellen eine optische Verlängerung des 95%-Konfidenzintervalls der Trends am Pegel Cuxhaven oK und mK dar).

Beim Vergleich der Trends aus den MSL-Wasserstandszeitreihen der untersuchten Pegelstandorte passt die korrigierte MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK wie schon bei der visuellen Betrachtung deutlich besser zu den MSL-Zeitreihen der Pegel Brest und Delfzijl als die nicht korrigierte MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK. Für die nicht korrigierte MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK wurde hingegen ein positiver Trend ermittelt, dessen Größenordnung sich ebenfalls für die restlichen Pegelstandorte ergibt. Der Einfluss im Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 ist dabei wesentlich deutlicher als bei der Betrachtung des Gesamtzeitraums von 1855 bis 2011 (vgl. Kap. 5.1) und sorgt sogar für einen Vorzeichenwechsel von positiven zu negativen Trends, wenn die Korrekturen angebracht werden.

5.4 Korrelationsanalysen

Wie schon bei den Trendanalysen wurden bei den Korrelationsanalysen nur solche Pegel verwendet, deren Datenlücken im Zeitraum von 1855 bis 1900 kleiner als 25% sind (vgl. Tab. 3). Zudem wurden die zugrunde gelegten MSL-Zeitreihen vor der Auswertung um den jeweiligen linearen Trend korrigiert. Im Falle der MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK erfolgte dieser Schritt erst nach dem Anbringen der Korrektur.

Tab. 6 und Abb. 11 fassen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen zusammen und zeigen auf, ob eine signifikante Korrelation auf dem 95%-Signifikanzniveau zwischen den Referenzpegeln und den MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK und Cuxhaven mK nachgewiesen werden kann.

Tabelle 6: Ergebnisse der Korrelationsanalysen für die 18 Vergleichspegel und Cuxhaven oK sowie Cuxhaven mK auf dem 95%-Signifikanzniveau mit Angabe des Korrelationskoeffizienten (grau hinterlegte Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt).

Pegel	Signifikante Korrelation zu Cuxhaven oK	Korrelationskoeff. zu Cuxhaven oK	Signifikante Korrelation zu Cuxhaven mK	Korrelationskoeff. zu Cuxhaven mK
Cuxhaven oK	j	1,00	j	0,80
Cuxhaven mK	j	0,80	j	1,00
Brest	n	0,09	n	0,29
Sheerness	n	0,06	n	0,11
Delfzijl	j	0,59	j	0,82
West Terschelling	j	0,70	j	0,71
Harlingen	j	0,66	j	0,47
Den Helder	j	0,71	j	0,46
Ijmuiden	j	0,42	j	0,63
Hoek van Holland	j	0,45	n	0,31
Vlissingen	j	0,40	j	0,66
Pillau	j	0,51	j	0,36
Stolpmünde	j	0,50	j	0,39
Kolberg	j	0,49	n	0,26
Swinemünde	j	0,42	n	0,25
Barhöft	j	0,52	j	0,52
Warnemünde	j	0,57	j	0,48
Schleimünde	n	0,36	j	0,52
Travemünde	n	0,23	n	-0,06
Amsterdam	j	0,57	n	0,23
j = ja; n = nein				

