

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Jensen, Jürgen

Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland - Teil 1: Deutsche Nordseeküste

Hydrographische Nachrichten

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107818>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Jensen, Jürgen (2020): Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland - Teil 1: Deutsche Nordseeküste. In: Hydrographische Nachrichten 115. Rostock: Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V.. S. 18-26. <https://doi.org/10.23784/HN115-03>.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Retrospektive der Meeresspiegel- forschung in Deutschland

Teil 1: Deutsche Nordseeküste

Ein Beitrag von JÜRGEN JENSEN

In diesem Beitrag werden die beobachteten Meeresspiegeländerungen auf Grundlage von pegelbasierten Wasserstandsmessungen an der deutschen Nordseeküste seit dem 18. Jahrhundert dargestellt. Die Auswertungen der Wasserstandszeitreihen der untersuchten Pegel sind dabei als Diagnose der bisherigen Meeresspiegelentwicklung zu verstehen. Die Wasserstandsmessungen werden mit Pegeln relativ zum Landniveau aufgezeichnet, erst in den letzten Jahren können daraus absolute (um vertikale Landbewegungen bereinigte) Meeresspiegeländerungen abgeleitet werden.

Meeresspiegel | MSL | Nordsee | Sturmfluten | Tidewasserstände | Gezeiten | Tidehub
sea level | MSL | North Sea | storm surges | tidal water levels | tides | tidal range

This paper presents the observed sea level changes based on level-based water level measurements on the German North Sea coast since the 18th century. The evaluation of the water level time series of the investigated gauges is to be understood as a diagnosis of the sea level development to date. The water level measurements are recorded with gauges relative to the land level. It is only in recent years that absolute sea level changes (adjusted for vertical land movements) can be derived from these measurements.

Autor

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen hat am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen den Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau inne.

juergen.jensen@uni-siegen.de

Der zweite Teil des Beitrags beschäftigt sich mit dem Meeresspiegel an der deutschen Ostseeküste; er erscheint in einer der nächsten Ausgaben.

1 Einleitung und Definitionen

Diskussionen über die Folgen des Klimawandels, wie z. B. den Meeresspiegelanstieg und die entsprechenden Anpassungsstrategien, dominieren derzeit das gesellschaftliche Leben. Der Anstieg des Meeresspiegels stellt in Superposition mit Extremereignissen, wie z. B. Sturmfluten, die größte Herausforderung dar. Der Schutz der Küste und die Bemessung von Küstenschutzbauwerken ist damit unmittelbar von der Entwicklung des Meeresspiegels abhängig und robuste Abschätzungen des zukünftigen Meeresspiegels sind damit von größter Bedeutung.

Seit der letzten Eiszeit ist der Wasserstand in der Nordsee mit Transgressions- und Regressionsphasen, insbesondere infolge postglazialer Krustenbewegungen bzw. des GIA-Effektes (englisch: glacial isostatic adjustment) deutlich angestiegen. In den letzten 7000 Jahren ist der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee um 6 bis 7 m mit regionalen Unterschieden gestiegen (Vink et al. 2007; Baeteman et al. 2011; Bungenstock und Weerts 2010; Behre 2003, 2007). Es kann dabei nicht von einem kontinuierlichen Anstieg des Meeresspiegels ausgegangen werden; heute ist der Meeresspiegel in der Deutschen Bucht etwa 1 m höher als vor 1000 Jahren (z. B. Behre 2003; Meier 2007).

Die Nordsee ist als flaches Randmeer des Nordatlantiks mit den weltweiten Ozeanen verbunden und deren Meeresspiegeländerungen wie z. B. den globalen bzw. weltweiten Meeresspiegel-

schwankungen ausgesetzt (vgl. Gregory et al. 2019). Die tiefliegenden Nordseeküsten mit ihren Inseln und Halligen werden durch einen postglazialen Meeresspiegelanstieg, zugehörige isostatische Krustenbewegungen und extreme Sturmfluten seit Jahrhunderten geprägt (z. B. Woebcken 1924). Die Deiche und Küstenschutzbauwerke wurden als Reaktion auf katastrophale Sturmfluten und steigende Wasserstände über die vergangenen mehr als 1000 Jahre stetig angepasst (z. B. Peters 1929; Kramer 1989). Durch den anthropogenen Klimawandel und den damit verbundenen Meeresspiegelanstieg steht der Küstenschutz zukünftig vor weiteren großen Herausforderungen.

Dabei ist der Anstieg des Meeresspiegels eine Folge der natürlichen Klimaänderungen und des anthropogenen Klimawandels, z. B. aufgrund der Volumenausdehnung des Wassers durch steigende Temperaturen (verursacht z. B. durch CO₂-Emissionen) und wegen des Masseneintrags aufgrund des Abschmelzens landgebundener Eismassen (Gletscher, Grönland oder Antarktis). Dazu führen Landsenkungen und -hebungen sowie insbesondere Ozeanzirkulationen und atmosphärische Strömungen zu regionalen Veränderungen des Meeresspiegels. Dem absoluten (früher häufig eustatischen), das heißt sich global ändernden Meeresspiegel steht der sogenannte relative Meeresspiegel gegenüber, der sich auf Meeresspiegeländerungen in regionalem oder lokalem Maßstab

relativ zum Landniveau bezieht. Insofern ist die vertikale Landbewegung der Küsten zu berücksichtigen. Dabei sind zwei verschiedene Prozesse zu unterscheiden: zum einen der sogenannte GIA-Effekt (z. B. Peltier 2004; Peltier et al. 2015), zum anderen lokale Senkungs- oder Hebungerscheinungen, die z. B. aus Gas- oder Grundwasserentnahmen bis hin zu Bauwerkssetzungen resultieren. Insbesondere zu lokalen Senkungen und Hebungen liegen derzeit nur unzureichende Informationen vor. Die Separierung dieser Prozesse kann mit Hilfe globaler Positionsbestimmungssysteme (englisch: continuous global positioning system, CGPS) und mit geologischen Untersuchungen verbessert werden.

Die Analyse der bisherigen Wasserstandsentwicklung wird üblicherweise auf Basis von Pegelmessungen durchgeführt. Diese enthalten neben Massen- oder Dichteänderungen auch die vertikalen Landbewegungen. Dies ist hinsichtlich der Analyse klimatischer Anteile im mittleren Meeresspiegel (englisch: mean sea level, MSL) zu beachten, da die Landsenkungen in keinem Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel stehen. Um Fehlinterpretationen bei der Analyse der Pegelmessungen zu vermeiden, sollten deshalb die Anteile vertikaler Landbewegungen möglichst aus den Daten extrahiert werden.

