

Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang

Ralf Weiße, Insa Meinke

9.1 Nordsee – 78

9.1.1 Mittlerer Meeresspiegel – 78

9.1.2 Meteorologisch verursachte Wasserstandsänderungen – 78

9.1.3 Gezeiten – 79

9.2 Ostsee – 80

9.2.1 Mittlerer Meeresspiegel – 80

9.2.2 Ostseesturmfluten – 82

9.3 Kurz gesagt – 83

Literatur – 83

Extreme Sturmflutwasserstände stellen für die deutschen Küstenregionen an Nord- und Ostsee eine beträchtliche Gefährdung dar. Sie werden durch eine Reihe verschiedener Faktoren beeinflusst, deren Bedeutung je nach Region variiert. Gezeiten spielen vor allem in der Nordsee eine Rolle. Meteorologische Effekte wie Windstau (resultierend aus der Übertragung von Windenergie auf die Wasseroberfläche), Änderung des Wasserstands unter dem Einfluss des Luftdrucks (invers-barometrischer Effekt) oder der mit hohen Windgeschwindigkeiten verbundene Seegang sind sowohl in der Nord- als auch in der Ostsee von Bedeutung. Ebenso spielen langfristige Änderungen im mittleren Meeresspiegel in beiden Regionen eine zentrale Rolle bei der Änderung von Eintrittswahrscheinlichkeiten besonders hoher Sturmflutwasserstände. Beiträge von kurzfristigeren Schwankungen im mittleren Wasserstand (Vorfüllung) und Eigenschwingungen (Seiches) sind vor allem in der Ostsee von Bedeutung. Letztere wurden auch schon in kleinen Tidebecken in der Nordsee beobachtet. Im Folgenden wird das Wissen in Bezug auf vergangene und mögliche zukünftige Veränderungen der einzelnen Faktoren für Nord- und Ostsee diskutiert. Aufgrund der unterschiedlichen Relevanz der verschiedenen Prozesse sowie der daraus resultierenden unterschiedlichen Darstellung des Wissens in der Literatur erfolgt die Darstellung des Wissensstands für Nord- und Ostsee getrennt.

9.1 Nordsee

Der Wasserstand an der deutschen Nordseeküste wird durch eine Überlagerung astronomischer Anteile wie Gezeiten und meteorologischer Anteile wie den direkten Einfluss des Luftdrucks auf den Meeresspiegel oder durch Wind verursachten Seegang (Windstau) beeinflusst. Ebenso können Wind- und Luftdruckschwankungen über dem Atlantik sogenannte Fernwellen auslösen, die von außen in die Nordsee eindringen und den Wasserstand kurzfristig erhöhen (z. B. Rossiter 1958). Weiterhin können Wechselwirkungen einzelner Komponenten wie z. B. von Gezeiten und Windstau in flachem Wasser eine Rolle spielen (Horsburgh und Wilson 2007). Hinzu kommt ein weiterer Anteil, der durch den langsamen Anstieg des mittleren Meeresspiegels bedingt ist. Alle Anteile können über die Zeit schwanken oder sich langfristig und systematisch verändern. Im Folgenden wird das Wissen über vergangene und mögliche zukünftige Änderungen der einzelnen Komponenten getrennt diskutiert.

9.1.1 Mittlerer Meeresspiegel

Für die Nordsee existiert eine Vielzahl von Studien, die vergangene Änderungen des Meeresspiegels für unterschiedliche Regionen mit unterschiedlichen Methoden und Datensätzen untersuchen. Für den Küstenschutz sind dabei vor allem relative Veränderungen relevant, d. h. Veränderungen durch Überlagerung von Meeresspiegelanstieg und lokaler Landhebung oder -senkung. Aufgrund der Verschiedenheit der vorliegenden Arbeiten sind ihre Ergebnisse zum Teil nur schwer vergleichbar. Beispielsweise untersuchten Woodworth et al. (2009) absolute