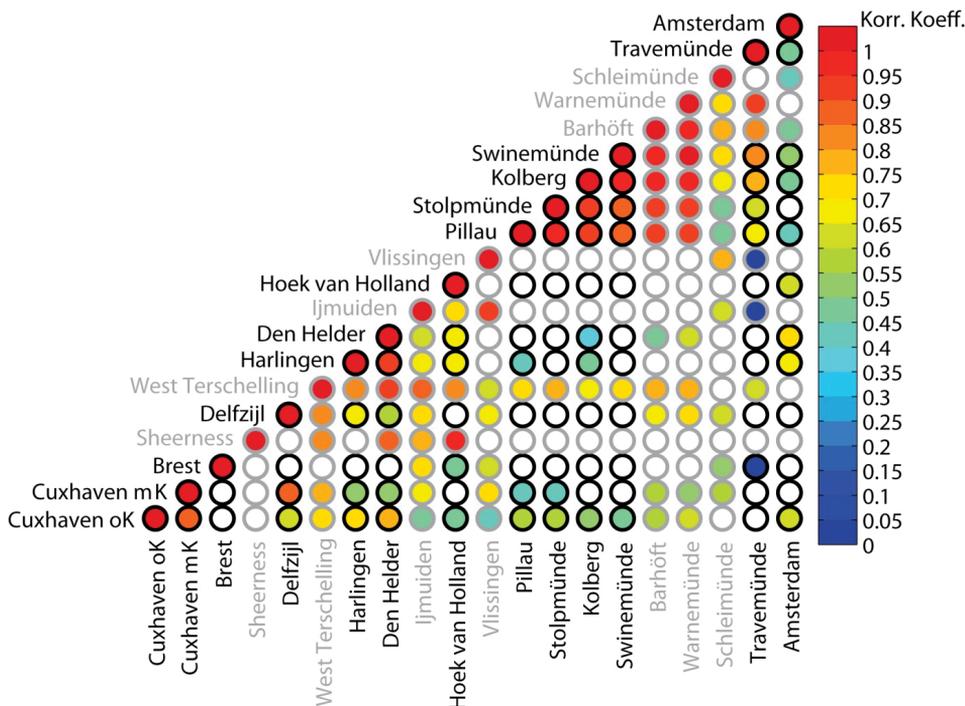


Abbildung 11: Korrelationen für den Zeitraum 1855 bis 1900 zwischen den MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK und mK mit den 18 Vergleichspegeln (grau beschriftete Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt; die Kreise werden farblich nicht ausgefüllt, wenn keine statistische Signifikanz auf dem 95%-Signifikanzniveau nachgewiesen wurde).

Es zeigt sich, dass die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK eine signifikante Korrelation zu 14 der insgesamt 18 ausgewählten Pegel aufweist. Werden nur diejenigen Pegel berücksichtigt, welche nach Tab. 6 als aussagekräftig identifiziert wurden, dann kann eine signifikante Korrelation mit 9 der 11 Vergleichspegel nachgewiesen werden. Die einzigen Ausnahmen stellen die Pegel Brest und Travemünde dar. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass im Fall von Brest ein solches Ergebnis bei den Korrelationsanalysen zu erwarten war, da bereits bekannt ist, dass die Pegel im Bereich des Englischen Kanals auf inter-annuellen Zeitskalen eher der Variabilität des Nord-Ost-Atlantik folgen, als der Variabilität in der inneren Nordsee (WAHL et al. 2013). Die stärkste Korrelation ergibt sich zwischen den MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK und Den Helder.

Werden zum Vergleich die MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK sowie die anderen Nord- und Ostseepegel herangezogen, so wird deutlich, dass die Korrelationen in vielen Fällen abnehmen. Eine signifikante Korrelation kann nur noch für 11 der 18 Pegel nachgewiesen werden. Bei reiner Betrachtung der Pegelstandorte ohne große Datenlücken und unsicherer Aufzeichnungen, sinkt die Anzahl der signifikanten Zusammenhänge schließlich auf 5 von 11 Vergleichspegeln. Die stärkste Korrelation ergibt sich in diesem Fall zwischen den Pegelstandorten Cuxhaven mK und Delfzijl.

Insgesamt bekräftigen auch die Korrelationsanalysen den bereits aus der visuellen Betrachtung sowie den Trendanalysen gewonnenen Eindruck, dass die MSL-Zeitreihe des

Pegels Cuxhaven oK eher zu den Vergleichspegeln passt und einen ähnlichen Verlauf aufweist. Es wird nicht nur der Trend, sondern aufgrund der zeitabhängigen Korrekturfunktion auch die Variabilität der Aufzeichnungen beeinflusst.