Die Messungen der globalen Meeresspiegelhöhe bzw. der Meeresspiegeländerungen relativ zum Geoid mit Satelliten begann mit dem Start des Erdbeobachtungssatelliten »Topex/Poseidon« mit einer wissenschaftlich nutzbaren Präzision im August 1992 und wurde mit verschiedenen Satelliten fortgesetzt. Die längsten Satelliten-Messreihen reichen damit bis 1992 zurück und ermöglichen somit Aussagen zur absoluten Veränderung des globalen und regionalen Meeresspiegels, jedoch nur eingeschränkt bis an die Küsten. Für den Küstenschutz und das Überflutungsrisiko hinter einem Deich ist allerdings die relative Änderung der Wasserstände bzw. Sturmflutwasserstände (inklusive vertikaler Landbewegungen) von Bedeutung.

Die wichtigste Kenngröße zur Beschreibung der absoluten Meeresspiegeländerungen ist der MSL oder der globale mittlere Meeresspiegel (GMSL). Der MSL ist definiert als Mittelwert von Stundenwerten (oder höher aufgelöst) über den Zeitraum mindestens einer Nodaltide (Deklination des Mondes bzw. Neigung der Mondbahn zum Erdäquator mit einer Periode von 18,61 Jahren als längste relevante Gezeit) (vgl. Pugh und Woodworth 2014; Woodworth 2017). Mittelwerte über kürzere Zeiträume beinhalten Anteile der Nodaltide und führen zu Über- respektive Unterschätzungen des MSL; insbesondere Trenduntersuchungen sollten daher auf Grundlage vom Vielfachen der Nodaltide durchgeführt werden (z. B. Jensen et al. 1990, 1992). Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg und die Analyse der Tidewasserstände werden an den deutschen Küsten dementsprechend historisch auf Grundlage von 19-jähri-

gen (gleitenden) Mittelwerten durchgeführt. Bereits Lenz (1873) begründet die 19-jährige Mittelung korrekt mit der 18,61-jährigen Periode der Nodaltide und nutzt deshalb 19-jährige Mittel zur Beschreibung der Tidewasserstände. Er bezieht sich auf eine Arbeit des britischen Astronomen Lubbock (1836), der englische »Fluth tafeln« mit 19-jährigen Mittelwerten verbessern wollte (vgl. Bradley 1728). Bereits Paschen wertete 1868 in einer Untersuchung über die Hebung der deutschen Ostsee (Paschen 1869) Zeitreihen mit einer Länge von 19 Jahren aus; hier kann allerdings der Auswertzeitraum von 19 Jahren zufällig gewählt sein. Den Nachweis der Nodaltide in aufgezeichneten Tidehubzeitreihen auf Grundlage von Jahresmittelwerten an der deutschen und niederländischen Nordseeküste liefern Jensen et al. (1992), obwohl in vielen historischen Untersuchungen zur vermuteten Küstensenkung bzw. zum Meeresspiegelanstieg bereits 19-jährige Mittelwerte (z. B. mittleres Tidehochwasser, MThw) genutzt werden (z. B. Lenz 1873; Lüders 1936; Hensen 1938; Gaye 1951; Hundt 1955; Rohde 1977; Jensen et al. 1988).

Der MSL entspricht an der tidebeeinflussten Nordseeküste dem langjährigen mittleren Tidewasserstand (MTmw), möglichst über eine Nodaltide mit 18,61 Jahre gemittelt, und wird häufig vereinfachend aus dem Tidehalbwasser ($T_{\frac{1}{2}w}$), als arithmetisches Mittel von Tidehoch- und -niedrigwasser abgeschätzt (Abb. 1). Das MTmw bzw. der MSL ist als Referenzfläche sowohl absolut als auch relativ zum Festland zeitlichen Änderungen unterworfen.

Der MSL hat allerdings in der gezeitendominierten Nordsee keine Tradition; für das Küsteningenieurwesen werden das MThw und der mittlere Tidehub (MThb), für den Küstenschutz die höchsten Tidehochwasser (z. B. HThw) bzw. Sturmflutwasserstände und für die Belange der Schifffahrt das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw) und niedrigste Tideniedrigwasser (NTnw) als relevante Größe herangezogen. Der Tidehub (Thb) an der deutschen Nordseeküste reicht von knapp 2 m auf den Inseln über etwa 3,5 m an der Festlandküste bis über 4 m in den Tideästuaren.

2 Erfassung des Meeresspiegels über Pegelmessungen seit dem 18. Jahrhundert

Erste Messungen der Wasserstände, z. B. mit Latenpegeln, an der deutschen Nordseeküste und deren Auswertungen gehen bis in das 18. Jahrhundert zurück (Brahms 1754). Etwa von 1720 bis 1752 hat Brahms einen selbst konstruierten Pegel am Jadebusen südlich von Sande beobachtet. Ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts sind in Ostfriesland einzelne Pegel installiert worden, auch in Brunsbüttel ist 1781 ein Pegel eingerichtet worden. Seit 1784 wurden in Cuxhaven und seit 1786 in Hamburg schließlich regelmäßig Lattenpegel abgelesen (Rohde 1975, 1977). Einzelne beobachtete Wasserstände von historischen Sturmfluten

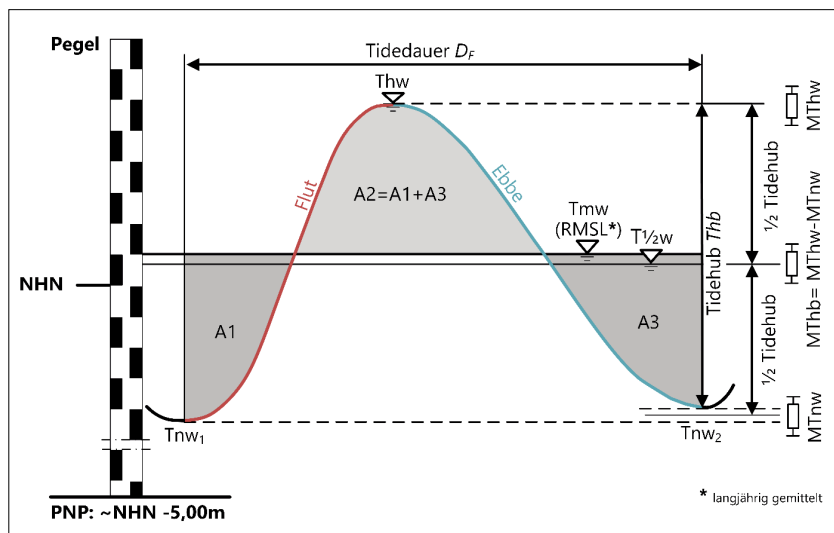


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Tidekurve

reichen deutlich weiter zurück; z. B. liegen von den Nordseesturmfluten 1634 und 1717 Wasserstandsbeobachtungen vor.

Die Wasserstände an den deutschen Küsten werden seit Beginn des 19. Jahrhunderts mit regelmäßigen Messungen an Schreibpegeln kontinuierlich erfasst, z. B. Swinemünde seit 1811, Travemünde seit 1823 und Cuxhaven seit 1843 (z. B. Hagen 1845; Rohde 1975; Jensen 1984; Jensen und Töppe 1986). Lokale Hebungen und Setzungen konnten bei entsprechenden Untersuchungen bis Ende des 20. Jahrhunderts nicht berücksichtigt werden. Insofern sind alle Untersuchungen zu Änderungen des Meeresspiegels und der Tidewasserstände bis zu aktuellen Untersuchungen relativ zum Landniveau durchgeführt worden.