Meeresspiegeländerungen für England, Haigh et al. (2009) Pegel­daten für den englischen Kanal, Wahl et al. (2010) und Albrecht et al. (2011) Pegel­daten und relative Änderungen für die Deutsche Bucht und Madsen (2009) Satellitendaten und Änderungen an der dänischen Küste. Eine umfassende Analyse, basierend auf einem einheitlichen Datenmaterial und einheitlicher Methodik, wurde jüngst von Wahl et al. (2013) vorgestellt. Die Autoren analysierten dabei die Meeresspiegeländerungen in der Nordsee seit 1800 anhand eines homogenisierten Pegel­datensatzes, der Pegel aus allen Nordseeanrainerstaaten berücksichtigte. Basierend auf ihren Auswertungen geben Wahl et al. (2013) einen gemeinsamen Trend von 1,6 mm/Jahr für den Zeitraum von 1900 bis 2011 an. Dies entspricht in etwa dem Anstieg des globalen Mittelwerts über einen annähernd gleichen Zeitraum (1,7 mm/Jahr für die Zeitspanne 1901–2010 (Church et al. 2013)). Für die deutsche Nordseeküste wurden Anstiegsraten zwischen 1,6 und 1,8 mm/Jahr gefunden, mit höheren Werten entlang der schleswig-holsteinischen und geringeren Werten entlang der niedersächsischen Küste (Wahl et al. 2010; Albrecht et al. 2011). Innerhalb des untersuchten Zeitraums wurden mehrere Perioden mit beschleunigtem Meeresspiegelanstieg gefunden, die zum Teil mit entsprechenden Schwankungen im großräumigen Luftdruckfeld verbunden waren. Dabei sind in jüngster Zeit relativ hohe Anstiegsraten zu finden, die jedoch mit den früheren Perioden vergleichbar sind (Wahl et al. 2013).

In Bezug auf mögliche zukünftige Änderungen des mittleren Meeresspiegels existiert inzwischen eine Reihe von Projektionen für verschiedene Nordseeregionen, etwa Katsman et al. (2011) für die niederländische, Lowe et al. (2009) für die englische und Simpson et al. (2012) sowie Nilsen et al. (2012) für die norwegische Küste. Anhand eines Ensembles von Klimamodellrechnungen für unterschiedliche Emissionsszenarien analysierten Slangen et al. (2012) mögliche zukünftige relative Meeresspiegeländerungen. Demnach können zukünftige Anstiegsraten in der Nordsee zum Teil, hauptsächlich infolge der postglazialen (nacheiszeitlichen) Landsenkung (Wanninger et al. 2009; Wahl et al. 2013), höher als der globale Meeresspiegelanstieg ausfallen.

9.1.2 Meteorologisch verursachte Wasserstandsänderungen

Meteorologisch verursachte Wasserstandsänderungen (z. B. Windstau oder Seegang) sind für große Teile der deutschen Nordseeküste relevant. Ein typisches Maß zur Beurteilung des Einflusses solcher wetterinduzierter Meeresspiegelschwankungen ist deren monatliche Standardabweichung (Pugh 2004). Für die deutsche Bucht beträgt die monatliche Standardabweichung meteorologisch induzierter Wasserstandsschwankungen etwa 30–40 cm, was auf einen substanziellen Beitrag an der Gesamtvariabilität der Wasserstände schließen lässt (Weisse und von Storch 2009). Dabei sind die Werte der Standardabweichung im Winter tendenziell höher als im Sommer, was die saisonale Variabilität von Starkwindereignissen widerspiegelt (Weisse und von Storch 2009).

Vergangene Änderungen im Windstau- und Seegangsklima der Nordsee sind sowohl anhand von Beobachtungen als auch

mit Modellen und statistischen Methoden untersucht worden. Basierend auf einer Idee von de Ronde bereinigten von Storch und Reichart (1997) die Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven um ihre jährlichen Mittelwerte und verwendeten das Ergebnis als Proxy für den Windstauanteil. Bezogen auf den Gesamtzeitraum 1876–1993 fanden sie dabei keine systematischen Veränderungen im Windstau, jedoch ausgeprägte Schwankungen zwischen den Jahren und Jahrzehnten, die konsistent mit den Schwankungen der Sturmaktivität in der Region sind (z. B. Krüger et al. 2013; Dangendorf et al. 2014). Updates der Analysen für die Zeiträume von 1843 bis 2006 (Weisse et al. 2012) und 1843 bis 2012 (Emeis et al. 2015) bestätigen diese Ergebnisse.

Einen alternativen Ansatz, Änderungen im Windstauklima zu analysieren, stellen Studien mit hydrodynamischen Modellen dar, die durch reanalysierte Wind- und Luftdruckfelder angetrieben werden. Typischerweise kann mit solchen Simulationen das Windstauklima bis etwa 1958 rekonstruiert werden. Wenn gleich in diesen Rechnungen andere Einflüsse wie z. B. Meeresspiegelanstieg oder Veränderungen durch wasserbauliche Maßnahmen explizit nicht berücksichtigt sind, erhält man eine Abschätzung langfristiger Änderungen im Windstauklima. Die Ergebnisse solcher Modellstudien (z. B. Langenberg et al. 1999; Weisse und Plüß 2006) stimmen mit den oben beschriebenen beobachteten Veränderungen im Stauklima tendenziell dahingehend überein, dass das Stauklima ausgeprägte Schwankungen, jedoch keinen substanzialen Langzeittrend im Zeitbereich von Jahren und Dekaden aufweist. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich aus Analysen beobachteter und modellierter Veränderungen des Seegangklimas (z. B. WASA 1998; Günther et al. 1998; Vikebø et al. 2003; Weisse und Günther 2007).