5.5 Kombination aus Trend- und Korrelationsanalysen

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der vorangegangenen Trend- und Korrelationsanalysen zusammengefasst werden. Dargestellt sind diese in Abb. 12. In einem ersten Schritt wurden dazu die GIA-Korrekturen an sämtliche betrachtete Pegel angebracht. Anschließend wurden die Trends für den Zeitraum von 1855 bis 1900 auf Basis der verfügbaren Daten für alle Vergleichspegel inklusive der 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Für die Berechnung der Trends wurden immer nur die Daten genutzt, die auch am Vergleichspegel verfügbar sind, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Aus diesem Grund ergeben sich sowohl für Cuxhaven oK als auch für Cuxhaven mK leicht unterschiedliche Trends, wenn die Vergleichspegel Datenlücken aufweisen (z. B. Brest, Harlingen, Hoek van Holland, Stolpmünde). Außerdem sind im Gegensatz zu den vorangegangenen Kapiteln nur die Ergebnisse für diejenigen Pegel dargestellt, die ausreichend Daten für den betrachteten Zeitraum zur Verfügung stellen ($> 75\%$ der Jahreswerte, vgl. Tab. 3). Zudem wurde der Pegel Vlissingen aufgrund der Vermutung der fehlerbehafteten Werte im 19. Jahrhundert nicht mehr aufgeführt (vgl. Kap. 5.3). Zusätzlich fließen in diesem Kapitel die Resultate der durchgeführten Korrelationsanalysen mit ein.

Die Ergebnisse für die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK zeigen, dass die ermittelten Trends für 9 der 11 Vergleichspegel nicht signifikant unterschiedlich sind, d. h. der Trend von Cuxhaven oK liegt innerhalb des 95%-Konfidenzintervalls des Vergleichspegels. Die Ausnahmen stellen die Pegel Brest und Delfzijl dar. Ähnlich verhält es sich mit den signifikanten Korrelationen. Nicht signifikante Beziehungen bestehen hier ebenfalls nur zwischen Brest und zusätzlich zu Travemünde. Werden demnach nur die Vergleichspegel betrachtet, für die eine signifikante Korrelation nachgewiesen wurde, passen die ermittelten Trends in 8 der 9 Fälle gut zusammen.

Die Ergebnisse für die MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK lassen gegensätzliche Schlussfolgerungen zu. Nach der Korrektur der MSL-Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven mit den Werten aus SIEFERT und LASSEN (1985) weist nur noch 1 der 11 Vergleichspegel keinen signifikant unterschiedlichen Trend auf. Anders formuliert bedeutet das, dass der Trend der MSL-Zeitreihe von Cuxhaven mK nur gut zu 1 der 11 Vergleichspegel passt. Dabei handelt es sich um den Pegel Delfzijl. Ebenfalls bedeutet das, dass in 4 von 5 Fällen die Trends signifikant unterschiedlich sind, wenn nur die Vergleichspegel betrachtet werden, für die eine signifikante Korrelation zu Cuxhaven mK ermittelt werden konnte. Allerdings ergeben sich durch die Korrektur grundsätzlich niedrigere Trends als für die Vergleichspegel.