Die Wasserstände werden relativ zum jeweiligen Pegelnullpunkt (PNP, aktuell etwa NHN –5 m) gemessen und weisen Messunsicherheiten im Zentimeterbereich auf. Die Bezugssysteme Normalnull (NN a. S. oder ab 1936 NN n. S.) oder aktuell Normalhöhennull (NHN) wurden in der Vergangenheit mehrfach überprüft und durch Hauptnivelements verbessert. Insofern bestehen auch kleine Unsicherheiten hinsichtlich der Vergleichbarkeit der auf NN oder auf NHN bezogenen Wasserstände.

Definitionen zu den relativen Tidewasserständen, dem Thb und dem relativen mittleren Meeresspiegel (RMSL) sowie die mittleren Tidekennwerte MTnw und MThw sind in Abb. 1 dargestellt. Alle Messungen und Angaben zu Tidewasserständen, wie Thw, Thb, $T_{1/2w}$ und Tmw bzw. MThw und MTnw, $MT_{1/2w}$ und MT_{mw} sind grundsätzlich relativ zum jeweiligen Landniveau zu verstehen.

Mittlerweile stehen für viele Pegel an der deutschen Nordseeküste einschließlich der Inseln und Halligen (Abb. 2) qualitativ hochwertige und hochaufgelöste Wasserstandszeitreihen für die Auswertung zur Verfügung (z. B. Jensen 1984; Jensen et al. 1992; Jensen et al. 2011; Wahl et al. 2011). Um-

fangreiche Pegeldaten werden auch von den Bundes- und Landesbehörden sowie den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern vorgehalten.

Einige MSL-Zeitreihen deutscher Pegelstandorte werden in der Online-Datenbank des Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), die durch das National Oceanography Centre in Liverpool unterhalten wird, vorgehalten. Die beim PSMSL verfügbaren MSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht basierten in der Vergangenheit auf Mittelwerten aus Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Diese approximierten MSL-Werte können ohne Korrektur, z. B. mit dem k-Wert-Verfahren (Lassen 1989), zum Teil signifikant von den tatsächlichen MSL, basierend auf höher auflösenden Zeitreihen, abweichen (Wahl et al. 2010, 2011; Jensen et al. 2011).

3 Untersuchungen zu Meeresspiegeländerungen und Tidewasserständen

Die Erforschung des Meeresspiegels und der Gezeiten (Tidewasserstände) sowie der Sturmfluten hat im Bereich der Nordsee eine sehr lange Tradition (Brahms 1754, 1757; vgl. Rohde 1975). Brahms hat erste systematische Tidebeobachtungen und Auswertungen der Häufigkeit bestimmter Wasserstände durchgeführt. Er empfahl unter anderem, die Deichhöhe regelmäßig im Vergleich zum mittleren Hochwasserstand zu überprüfen, und erkannte bereits Setzungs- und Landsenkungserscheinungen. Ohne das Phänomen Meeresspiegelanstieg zu kennen, hat er damit die Folgen des Meeresspiegelanstiegs für den Küstenschutz aufgezeigt.

Lentz (1873) untersucht mit einer erstaunlichen Detaillierung in der Veröffentlichung »Fluth und Ebbe des Meeres« die weltweiten Gezeiten sowie das Hoch- und Niedrigwasser in der Elbe. Er beschreibt nicht nur die halbtägigen Gezeiten, sondern auch die 18,61-jährige Nodaltide als auch den großen Sonnenzyklus mit etwa 20 800 Jahren. Die korrekte Mittelwertbildung über 18,61 bzw. 19 Jahre bei Jahreswerten ist damit offensichtlich in

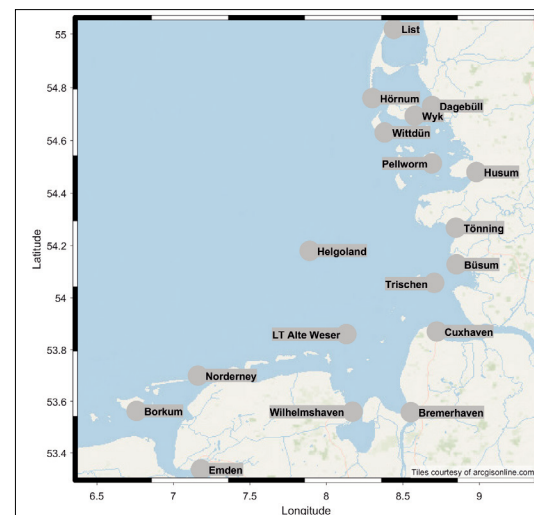


Abb. 2: Insel- und Festlandpegel an der deutschen Nordseeküste

Deutschland durch Lentz begründet. Lentz gibt auch erste Definitionen zur Ermittlung der M_{Thw} (vgl. Reinke 1787).

Schütte (1908) untersucht »Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste« und ermittelt eine langfristige Landsenkung auf Basis von geologischen und archäologischen Befunden sowie Auswertungen von M_{Thw}-Zeitreihen. Diskussionen zu Meeresspiegeländerungen reichen nach Schütte bis in die erste Hälfte des 18. Jahrhunderts zurück: »Seit dem wissenschaftlichen Streite der schwedischen Gelehrten Linne und Celsius über die Deutung der Niveauveränderungen des Bottnischen Meeres, den sie 1741 in akademischen Reden ausfochten, sind Strandverschiebungen an den nordeuropäischen Küsten immer wieder Gegenstand fachmännischer Untersuchungen und literarischer Erörterungen gewesen, ohne dass behauptet werden könnte, das Problem sei jetzt endgültig gelöst.« Schütte schätzt die Landsenkung mit Werten bis zu 50 cm in der Zeit von 1825 bis 1908 ab und kommt für Wilhelmshaven auf beachtliche M_{Thw}-Anstiegswerte von 13 mm/Jahr.

Krüger (1922) bestätigt die Aussagen von Schütte zur vermuteten Landsenkung über den relativen Anstieg der Wasserstände und formuliert dazu: »Diese Hebung des Wasserstands« – vermutlich am Pegel Wilhelmshaven – »ist eine Folge der Küstensenkung, der Betrag von 10 cm in 24 Jahren deckt sich mit dem von Schütte angenommenen Senkungsbetrag. (...) Der Senkungsbetrag ist mindestens 20 cm im Jahrhundert.«

Rietschel (1933) schließt »Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung« an; Rietschel kommt zu einem Anstieg der M_{Thw}-Zeitreihen von 1871 bis 1929 auf Grundlage von fünfjährigen Mittelwerten für die folgenden Pegel:

- Husum: 3,6 mm/Jahr,
- Tönning: 3,4 mm/Jahr,
- Cuxhaven: 3,1 mm/Jahr,
- Bremerhaven: 2,1 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven: 2,6 mm/Jahr.