Zukünftige Änderungen im Windstau- und Seegangklima hängen von entsprechenden Änderungen in den atmosphärischen Windfeldern ab, die sehr unsicher sind (Christensen et al. 2007). Diese Unsicherheit pflanzt sich in den entsprechenden Studien zu Änderungen im Windstau- und Seegangklima fort. Die Mehrheit der Studien zeigt dabei keine (z. B. Sterl et al. 2009) oder nur geringe Änderungen im Windstau- (z. B. Langenberg et al. 1999; Kauker und Langenberg 2000; Woth 2005; Woth et al. 2006; Debernhard und Roed 2008; Gaslikova et al. 2013) und Seegangklima (z. B. Grabemann und Weisse 2008; Debernhard und Roed 2008; Groll et al. 2014; Grabemann et al. 2015). Für den Windstau werden die größten Änderungen größtenteils für den Bereich der Deutschen Bucht gefunden (z. B. Woth 2005; Gaslikova et al. 2013). Jedoch sind nicht alle Änderungen in allen Studien detektierbar, was bedeutet, dass sie zum Teil innerhalb der beobachteten Schwankungsbreite liegen. Etwas größere Änderungen werden von Lowe und Gregory (2005) beschrieben, die zum Ende des Jahrhunderts einen Anstieg der 50-jährigen Wiederkehrwerte des Windstaus um bis zu 50–70 cm als Folge des anthropogenen Klimawandels analysierten. Diese Zahlen weichen allerdings erheblich von denen anderer Studien ab, die mit gleichen Techniken keine oder nur geringe Änderungen fanden (Lowe et al. 2001; Flather und Williams 2000; Sterl et al. 2009).

Wechselwirkungen zwischen Windstau und Meeresspiegeländerungen können ebenfalls zu Änderungen im Sturmflutklima führen. Statistische Analysen globaler Pegel datensätze zeigen eine Zunahme von Sturmfluthöhen, die primär durch einen

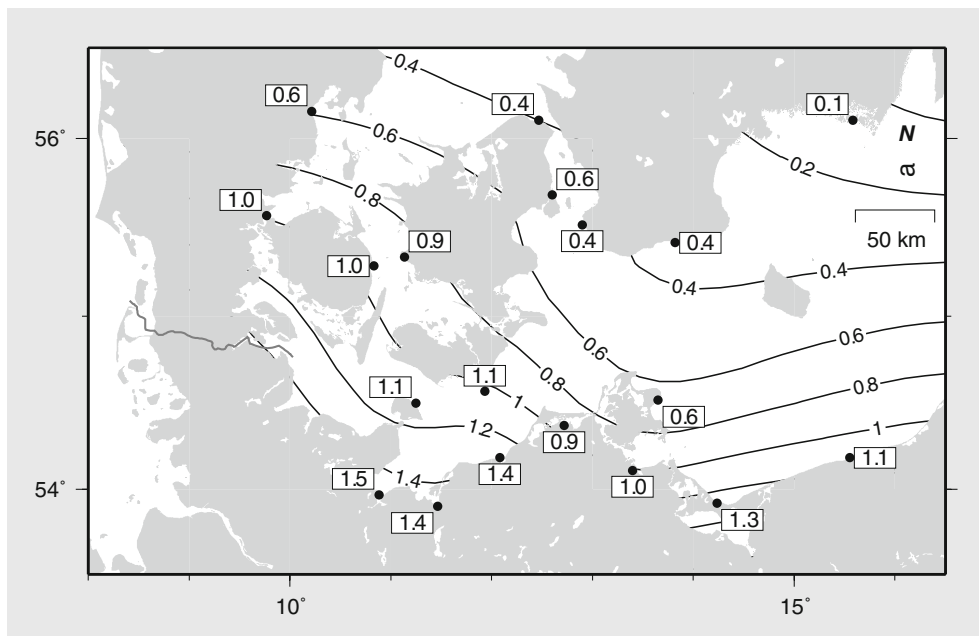
Anstieg des Meeresspiegels verursacht wurden (Menéndez und Woodworth 2010). Auch in der Deutschen Bucht lässt sich diese Tendenz bisher beobachten (Weisse 2011). Zukünftig kann der Anstieg von Sturmfluthöhen, insbesondere in Flachwassergebieten, aufgrund von Wechselwirkungen allerdings stärker als der zugrunde liegende Meeresspiegelanstieg ausfallen (z. B. Arns et al. 2015). Wechselwirkungen und Änderungen im Gezeitenregime können diese Effekte verstärken, wobei die Größenordnungen derzeit kontrovers diskutiert werden (► Abschn. 9.1.3).

Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Entwicklung im Wind- und Sturmklima spiegeln sich in Aussagen zu zukünftigen Änderungen im Windstau- und Seegangklima wider. Solche Unsicherheiten entstehen zum einen infolge der Spannweite möglicher gesellschaftlicher Entwicklungen (verschiedene Emissionsszenarien), zum anderen liefern Klimamodelle, die mit demselben Szenario angetrieben werden, ebenfalls eine Bandbreite an möglichen Änderungen. Letzteres reflektiert u. a. unser unvollständiges Wissen über die relevanten Prozesse im Klimasystem. Die Bandbreite an Ergebnissen eines Modells unter Verwendung eines Emissionsszenarios, jedoch mit verschiedenen leicht geänderten Anfangsbedingungen, lässt Rückschlüsse auf die interne Variabilität des Klimasystems zu. Ein Beispiel hierfür liefern Sterl et al. (2009), die mit einem globalen Klimamodell unter Verwendung des A1B-SRES-Szenarios 17-mal den Zeitraum 1950–2100 simulierten. Die Windfelder dieser Rechnungen wurden anschließend mithilfe eines statistischen *downscalings* verwendet, um Bandbreiten möglicher Änderungen im Windstauklima an der deutschen Nordseeküste abzuschätzen (Weisse et al. 2012). Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Windstauklima der einzelnen Realisationen zum Ende des 21. Jahrhunderts zum Teil beträchtlich unterscheidet und dass die interne Klimavariabilität bei der Interpretation von Ergebnissen anhand einzelner Simulationen oder eines begrenzten Ensembles entsprechend berücksichtigt werden muss.

9.1.3 Gezeiten

Für die Nordsee existiert eine Reihe von Arbeiten, die sich mit Änderungen im Gezeitenregime und der Tidedynamik beschäftigen. Mudersbach et al. (2013) analysierten langfristige Änderungen in Extremwasserständen in Cuxhaven und fanden, dass ein Teil des Anstiegs auf Änderungen im Tidehub zurückzuführen ist. Ähnliche Ergebnisse werden von Jensen et al. (2004) für eine Reihe von Pegeln in der Deutschen Bucht sowie von Hollebrandse (2005) für die niederländische Küste beschrieben. Mithilfe der Analyse eines globalen Datensatzes kommt Woodworth (2010) zu ähnlichen Ergebnissen für die Nordsee. Anhand seiner Analyse ist ferner erkennbar, dass die größten Änderungen hauptsächlich im Bereich der Deutschen Bucht zu finden sind.

Obwohl solche Änderungen in den Beobachtungsdaten sichtbar sind, sind die Ursachen dafür bisher nur unzureichend bekannt und erforscht. Eine Reihe von Autoren diskutiert Änderungen im mittleren Meeresspiegel als potenzielle Ursache (z. B. Mudersbach et al. 2013). Es wurde deshalb versucht, die Änderungen in der Tidedynamik infolge eines Meeresspiegelanstiegs mit hydrodynamischen Modellen zu modellieren (z. B. Kauker



■ **Abb. 9.1** Hundertjähriger linearer Trend des relativen Meeresspiegelanstiegs (mm/Jahr) in der südwestlichen Ostsee. (Nach Richter et al. 2012)

1999; Plüß 2006; Pickering et al. 2011). Die von den Modellen simulierten Änderungen sind jedoch generell zu klein, um die beobachteten Änderungen in der Tidedynamik durch den beobachteten Meeresspiegelanstieg vollständig zu erklären. Als weitere mögliche Ursachen werden deshalb u. a. der Einfluss wasserbaulicher Maßnahmen (z. B. Hollebrandse 2005) oder Änderungen im atlantischen Gezeitenregime (z. B. Woodworth et al. 1991) diskutiert. Langfristige periodische Änderungen im mittleren Tidehub können weiterhin durch den sogenannten Nordaltidezyklus (astronomische Tide; z. B. Pugh und Woodworth 2014) mit einer Periode von etwa 18,6 Jahren verursacht werden. In der Deutschen Bucht haben solche Änderungen eine Größenordnung von etwa 1–2% des mittleren Tidehubs (Hollebrandse 2005). Eine Reihe weiterer möglicher Ursachen, die bisher für die Nordsee nicht untersucht wurden, findet man z. B. in Woodworth (2010) und Müller (2011).