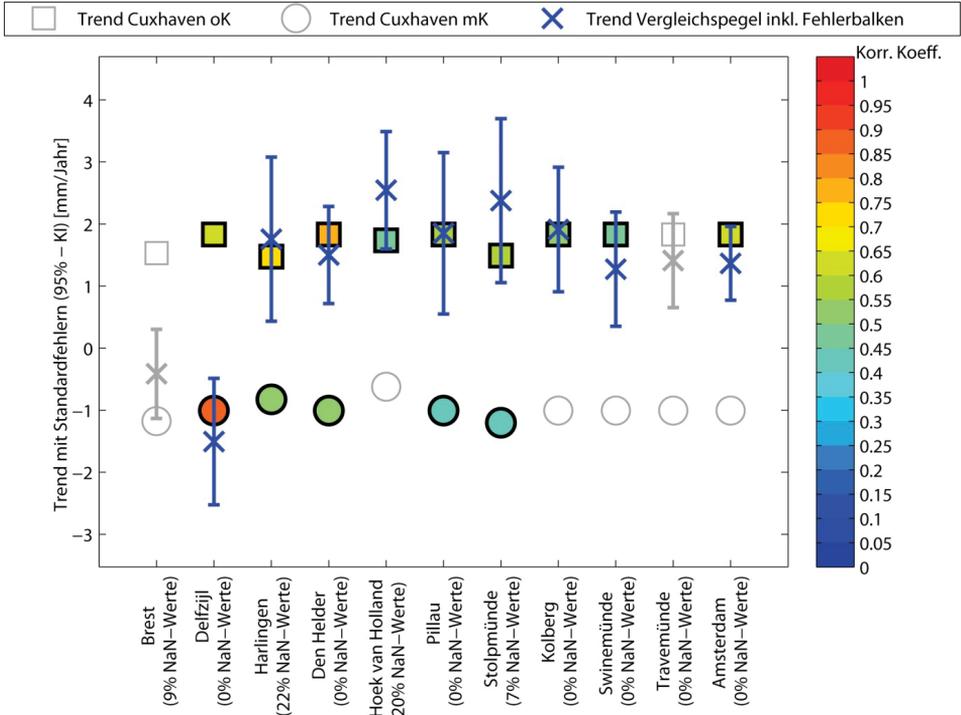


Abbildung 12: Vergleich der linearen Trends für den Zeitraum 1855 bis 1900 der MSL-Zeitreihe von Cuxhaven oK und mK mit weiteren langen Nord- und Ostseepegel unter Angabe des Korrelationskoeffizienten. Die zum Vergleich herangezogenen Nord- und Ostseepegel weisen Datenlücken < 25% auf und es besteht keine Vermutung hinsichtlich einer Fehlerbehaftung der Datensätze. Kreuze symbolisieren den Trend der Vergleichspegel inkl. Fehlerbalken (blau: signifikante Korrelation zu Cuxhaven oK oder mK, grau: keine signifikante Korrelation). Die Trends der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK sind als Quadrate, die der MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK sind als Kreise dargestellt. Die Einfärbung beschreibt den Wert des Korrelationskoeffizienten. Es wird keine Einfärbung vorgenommen, wenn keine statistische Signifikanz auf dem 95%-Signifikanzniveau nachgewiesen wurde.

In diesem Kapitel wurden die Zweifel an der Plausibilität einer Korrektur der Wasserstandszeitreihe vom Pegel Cuxhaven weiter begründet. Die Ergebnisse der Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel haben dies bereits bestätigt und wurden hier zusammenfassend dargestellt.

5.6 Bewertung der Ergebnisse

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Analysen, dass die Korrektur nach SIEFERT und LASSEN (1985) nicht nur den langfristigen Trend sowie den Trend im Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 der Cuxhaven-Zeitreihe beeinflusst, sondern aufgrund der zeitabhängigen Korrekturfunktion auch die Variabilität. Zum Vergleich wurden 18 Vergleichspegel herangezogen, die nach Prüfung auf unsichere oder zu geringer Datengrundlage auf 11 Pegel reduziert wurden. Ohne die Korrektur kann ein signifikanter Zusammenhang zu 9 von 11 Vergleichspegeln nachgewiesen werden. Nach Anbringen

der Korrektur gilt dies nur noch für 5 der 11 Vergleichspegel. Wie Abb. 10 zeigt, beeinflusst die Korrektur im Wesentlichen den Trend der MSL-Zeitreihe von Cuxhaven in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Daher können die hier durchgeführten Korrelationsuntersuchungen zwar erste Hinweise zur Plausibilität der Korrekturfunktion liefern, allerdings gestalten sich die Ergebnisse der Trenduntersuchungen in diesem Zusammenhang deutlich aussagekräftiger. Es hat sich gezeigt, dass in 8 der 9 Fälle, in welchen eine signifikante Korrelation zwischen den Vergleichspegeln und der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK nachgewiesen wurde, die ermittelten Trends nicht signifikant unterschiedlich sind. Während dies bei der Untersuchung der MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK lediglich auf 1 der 5 Fälle zutrifft.