Die beobachteten Meeresspiegeländerungen bzw. der -anstieg wurden bis in die 1930er Jahre überwiegend durch Landsenkungen begründet und erst mit Rietschel (1933) und Lüders (1936) in dem Beitrag »Über das Ansteigen der Wasserstände an der Deutschen Nordseeküste« wurde neben Landsenkungen auch ein Meeresspiegelanstieg sowie Änderungen im Gezeitenregime vermutet. Rietschel und Lüders beschreiben damit für die deutsche Nordseeküste neben tektonischen Relativbewegungen auch den Meeresspiegelanstieg, obwohl das Phänomen des eustatischen Meeresspiegelanstiegs bereits bekannt war (Maclaren 1842; Suess 1888); 1842 hat Maclaren bereits auf den Zusammenhang zwischen den weltweiten Eisvorräten und dem Meeresspiegel hingewiesen. Rietschel beschreibt weiterhin unterschiedliche Größenordnungen der Landbewegungen an den

Küsten der Schleswig-Holsteinischen und der Niedersächsischen Nordseeküste.

Krüger (1938) beschreibt in dem Beitrag »Die Küstensenkung an der Jade« wieder die Küstensenkung und gibt für den Pegel Wilhelmshaven für die 83 Jahre von 1854 bis 1936 einen M_{Thw}-Anstieg von 2,4 mm/Jahr, für das M_{Tnw} von 1,9 mm/Jahr und für das mittlere T_{1/2w} (Näherung für RMSL) 2,2 mm/Jahr an.

Hensen (1938) begründet in einer Studie »Über die Ursachen der Wasserstandshebung an der deutschen Nordseeküste« den relativen Anstieg auch wieder über eine vermutete Küstensenkung; er gibt für Cuxhaven einen Anstieg des M_{T1/2w} (Näherung für RMSL) der Zeitreihe von 1875 bis 1936 über 19-jährige Mittel von 3 mm/Jahr an; der entsprechende Anstieg des M_{Thw} ist danach etwas geringer.

Für die Ableitung von maßgebenden Sturmfluthöhen für die Deichbemessung an der schleswig-holsteinischen Westküste hat Hundt (1955) den Anstieg des M_{Thw} bzw. des Meeresspiegels für die Übertragung historischer Sturmfluten untersucht und über den Zeitraum bis 1953 einen mittleren M_{Thw}-Anstieg von 2,7 mm/Jahr ermittelt. Die Änderungen der Wasserstände begründet er mit lokalen baulichen und großräumigen Einwirkungen auf den Meeresspiegel bzw. die Gezeiten. Im Einzelnen gibt er folgende Werte auf Basis 19-jähriger Mittel der M_{Thw}-Zeitreihen an:

- Husum 1868 bis 1953: 3,1 mm/Jahr,
- Tönning 1867 bis 1953: 2,8 mm/Jahr,
- Büsum 1870 bis 1953: 2,1 mm/Jahr,
- Cuxhaven 1843 bis 1953: 2,7 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven 1854 bis 1950: 2,3 mm/Jahr.

Rohde (1964) ermittelt für die Pegel Tönning, Büsum und Husum, die seit 1867 als Lattenpegel betrieben wurden, auf Grundlage übergreifender 19-jähriger M_{Thw}, für den Zeitraum bis 1915/33 einen Anstieg von 3 mm/Jahr; danach schwächt sich der von Rohde ermittelte Trend ab. In Rohde (1977) sind die Untersuchungen zum säkularen Meeresspiegelanstieg seit dem Rückgang der Vereisung am Ende des Pleistozäns zusammengestellt (vgl. Rohde 1964, 1968). Rohde (1977) gibt einen Anstieg der 19-jährigen Mittel der M_{Thw} für die Pegel Emden, Cuxhaven, Büsum, Tönning, Husum und Dagebüll an; der M_{Thw}-Anstieg für die Zeitreihe bis etwa 1920 beträgt im Mittel etwa 3 mm/Jahr, der Anstieg schwächt sich nach 1920 ab. Zusammengefasst gibt Rohde für den Zeitraum ab Mitte des 16. Jahrhunderts bis 1975 einen mittleren Anstieg des M_{Thw} von anfänglich 3 mm/Jahr an, der sich seit dem 19. Jahrhundert auf 2,5 mm/Jahr abschwächt. Für den Pegel Cuxhaven ermittelte Rohde für die Zeitreihe von 1784 bis 1975 einen M_{Thw}-Trend von 2,3 mm/Jahr und für Dagebüll für die Zeitreihe von 1873 bis 1975 einen M_{Thw}-Trend von 3,1 mm/Jahr.

Liese (1979) untersucht die Tidewasserstandszeitreihen ab 1946 bis 1975 von neun Inselpegeln (Borkum, Norderney, Roter Sand/Alte Weser,

Helgoland, Trischen, Pellworm, Wittdün, Hörnum und List) sowie sechs Festlandpegeln (Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Büsum und Dagebüll). Für Dagebüll stellt er z. B. eine Tidehubzunahme für diesen Zeitraum von 26 cm in 20 Jahren fest (entspricht einem MThb-Trend von 13 mm/Jahr) und führt das auf örtliche Baumaßnahmen zurück; für die Gesamtbetrachtung schließt er deshalb den Pegel Dagebüll aus. Nach Liese steigt der Thb von 1946 bis 1975 mit etwa 5 mm/Jahr an der deutschen Nordseeküste. Für die jeweils im Monat Mai beobachteten Wasserstandszeitreihen identifiziert er einen Bruchpunkt im Jahr 1963/64 mit einem stärkeren Thw-Anstieg davor und einer Trendabschwächung nach 1964.

Jensen (1984) und Führböter und Jensen (1985) kommen mit Untersuchungen zur Änderung der Tidewasserstände und des Thb an der deutschen Nordseeküste auf Grundlage von Auswertungen langjähriger Zeitreihen an zehn Pegelstandorten zu folgenden Schlussfolgerungen: über die letzten 100 Jahre (bis 1983) hat sich der Anstieg des MThw beschleunigt, das MTnw hat sich nur unwesentlich verändert und der MThb hat deutlich zugenommen. Mit diesen Untersuchungen wird eine Beschleunigung des MThw bzw. des RMSL ermittelt. Führböter und Jensen (1985) geben für die deutsche Nordseeküste auf der Basis von hundertjährigen Zeitreihen von 1884 bis 1983 (zehn Pegel) Trends für das MThw von 2,5 mm/Jahr, für das MTnw keine Änderung und für den MThb von 2,2 mm/Jahr an. Für die 50 Jahre von 1934 bis 1983 wurden Trends für das MThw von 3,3 mm/Jahr, für das MTnw eine leichte Absenkung und für den MThb eine Zunahme von 3,5 mm/Jahr ermittelt (Jensen 1984). Für die kurze Zeitreihe von 1959 bis 1983 wird ein Anstieg des MThw von 6,4 mm/Jahr bzw. für den RMSL von 3,2 mm/Jahr ermittelt; diese Werte wurden damals äußerst kontrovers diskutiert und stießen aufgrund der hohen Anstiegswerte überwiegend auf Ablehnung (Lohrberg 1989). Insbesondere die ermittelte Zunahme des Thb hat für das Küstenvorfeld und den Küstenschutz weitreichende Konsequenzen (Führböter und Jensen 1985; vgl. Jensen et al. 2014).

Im Einzelnen werden bei Jensen (1984) folgende MTnw-/MThw-/MThb-/MT $\frac{1}{2}$ w-Trends z. B. für die Zeitreihen 1934 bis 1983 angegeben:

- List: -1,1 / 2,4 / 3,5 / 0,6 mm/Jahr,
- Husum: -0,6 / 3,6 / 4,3 / 1,5 mm/Jahr,
- Büsum: 0,2 / 2,9 / 2,7 / 1,5 mm/Jahr,
- Cuxhaven: -0,3 / 2,9 / 3,2 / 1,3 mm/Jahr,
- Bremerhaven: -2,7 / 3,6 / 6,3 / 0,5 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven: -0,9 / 3,4 / 4,3 / 1,2 mm/Jahr,
- Norderney: 0,8 / 1,6 / 0,8 / 1,2 mm/Jahr,
- Emden: 0,1 / 2,8 / 2,8 / 1,5 mm/Jahr,
- Borkum: 0,9 / 4,8 / 3,9 / 2,8 mm/Jahr.

Siefert und Lassen (1985) beschreiben die Wasserstandsverhältnisse und Tideeintrittszeiten in der Deutschen Bucht; in Lassen (1989) werden die örtlichen und zeitlichen Variationen des Meeres-

spiegels, abgeschätzt mit dem k-Wert-Verfahren, in der südöstlichen Nordsee dargestellt. Der Anstieg der MTnw als Approximation für den RMSL beträgt 1,5 mm/Jahr und zeigt danach keine erkennbare Beschleunigung (vgl. Siefert und Lassen 1991). Aus den Untersuchungen der Wasserstände des Pegels Cuxhaven werden lokale Bauwerkssetzungen im Bereich des Pegels bis zum Anfang des 20. Jahrhundert geschlossen und entsprechende Höhenkorrekturen der Wasserstandszeitreihen empfohlen.

Jensen et al. (1992) untersuchen im Rahmen eines KFKI-Projekts (vgl. Jensen et al. 1988) die Änderung der Gezeiten und der Wasserstände in der Deutschen Bucht anhand von Scheitelwasserständen (Tnw, Thw) und deren Eintrittszeiten. Damit wurden Aussagen zur Entwicklung der Ebbe- und Flutdauer sowie zu Tidelaufzeiten möglich. Für das Thw ist bei allen Pegeln ein Anstieg zu verzeichnen, der sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt hat. Das Tnw weist, nachdem es Anfang der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zunächst leicht absank, in den vergangenen Jahren bis Ende der 1980er Jahre ein stationäres Verhalten bzw. einen leicht positiven Trend auf; das führt nach 1950 zu einer Zunahme des Thb. Das T $\frac{1}{2}$ w zeigt demzufolge ein unterschiedliches Verhalten; es steigt in geringerem Maße als das Thw. Allerdings deuten die Auswertungen für den kurzen Zeitraum der letzten zwei Jahrzehnte bis 1991 an, dass zukünftig für das MTnw und das MThw und damit auch für das mittlere T $\frac{1}{2}$ w bzw. den MSL ein Anstieg erwartet werden kann. Die Nodaltide hat ein Maximum der Gezeitenkräfte in den Jahren 1978/79. Die Zeitdifferenzen zwischen dem Auftreten der Scheitelwasserstände und dem Monddurchgang durch den Nullmeridian weisen auf eine Reduzierung der Tidelaufzeiten hin. Für den Zeitraum der 100 Jahre bis 1991 ergibt sich als Mittelwert für die Deutsche Bucht ein Anstieg des MThw von 2,6 mm/Jahr; für das MTnw ergibt sich keine signifikante Änderung. Der Thb hat sich in dieser Zeit um 1,9 mm/Jahr und das mittlere T $\frac{1}{2}$ w um 1,7 mm/Jahr vergrößert. Über den Zeitraum einer Nodaltide bis 1991 ergibt sich für das mittlere T $\frac{1}{2}$ w ein Anstieg von 4 mm/Jahr und deutet gegenüber den längeren Zeitreihen auf eine Beschleunigung des Anstiegs hin.

Jensen et al. (2011) ermitteln auf Grundlage von RMSL-Zeitreihen lineare Trends für 1951 bis 2008:

- List: 2,4 mm/Jahr,
- Hörnum: 2,1 mm/Jahr,
- Wyk: 2,8 mm/Jahr,
- Dagebüll: 2,2 mm/Jahr,
- Wittdün: 2,6 mm/Jahr,
- Husum: 2,5 mm/Jahr,
- Helgoland: 2,1 mm/Jahr,
- Cuxhaven: 2,0 mm/Jahr,
- Bremerhaven: 1,0 mm/Jahr,
- Lt. Alte Weser: 1,7 mm/Jahr,
- Wilhelmshaven: 2,0 mm/Jahr,
- Norderney: 2,8 mm/Jahr,
- Emden: 1,3 mm/Jahr.

Für eine synthetische Zeitreihe Schleswig-Holsteins wird für den Zeitraum von 1937 bis 2008 ein RMSL-Anstieg von 2,2, für 1951 bis 2008 von 2,5 und für 1971 bis 2008 von 4,1 mm/Jahr ermittelt. Für eine synthetische Zeitreihe Niedersachsens ergibt sich für den Zeitraum von 1843 bis 2008 ein RMSL-Anstieg von 2,0, für 1901 bis 2008 von 1,7, für 1937 bis 2008 von 1,8 und für 1971 bis 2008 von 3,2 mm/Jahr. Die synthetische Zeitreihe Deutsche Bucht zeigt für den Zeitraum von 1843 bis 2008 einen RMSL-Anstieg von 2,0, für 1901 bis 2008 von 1,7, für 1937 bis 2008 von 2,0, für 1951 bis 2008 von 2,1 und für 1971 bis 2008 von 3,6 mm/Jahr. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird damit eine Beschleunigung des RMSL-Anstiegs in den letzten Jahrzehnten festgestellt.