Die hier dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass es mithilfe analytischer Verfahren unter Einbeziehung einer großen Anzahl von Vergleichspegeln nicht möglich ist, die Plausibilität der von SIEFERT und LASSEN (1985) vorgeschlagenen Korrekturfunktion für den Pegel Cuxhaven zu bestätigen. Vielmehr zeigen die Untersuchungen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK, wie sie z. B. im Projekt AMSeL (JENSEN et al. 2011b) genutzt wurde, und einer Vielzahl der ausgewählten Vergleichspegel. Insgesamt können die hier dargestellten und diskutierten Ergebnisse nur zu der Empfehlung führen, auf das Anbringen einer Korrekturfunktion an die Wasserstandsdaten des Pegels Cuxhaven aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu verzichten. Ebenfalls ist zu empfehlen, weitere Untersuchungen anzustellen, um herauszufinden, warum eine Korrektur nur mit dem Pegel Delfzijl (und evtl. Brest) zu einer besseren Übereinstimmung führt. Zudem wäre zu prüfen, ob die Zeitreihen der Pegel Vlissingen und Ijmuiden im Rahmen einer neuen Beurteilung der Zeitreihen vor 1900 ebenfalls korrigiert bzw. homogenisiert werden müssten (vgl. WAHL et al. 2013). Zudem sollten weitere Zeitreihen des Pegels Cuxhaven sowie der Vergleichspegel in die Betrachtungen einbezogen werden. Bis dato basieren die durchgeführten Untersuchungen lediglich auf MSL-Jahreswerten. Die Pegelaufzeichnungen von Cuxhaven sind allerdings auch wichtig zur Analyse der Langzeitentwicklung von Sturmfluten (vgl. DANGENDORF et al. 2014a).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es aufgrund der historischen und aktuellen Bedeutung der MSL-Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven für die Nutzung in Wissenschaft und Praxis von großer Bedeutung ist, dass alle Nutzer mit ein und derselben Zeitreihe, insbesondere was den Höhenbezug angeht, arbeiten und der Zugriff darauf garantiert wird. Aufgrund dieser Tatsache ist größte Vorsicht geboten, wenn eine weitreichende Empfehlung wie im vorliegenden Fall zur Änderung der Wasserstandsdaten des Pegels Cuxhaven aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ausgesprochen werden soll. Allerdings lassen die gewonnen Erkenntnisse derzeit nur den Schluss zu, dass auf die Korrektur nach SIEFERT und LASSEN (1985) zu verzichten ist, bis ggf. zukünftige oder weitergehende Untersuchungen zu anderen Resultaten kommen und die hier beschriebenen Erkenntnisse widerlegen. Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick sowie der Bedarf an zukünftigen Untersuchungen im folgenden Kapitel zusammengeführt.

6 Schlussfolgerung

Auf Basis der hier vorgestellten und diskutierten Ergebnisse, ergibt sich ein differenziertes Bild, was die Plausibilität bzw. Notwendigkeit einer Korrektur der Wasserstandszeitreihe

von Cuxhaven angeht. Im Folgenden sollen daher zusammenfassend die Gründe, welche für eine Korrektur sprechen, denjenigen gegenübergestellt werden, die gegen eine Korrektur sprechen. Außerdem wird noch der Bedarf an möglichen zukünftigen Untersuchungen diskutiert.

6.1 Gründe für eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven

- SIEFERT und LASSEN (1985) empfehlen nach der Auswertung der Ergebnisse diverser historischer Nivellements das Anbringen der in Abb. 3 dargestellten Korrekturfunktion zum Ausgleich von Setzungserscheinungen des Leuchtturms Cuxhaven.
- Durch Anbringen der Korrekturfunktion passt die MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven mK besser zu der MSL-Zeitreihe des Pegels Delfzijl (signifikante Korrelation und nicht signifikant unterschiedlicher Trend).

6.2 Gründe gegen eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven

- Einen wichtigen Stützpunkt in der von SIEFERT und LASSEN (1985) vorgeschlagenen Korrekturfunktion stellt das Ergebnis eines Nivellements von Lentz im Jahre 1855 dar. Lassen selbst schreibt in seiner Veröffentlichung (LASSEN et al. 1984) zu durchgeführten Untersuchungen von Lentz, dass „...*sich ein Sinken des Leuchtturms weder aus Wasserständen noch aus Nivellements nachweisen lässt. Lentz vermutet sogar einen Fehler in seinem Nivellement von 1855 kurz vor Cuxhaven...*“. Somit muss zumindest der wichtige Stützpunkt der Korrekturfunktion aus dem Jahre 1855 angezweifelt werden, aus welchem sich eine sehr starke Korrektur für den Zeitraum 1855 bis 1875 ergibt.
- Sowohl LASSEN et al. (1984) als auch SIEFERT und LASSEN (1985) geben wenig Erläuterungen zu der ermittelten Korrekturfunktion. Es ist nicht ersichtlich, wie die Ergebnisse historischer Nivellements auf das heutige Höhensystem umgerechnet wurden und welche Unsicherheiten sich dabei ergeben. Die vorgestellten Ergebnisse in Form der Korrekturfunktion sind auf Basis der verfügbaren Informationen nicht reproduzierbar.
- Trenduntersuchungen unter Berücksichtigung von 11 Vergleichspegeln zeigen, dass die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK gut zu 9 der 11 Vergleichspegel passt (d. h. es zeigen sich keine signifikant unterschiedlichen Trends für den Zeitraum 1855 bis 1900). Nach der Korrektur (Cuxhaven mK) gilt dies nur noch für 1 der 11 Vergleichspegel, während sich für die anderen 10 Pegel deutlich niedrigere Trends in Cuxhaven ergeben. Sowohl der langfristige Trend als auch der Trend für den Zeitraum von 1855 bis 1900 werden also durch das Anbringen der Korrektur deutlich reduziert. Speziell für den Zeitraum von 1855 bis 1900 stellt sich ein Vorzeichenwechsel von einer positiven zu einer negativen Trendentwicklung ein.
- Korrelationsuntersuchungen durch Einbeziehung von 11 Vergleichspegeln zeigen, dass die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK einen signifikanten Zusammenhang zu 9 der 11 Vergleichspegel aufweist. Nach der Korrektur (Cuxhaven mK) gilt dies nur noch für 5 der 11 Vergleichspegel.