Untersuchungen zu absoluten Änderungen des Meeresspiegels haben sich mit der Verfügbarkeit von Satellitenaltimetermessungen und Modellen zu postglazialen Landbewegungen ab Beginn der 1990er Jahre etabliert. Erste Untersuchungen zu absoluten MSL-Änderungen an der deutschen Nordseeküste wurden von Wahl et al. (2013) durchgeführt; Wahl et al. (2013) verglichen verschiedene methodische Ansätze zur Beschreibung der vertikalen Landbewegung mit den RMSL-Trends einzelner Pegel in der Nordsee. In Jensen et al. (2014) wird der Stand der Forschung zu Meeresspiegeländerungen in der Nordsee und ein vertieftes Prozessverständnis zusammengefasst. Seit Beginn der 2000er Jahre sind viele Untersuchungen zu Meeresspiegel- und Gezeitenänderungen und die dafür verantwortlichen Prozesse einschließlich Budgetierungsansätzen durchgeführt worden (z. B. Jensen und Mudersbach 2004; Wahl et al. 2011, 2013; Calafat et al. 2012; Dangendorf et al. 2013, 2014, 2019; Frederikse et al. 2016, 2018; Chafik et al. 2019). Auf geologischen Zeitskalen wird der MSL in der Nordsee vor allem von postglazialen Prozessen beeinflusst (vgl. Gönner et al. 2009).

Seit Beginn des 20. Jahrhundert ist demnach der RMSL um etwa 1,7 mm/Jahr in der Nordsee angestiegen. Während die Trends über das 20. Jahrhundert in etwa dem globalen Mittel gefolgt sind, zeigen sich auf intra-annualen bis dekadischen Zeitskalen Abweichungen. Neben den Änderungen im MSL zeigt sich seit Mitte der 1950er Jahre ein deutlicher Anstieg des Thb. Auch die Trends in den Extremwasserständen sind deutlich ausgeprägter als der Trend des RMSL (Mudersbach et al. 2013; vgl. Arns et al. 2015, 2017). Eine aktuelle Übersicht zum Thema MSL-Anstieg in der Nordsee findet sich in Huthnance et al. (2016) oder Weiss und Meinke (2017).

Untersuchungen zum Einfluss von vertikalen Landbewegungen auf die Pegelmessungen Ende des 19. Jahrhunderts in Cuxhaven haben Niehüser et al. (2016) durchgeführt; sie zeigten, dass Rückschlüsse auf den Anstieg des MSL auf lokaler Ebene gezogen werden können. Konkret wurde über-

prüft, 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. Für die Zeit zwischen 1855 und 2011 wurde ein Trend des MSL von 2,0 mm/Jahr ohne Korrektur gegenüber 1,7 mm/Jahr unter Berücksichtigung der Korrektur ermittelt.

Aktuelle Untersuchungen von Dangendorf et al. (2020) separieren die vertikalen Landbewegungen vom klimatisch induzierten relativen Meeresspiegelanstieg des globalen Ozeans über eine hybride Rekonstruktion des MSL. Dangendorf (2019) hat dazu eine hybride Rekonstruktionsmethodik entwickelt, mit der der MSL global über eine Kombination von Satellitendaten, Pegelbeobachtungen und den bekannten regionalen Mustern einzelner beteiligter Prozesse zunächst auf einem globalen Gitter ermittelt und anschließend in verfeinerter Auflösung an die deutschen Küsten transferiert wird. Die Ergebnisse zeigen etwas höhere relative MSL-Trends entlang der deutschen Nordseeküste bis 2 mm/Jahr. Überlagert werden diese Entwicklungen durch vertikale Landbewegungen, die sich im Bereich von $\pm 0,5$ mm/Jahr bewegen; dabei werden diese Landbewegungen nicht durch Klimaänderungen verursacht.

Der Meeresspiegelanstieg ist ein instationärer Prozess und weist deutliche regionale Differenzen auf. Die Werte der Trends variieren zwischen den einzelnen Pegelstationen aufgrund lokaler Maßnahmen und atmosphärischer Effekte erheblich. Ein Teil der räumlichen Differenzen in den Langzeittrends der Wasserstände (MSL) sind mit vertikalen Landbewegungen zu erklären (vgl. Dangendorf et al. 2020). An der niedersächsischen Nordseeküste könnte die vertikale Landbewegung einen Anteil von bis zu einem Drittel des RMSL-Anstiegs beitragen.

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts ist der MSL absolut um etwa 1,7 mm/Jahr im Mittel in der Nordsee angestiegen. Neben den Änderungen im MSL ist der Thb seit Mitte der 1950er Jahre bis zum Ende der 1990er Jahre um bis zu 10 % angestiegen. Extremwertzeitreihen von NTnw und HThw weisen gegenüber dem MSL deutlich stärkere Trends auf. Erst in aktuellen Arbeiten werden für die Zeitreihen aus der Satellitenaltimetrie von 1992 bis 2017 absolute Meeresspiegeländerungen für die deutschen Küsten im Bereich von bis zu 4 mm/Jahr ermittelt (vgl. Dangendorf et al. 2020).

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Entwicklung des Meeresspiegels, der Gezeiten, der Tidewasserstände und Sturmfluten ist ein außerordentlich komplexer Prozess mit vielen Interaktionen der verschiedenen Einflussgrößen

natürlichen und anthropogenen Ursprungs. Auch nach fast drei Jahrhunderten Meeresspiegelforschung sind die Prozesse nicht vollständig verstanden. Die umfangreichen Aufzeichnungen an Pegelstationen der Nordseeküste und den Inseln über einen Zeitraum von mehr als 200 Jahren stellen nach wie vor eine wertvolle Datengrundlage für die Meeresspiegelforschung dar. Nur auf Basis eines umfassenden Verständnisses der bisherigen Veränderungen der Wasserstände einschließlich der Extremwasserstände und der Gezeiten sind in Verbindung mit anderen methodischen Ansätzen robuste Projektionen für die zukünftige Wasserstandsentwicklung abzuleiten. Der von Brahm schon 1754 festgestellte Mangel hat kaum an Aktualität verloren: »Wären wir so glücklich, daß unsere Vorfahren von etwa zwei- bis dreihundert Jahren her, die Größe und Stärke derer grossen Seefluthen accurat aufgemessen und aufgezeichnet hinterlassen hätten, so wol als sie die Größe des Verlusts des Schadens, so dieselbe verursacht, beschrieben, hätte der Deichbau schon längstens in erwünschter Vollkommenheit sein können.«

Die vertikalen Landbewegungen wurden ab den 1950er Jahren für die deutsche Nordseeküste gegenüber dem Meeresspiegelanstieg als vernachlässigbar betrachtet; aktuelle Forschungsergebnisse widerlegen diese These. An der niedersächsischen Nordseeküste ist von einer Landsenkung im Bereich weniger Zentimeter pro Jahrhundert und an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste von einer nahezu stabilen Lage der Landoberfläche auszugehen. Die vertikale Landbewegung ist aber für Vergleiche mit dem globalen Meeresspiegelanstieg bzw. für die Differenzierung zwischen relativem und absolutem Meeresspiegelanstieg unbedingt zu berücksichtigen; hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Die wesentlichen physikalischen Prozesse, die zu Änderungen der Wasserstände und der Gezeitenausprägung an der deutschen Nordseeküste führen, sind seit mehr als zwei Jahrhunderten bekannt. In der Gesamtschau der Meeresspiegeländerungen auf Grundlage von Wasserstands- bzw. Pegelmessungen ist festzustellen, dass sich die ermittelten Trends für die relativen Änderungen des MThw und RMSL über die vergangenen knapp eineinhalb Jahrhunderte kaum verändert haben, vielmehr zeigen die Wasserstandsänderungen in der Deutschen Bucht über die letzten beiden Jahrhunderte ein relativ gleichförmiges Verhalten, dabei haben sich vermutlich die Anteile der Veränderungen der beteiligten Prozesse deutlich verändert. Ab den 1950er Jahren zeigt sich in den Tidewasserständen eine Dynamik, die hinsichtlich der Tidehubvergrößerung Ende der 1990er Jahre wieder abklingt.

Der Anstieg des MThw kann über den Zeitraum vom 17. Jahrhundert bis Mitte/Ende des 20. Jahrhunderts mit 2,5 mm/Jahr abgeschätzt werden,

der Anstieg ist dabei aber nicht linear, z. B. wurden Anfang des 20. Jahrhunderts höhere Anstiegswerte beobachtet. Mit diesen Anstiegsraten ist eine Rekonstruktion des Meeresspiegels und der Tidewasserstände für die höhenmäßige Einordnung von historischen Sturmfluten möglich.

Die Entwicklung des RMSL ist über diesen Zeitraum sehr ähnlich, allerdings ist der Trend des MThw etwas höher als der des MTnw und des RMSL. Der RMSL-Anstieg liegt für den Zeitraum von 1900 bis 2015 für die gesamte Nordsee in einer Größenordnung von rund 1,7 mm/Jahr. Mit Beginn der Satellitenbeobachtungen wird für den Zeitraum zwischen 1992 bis 2015 ein größerer MSL-Anstieg und damit eine Beschleunigung des MSL-Anstiegs ermittelt. Entlang der Küste Schleswig-Holsteins zeigen sich höhere Raten des MSL-Anstiegs und niedrigere Raten entlang der Küste Niedersachsens. Der Meeresspiegel weist darüber hinaus jährliche bis mehrdekadische Schwankungen auf, die hauptsächlich aus langjährigen Variabilitäten der Wetter- und Windsysteme sowie Änderungen in der großskaligen Ozeanzirkulation entstehen.

Neben den Veränderungen des Meeresspiegels verändern sich auch die Ausprägungen der Gezeiten. Während das MThw kontinuierlich ansteigt, zeigt das MTnw nur geringe Veränderungen. Insgesamt hat sich damit der MThb an der deutschen Nordseeküste von Mitte der 1950er Jahre bis Mitte der 1990er Jahre um bis zu 10 % erhöht. Auch hier zeigt sich eine unterschiedliche Entwicklung an den deutschen Nordseeküsten. Der MThb hat sich in dieser Zeit an den Küsten Schleswig-Holsteins um etwa 10 % erhöht und an der Küste Niedersachsens etwas geringer erhöht. Der Anstieg des MSL und des MThb ist für die Entwicklung der Morphologie bzw. die Sedimentumlagerungen im Wattenmeer, das Küstenvorfeld, die Inseln und Halligen von größter Bedeutung, da die natürliche Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers und der Küste begrenzt ist.

Für die Aufgaben im Küsteningenieurwesen und Küstenschutz sind regionale und lokale Änderungen des Meeresspiegels, relativ zum Land, und insbesondere der zukünftige Meeresspiegelanstieg von Bedeutung. Für den Küstenschutz an der deutschen Nordseeküste und die Bemessung von Küstenschutzbauwerken wurde ab den 1950er Jahren bis etwa 2010 ein Anstieg der Wasserstände von 25 cm (Säkularanstieg) und aktuell wird ein zukünftiger Anstieg von 50 cm berücksichtigt. In den letzten Jahrzehnten ist eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs festzustellen, deshalb muss die weitere Entwicklung des Meeresspiegels und insbesondere der Extremereignisse, jeweils unter Berücksichtigung der beteiligten Prozesse, sehr sorgfältig beobachtet werden, um ggf. entsprechende Anpassungen für den Küstenschutz umzusetzen. //

Danksagung

Mein großer Dank gilt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das mich über fast drei Jahrzehnte mit der Förderung von vielen Projekten bei der Erforschung der Veränderung der Wasserstände, Sturmfluten und Gezeiten unterstützt hat. Weiterhin danke ich Frau Dr. Jessica Kelln, Assist.-Prof. Dr. Sönke Dangendorf und Herrn Sebastian Niehüser, M.Sc. für die interessanten Diskussionen und Anregungen.

Literatur

- Arns, Arne; Thomas Wahl et al. (2015): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. *Coastal Engineering*, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.12.002
- Arns, Arne; Sönke Dangendorf et al. (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Nature Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep40171
- Baeteman, Cecile; Martyn Waller; Patrick Kiden (2011): Reconstructing middle to late Holocene sea-level change: A methodological review with particular reference to a new Holocene sea-level curve for the southern North Sea presented by K.-E. Behre. *Boreas*, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2011.00207.x
- Behre, Karl-Ernst (2003): Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. *Probleme der Küstenforschung*, 28, S. 9–61
- Behre, Karl-Ernst (2007): A New Holocene Sea-Level Curve for the Southern North Sea. *Boreas*. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2007.tb01183.x
- Bradley, James (1728): An account of a new discovered motion of the fix'd stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, DOI: 10.1098/rstl.1727.0064
- Brahms, Albert (1754): Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst, Teil I. Verlag H. Tapper, Aurich
- Brahms, Albert (1757): Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst, Teil II. Verlag H. Tapper, Aurich
- Bungenstock, Friederike; Henk J. T. Weerts (2010): The high-resolution Holocene sea-level curve for Northwest Germany: global signals, local effects or data-artefacts? *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, DOI: 10.1007/s00531-009-0493-6
- Calafat, Francisco M.; Don P. Chambers; Mikis N. Tsimplis (2012): Mechanisms of decadal sea level variability in the eastern North Atlantic and the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI: 10.1029/2012JC008285
- Chafik, Léon; Jan Even Øie Nilsen et al. (2019): North Atlantic Ocean Circulation and Decadal Sea Level Change During the Altimetry Era. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/s41598-018-37603-6
- Dangendorf, Sönke; Christoph Mudersbach et al. (2013): Characteristics of intra-, inter-annual and decadal sea-level variability and the role of meteorological forcing: the long record of Cuxhaven. *Ocean Dynamics*, DOI: 10.1007/s10236-013-0598-0
- Dangendorf, Sönke; Francisco M. Calafat et al. (2014): Mean sea level variability in the North Sea: processes and implications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI: 10.1002/2014JC009901
- Dangendorf, Sönke; Carling Hay et al. (2019): Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, DOI: 10.1038/s41558-019-0531-8
- Dangendorf, Sönke; Jessica Kelln et al. (2020): Untersuchungen zur Rekonstruktion des Meeresspiegels und vertikaler Landbewegungen an den deutschen Küsten. *Die Küste*, in Begutachtung
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie: Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- Frederikse, Thomas; Riccardo Riva et al. (2016): Estimating decadal variability in sea level from tide gauge records: An application to the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, DOI: 10.1002/2015JC011174
- Frederikse, Thomas; Svetlana Jevrejeva et al. (2018): A consistent sea-level reconstruction and its budget on basin and global scales over 1948–2014. *Journal of Climate*, DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0502.1
- Führböter, Alfred; Jürgen Jensen (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 42, S. 78–100
- Gaye, Julius (1951): Wasserstandsänderungen in der Ostsee und der Nordsee in den letzten 100 Jahren. *Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge der Gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg*
- Gönnert, Gabriele; Jürgen Jensen et al. (2009): Der Meeresspiegelanstieg: Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. *Die Küste*, 76, S. 225–256
- Gregory, Jonathan M.; Stephen M. Griffies et al. (2019): Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global. *Surveys in Geophysics*, DOI: 10.1007/s10712-019-09525-z
- Hagen, Gotthilf (1845): Über die Oberfläche der Flüssigkeiten: Eine in der Königlichen Akademie der Wissenschaften gelesene Abhandlung
- Hensen, Walter (1938): Über die Ursachen der Wasserstandshebung an der deutschen Nordseeküste. *Die Bautechnik*, H.1
- Hundt, Claus (1955): Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. *Die Küste*, 1/2, S. 96–152
- Huthnance John; Ralf Weisse et al. (2016): Recent change – North Sea. In: Markus Quante; Franciscus Colijn (Hrsg.): *North Sea Region Climate Change Assessment*, DOI: 10.1007/978-3-319-39745-0_3
- Jensen, Jürgen (1984): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Heft 83
- Jensen, Jürgen; Andrea Töppe (1986): Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 4
- Jensen, Jürgen; Hans-Eckard Mügge; Georg Visscher (1988): Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 47, S. 135–161
- Jensen, Jürgen; Hans-Eckard Mügge; Wolfgang Schönfeld (1990): Development of Water Level changes in the German Bight, an Analysis Based on Single Value Time Series. *Coastal Engineering 1990*, S. 2838–2851
- Jensen, Jürgen; Hans-Eckard Mügge; Wolfgang Schönfeld (1992): Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 53, S. 211–275
- Jensen, Jürgen; Christoph Mudersbach (2004): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Gabriele Gönnert; Hartmut Graßl et al. (Hrsg.): *Klimaänderung und Küstenschutz*, Universität Hamburg
- Jensen, Jürgen; Torsten Frank; Thomas Wahl (2011): Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). *Die Küste*, 78, S. 59–163