6.3 Ausblick

Die Kenntnis der historischen Wasserstandsentwicklung im 19. Jahrhundert (regional und global) ist sowohl für wissenschaftliche als auch praktische Fragestellungen (z. B. für den Küstenschutz) von größter Bedeutung. Dazu sollten in einem ersten Schritt alle noch verfügbaren analogen Wasserstandsaufzeichnungen, d. h. die Pegelbögen von möglichst allen jemals betriebenen Pegelstandorten, gescannt und digitalisiert und somit für die Zukunft gesichert werden. In einem nächsten Schritt können diese Daten dann plausibilisiert, ggf. korrigiert und in ein einheitliches Bezugssystem eingebunden werden und anschließend entsprechenden Analysen zugeführt werden.

- Es besteht somit ein dringlicher Digitalisierungsbedarf historischer Wasserstandsaufzeichnungen als Grundlage für weitere Untersuchungen, z. B. auf Basis anderer Zeitreihen als von MSL-Jahreswerten. Bereits im Abschlussbericht des AMSeL-Projektes (JENSEN et al. 2011b) wurde darauf hingewiesen, dass dadurch vergleichende Untersuchungen zur Meeresspiegelentwicklung zum Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts durchgeführt werden können. Ebenso sollten die Vergleichspegel (z. B. Pegel Vlissingen und Ijmuiden) auf Korrektur- bzw. Homogenisierungsbedarf geprüft werden (vgl. WAHL et al. 2013). Darüber hinaus gilt es zu prüfen, warum z. B. die Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Delfzijl besser zur MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK passen.
- Die Genauigkeit und Unsicherheit der GIA-Korrekturwerte ist zu prüfen, da diese einen erheblichen Einfluss auf die durchgeführten Untersuchungen haben. In JEVREJEVA et al. (2014) zeigen die mit verschiedenen Modellen ermittelten Trends beispielsweise in der Nordsee Abweichungen von mehreren Millimetern pro Jahr.
- Wie in Kap. 4 bereits angesprochen, wurden in der aktuellen Analyse aufgrund fehlender Datengrundlage einzig jene Landsenkungen berücksichtigt, die auf postglaziale Effekte zurückzuführen sind. Lokale Krustenbewegungen (SUDAU und WEISS 2011), die beispielsweise mit Grundwasserentnahmen etc. in Verbindung stehen, bleiben daher unberücksichtigt. Da diese regional z. T. stark variieren, können sie die vorgestellten Ergebnisse beeinflussen. Derzeit wird die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit von vertikalen Landbewegungsschätzern (z. B. aus GPS und Tidepegel-Satellitenaltimetrie) stetig erweitert und somit robuster (vgl. WÖPPELMANN und MARCOS 2016; SANTAMARÍA-GÓMEZ et al. 2017). Ähnliches gilt auch für die Anteile aus atmosphärischen Schwankungen, die zumindest über den Zeitraum 1900–2011 in der Nordsee für regionale Differenzen gesorgt haben (DANGENDORF et al. 2014b). Weitere Erkenntnisse könnten hier unter Berücksichtigung historischer Wind- (z. B. ICOADS) und Luftdruckdaten (Hadley SLP) gewonnen werden (s. a. DANGENDORF et al. 2014a, 2014b).
- Das Verhalten des Pegels Brest und dessen Vergleichbarkeit mit dem Pegel Cuxhaven ist zu überprüfen. DANGENDORF et al. (2014a) zeigen, dass dekadische Wasserstandsschwankungen am Pegel Brest zur Charakteristik der Nordseepegel passen.
- Hauptkomponentenanalysen (EOF) können zur Findung des gemeinsamen dekadischen bis multidekadischen Signals in der Nordsee verwendet werden.
- Durch das (Nicht-)Anbringen der Korrektur besteht ein erheblicher Einfluss auf einen etwaigen Tipping-Point (GEHRELS und WOODWORTH 2013), der z. B. von

HOFSTEDE (1990) in Deutschland zum Ende des 19. Jahrhunderts vermutet wird. Weitere Untersuchungen, z. B. mit (Reanalyse-)Daten und Verfahren zur Varianzreduktion (DANGENDORF et al. 2014b) sind zu empfehlen.

7 Schriftenverzeichnis

- ALBRECHT, F.; WAHL, T.; JENSEN, J. and WEISSE, R.: Determining Sea Level Change in the German Bight, *Ocean Dynamics*, 61, 2037–2050, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10236-011-0462-z>
- CHURCH, J.A. and WHITE, N.J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, 2006.
<http://dx.doi.org/10.1029/2005GL024826>
- DANGENDORF, S.; WAHL, T.; HEIN, H.; JENSEN, J.; MAI, S. and MUDERSBACH, C.: Mean Sea Level Variability and Influence of the North Atlantic Oscillation on Long-Term Trends in the German Bight, *Water*, 4/2012, 170–195, 2012.
<http://dx.doi.org/10.3390/w4010170>
- DANGENDORF, S.; MUDERSBACH, C.; WAHL, T. and JENSEN, J.: Characteristics of intra-, inter-annual and decadal sea level variability and the role of meteorological forcing: The long record of Cuxhaven, *Ocean Dynamics* 63 (2–3), doi: 10.1007/s10236-013-0598-0, 2013.
- DANGENDORF, S.; MÜLLER-NAVARRA, S.; JENSEN, J.; SCHENK, F.; WAHL, T. and WEISSE, R.: North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843, *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00427.1, 2014a.
- DANGENDORF, S.; CALAFAT, F.M.; ARNS, A.; HAIGH, I. D.; WAHL, T. and JENSEN, J.: North Sea mean sea level variability: processes and implications, *Journal of Geophysical Research*, 119, 6820–6841, doi: 10.1002/2014JC009901, 2014b.
- GEHRELS, R. and WOODWORTH, P.L.: When did modern rates of sea-level rise start?, *Global and Planetary Change*, Volume 100, 263–277, ISSN 0921-8181, doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.020, 2013.
- HAHN, A. und RIETSCHEL, E.: Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee, VI Baltische Hydrologische Konferenz, Hauptbericht 13, 1938.
- HOFSTEDE, J.L.A.: Sea-level rise in the inner German Bight since AD 600 and its implications upon tidal flats geomorphology. In BRÜCKNER, H. and RADTKE, U. (Hrsg.): From the North Sea to the Indian Ocean – results of the 8th annual meeting of the working group “Marine and Coastal Geography”, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 11–27, 1990.
- HOLGATE, S.J. and WOODWORTH, P.L.: Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s, *Geophysical Research Letters*, 31, L07305, 2004.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste, *Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig*, Heft 83, 441–550, 1984.
- JENSEN, J. und TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826, *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 30. Jhg., Heft 4, 99–107, 1986.
- JENSEN, J.; MÜGGE, H.-E. und VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht, *Die Küste*, 47, 1988.