- Jensen, Jürgen; Sönke Dangendorf et al. (2014): Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, DOI: 10.5675/HyWa_2014,6_1
- Kramer, Johann (1989): Kein Deich – Kein Land – Kein Leben – Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee. Rautenberg, Leer
- Krüger, Wilhelm (1922): Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens. *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft*, 4, S. 268–284
- Krüger, Wilhelm (1938): Die Küstensenkung an der Jade. *Der Bauingenieur*, 19, S. 91–99
- Lassen, Horst (1989): Örtliche und zeitliche Variation des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, 50, S. 65–95
- Lentz, Bernhard Hugo (1873): Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel, Otto Meissner, Hamburg, 1879
- Liese, Rudolf (1979): Veränderungen von Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub seit 1946. *Jahresbericht 1978*, 30, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney
- Lohrberg, Wilhelm (1989): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 5/6
- Lubbock, John William (1836): *On the theory of the moon, and on the perturbations of the planets*. Charles Knight, London
- Lüders, Karl (1936): Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. *Zentralblatt der Bauverwaltung*, 50
- Macaren, Charles (1842): The Glacial theory of Professor Agassiz, *American Journal of Science and Arts*, 42
- Meier, Dirk (2007): *Die Nordseeküste: Geschichte einer Landschaft*. 2. Auflage, Boysens Buchverlag, Heide
- Mudersbach, Christoph; Thomas Wahl et al. (2013): Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes. *Continental Shelf Research*, DOI: 10.1016/j.csr.2013.06.016
- Niehüser, Sebastian; Jürgen Jensen et al. (2016): Zum Einfluss möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft. *Die Küste*, 84, S. 119–145
- Paschen, Friedrich (1869): Beitrag zur Untersuchung der Frage über die Hebung der deutschen Ostsee. In: *Beiträge zur Statistik Mecklenburgs*
- Peltier, W. Richard (2004): Global glacial isostasy and the surface of the Ice-Age earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, DOI: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359.
- Peltier, W. Richard; Donald Argus; James R. Drummond (2015): Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, DOI: 10.1002/2014JB011176
- Peters, L. C. (1929): *Nordfriesland – Heimatbuch für Die Kreise Husum und Südtondern*. Verlag C.F. Delff, Husum
- Pugh, David; Philip Woodworth (2014): *Sea-Level Science – Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea Level Changes*, Cambridge University Press
- Reinke, Johann Theodor (1787): Über die Ebbe- und Fluth-Observation auf der Elbe. *Hamburgische Adreß-Comtoir-Nachrichten*, 36
- Rietschel, Ernst (1933): Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung, *Deutsche Wasserwirtschaft*, 5, Berlin
- Rohde, Hans (1964): Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein. *Die Küste*, 12, S. 86–112
- Rohde, Hans (1968): Wasserstandsänderungen und Sturmfluthäufigkeit an der Elbemündung. *Die Küste*, 16, S. 33–42
- Rohde, Hans (1975): Wasserstandsbeobachtungen im Bereich der deutschen Nordseeküste vor der Mitte des 19. Jahrhunderts. *Die Küste*, 28, S. 1–96
- Rohde, Hans (1977): Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 30, S. 52–143
- Schütte, Heinrich (1908): Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste. *Jahrbuch für die Geschichte des Herzogtums Oldenburg*
- Siefert, Winfried; Horst Lassen (1985): Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelbewertungen. *Die Küste*, 42, S. 1–77
- Siefert, Winfried; Horst Lassen (1991): Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980 (Schlussbericht eines KFKI-Projektes). *Die Küste*, 52, S. 85–137
- Suess, Eduard (1888): *Das Antlitz der Erde*, Band 2
- Vink, Annemiek; Holger Steffen et al. (2007): Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, The Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews*, DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.07.014
- Wahl, Thomas; Jürgen Jensen; Torsten Frank (2010): On analysing sea-level rise in the German Bight since 1844. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, DOI: 10.5194/nhess-10-171-2010
- Wahl, Thomas; Jürgen Jensen et al. (2011): 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
- Wahl, Thomas; Ivan David Haigh et al. (2013): Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. *Earth-Science Reviews*, DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.05.003
- Weisse, Ralf; Insa Meinke (2017): Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: Guy P. Brasseur; Daniela Jacob; Susanne Schuck-Zöller (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*, S. 77–85
- Woebcken, Carl (1924): *Deiche und Sturmfluten an der Nordseeküste*. Friesen-Verlag, Bremen-Wilhelmshaven
- Woodworth, Philip L. (2017): Differences between mean tide level and mean sea level. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-016-0938-1