- JENSEN, J. und TÖPPE, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 34. Jhg., Heft 1/2, 29–37, 1990.
- JENSEN, J.; MÜGGE, H.-E. und SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht, Die Küste, 53, 1992.
- JENSEN, J.; FRANK, T.; WAHL, T. und DANGENDORF, S.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL), Abschlussbericht, Siegen, 2011a.
- JENSEN, J.; FRANK, T. und WAHL, T.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL), Die Küste, 78, 2011b.
- JEVREJEVA, S.; GRINSTED, A.; MOORE, J.C. and HOLGATE, S.: Nonlinear trends and multi-year 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.; GRINSTED, A.; MATTHEWS, A.P. and SPADA, G.: Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807, Global and Planetary Change, Volume 113, S. 11–22, 2014.
- LASSEN, H.; LINKE, G. und BRAASCH, G.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste, Zeitschrift für Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 2, 1984.
- MÜLLER-NAVARRA, S.; JENSEN, J.; ROSENHAGEN, G. und DANGENDORF, S.: Rekonstruktion von Gezeiten und Windstau am Pegel Cuxhaven 1843 bis 2013, Jubiläumskolloquium 200 Jahre Klimamessstation Jena, 2013.
- NICHOLLS, R.J.: Impacts of and Responses to Sea-Level Rise, In: CHURCH, J.A.; WOODWORTH, P.L.; AARUP, T. and WILSON W.S. (Hrsg.): Understanding Sea-Level Rise and Variability, Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 17–51, doi: 10.1002/9781444323276.ch5, 2010.
- OUMERACI, H.; JENSEN, J.; GÖNNERT, G.; PASCHE, E.; KORTENHAUS, A.; NAULIN, M.; WAHL, T.; THUMM, S.; UJEYL, G.; GERSHOVICH, I. and BURZEL, A.: Flood Risk Analysis for a Megacity: The German XtremRisk-Project, European and Global Communities combine forces on Flood Resilient Cities, Paris, France, 2009.
- OUMERACI, H.; GÖNNERT, G.; JENSEN, J.; KORTENHAUS, A.; FRÖHLE, P.; GERKENSMEIER, B.; WAHL, T.; MUDERSBACH, C.; NAULIN, M.; UJEYL, G.; PASCHE, E.; DASSANAYAKE, D.R. und BURZEL, A.: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten – Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel (XtremRisk), Abschlussbericht, 2012.
https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/hyku-xr/50_oumeraci_et_al_xtremrisk_abschlussbericht.pdf
- 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, 2004.
- SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; GRAVELLE, M.; DANGENDORF, S.; MARCOS, M.; SPADA, G. and WÖPPELMANN, G.: Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical

- land motion errors, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 473, 24–32, ISSN 0012-821X, doi: 10.1016/j.epsl.2017.05.038, 2017.
- SCHÖNE, T.; SCHÖN, N. and THALLER, D.: IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): scientific benefits, *Journal of Geodesy*, 83, 249–261, 2009.
- SIEFERT, W. und LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen, *Die Küste*, 42, 1985.
- STEFFEN, H. and WU, P.: Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia – A review of data and modeling, *Journal of Geodynamics*, 52, doi: 10.1016/j.jog.2011.03.002, 2011.
- SUDAU, A. und WEISS, R.: Der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf langwellige Wasserstandsbeobachtungen, *Mitteilungen des IWW – 40. IWASA, Internationales Wasserbausymposium Aachen*, 2011.
- 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, 2010.
- WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN J.: Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas: A stochastic storm surge model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 2925–2939, doi: 10.5194/nhess-11-2925-2011, 2011.
- WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN J.: Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas: A multivariate statistical approach based on Copula functions, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 495–510, doi: 10.5194/nhess-12-495-2012, 2012.
- WAHL, T.; HAIGH, I.D.; WOODWORTH, P.L.; ALBRECHT, F.; DILLINGH, D.; JENSEN, J.; NICHOLLS, R.J.; WEISSE, R. and WÖPPELMANN, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, *Earth-Science Reviews*, 124 (2013), 51–67, 2013.
- WANNINGER, L.; NIEMEYER, W.; JAHN, C.H. und SUDAU, A.: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS), *Abschlussbericht, Dresden, KFKI Projekt 03KIS055-058*, 2008.
- WEISS, R. und SUDAU, A.: Satellitengestützte Überwachung der Pegelnullpunkthöhe in der Deutschen Bucht, *Die Küste*, 78, 2011.
- 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.
- WÖPPELMANN, G. and MARCOS, M.: Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, *Rev. Geophys.*, 54, 64–92, doi: 10.1002/2015RG000502, 2016.
- 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.; 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.
- WEB 1: Stand: 28.05.2014. www.sonel.org/squelettes/mareg/index.php?a=gw&img=cux_1_2510.jpg