9.2 Ostsee

Wasserstände an der deutschen Ostseeküste werden durch Überlagerung verschiedener Prozesse auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen beeinflusst. Zu den kurzfristigen Prozessen zählen vor allem meteorologische, hydrologische und ozeanografische, wie Windstau, Füllungsgrad, Gezeiten, Abfluss aus Fließgewässern und Eigenschwingungen (interne Beckenschwingungen; oft wird hier auch der Begriff „Badewaneneffekt“ verwendet). Klimaänderungen können einerseits die Verteilung dieser kurzfristigen Prozesse in der Ostsee beeinflussen, sodass diese mit veränderter Häufigkeit und/oder Intensität auftreten. Andererseits können weltweit schmelzende Eismassen und eine wärmebedingte Ausdehnung des Wasserkörpers langfristig auch den mittleren Meeresspiegel in der Ostsee ansteigen lassen. Zusätzlich stehen die vertikalen Entlastungsbewegungen der Erdkruste seit der letzten Eiszeit in Wechselwirkung mit diesen Prozessen und wirken sich auf die Ostseewasserstände

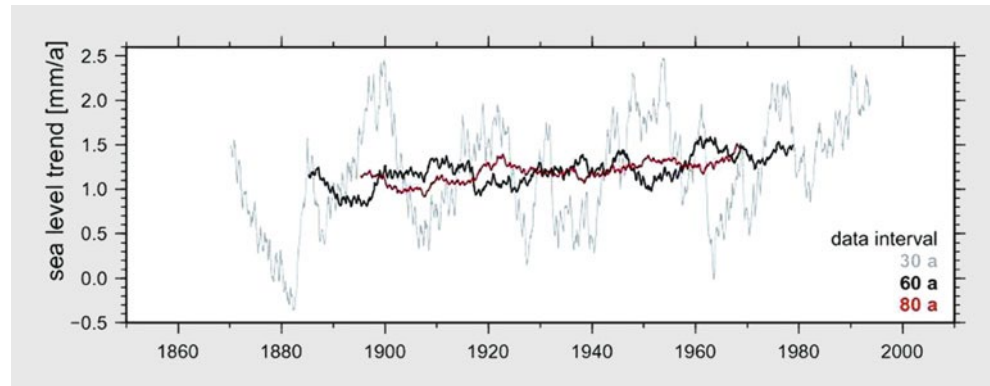
aus. Für die deutsche Ostseeküste sind sowohl langfristige Änderungen des mittleren Wasserstands als auch Änderungen des Sturmflutgeschehens im Hinblick auf Höhe, Häufigkeit und Dauer von Bedeutung. Nachfolgend werden die bisherigen und künftig möglichen Entwicklungen dokumentiert.

9.2.1 Mittlerer Meeresspiegel

Im Hinblick auf Küstenschutz und weitere Anpassungsmaßnahmen an mögliche Folgen des Klimawandels ist der relative Meeresspiegelanstieg von Bedeutung, also die Änderungen des Wasserstands in Relation zur Küste. Deshalb wird nachfolgend der relative Meeresspiegelanstieg in der Ostsee betrachtet. Die langfristigen Änderungen des mittleren Wasserstands in der Ostsee sind ein besonders gutes Beispiel für das Zusammenwirken mariner und kontinentaler Bewegungskomponenten. Im gesamten nördlichen Teil der Ostsee, insbesondere in Skandinavien, übertrifft die Hebung der Landmassen seit der letzten Eiszeit (isostatischer Ausgleich) den Meeresspiegelanstieg relativ zum Erdmittelpunkt erheblich. Dies führt dazu, dass der mittlere Wasserstand relativ zum Messpegel an Land um derzeit etwa 8 mm pro Jahr sinkt (Liebsch 1997). Im südlichen Teil der Ostsee – und somit auch an der deutschen Ostseeküste – addieren sich die isostatische Senkung der Landmassen und der Meeresspiegelanstieg relativ zum Erdmittelpunkt, wodurch der Meeresspiegel relativ zum Messpegel an Land derzeit ansteigt (■ Abb. 9.1, Lampe und Meier 2003). Während dekadische Schwankungen des Meeresspiegels in der zentralen und östlichen Ostsee gut durch Luftdruckschwankungen wie die nordatlantische Oszillation (NAO) erklärt werden können, weisen dekadische Schwankungen des mittleren Meeresspiegels in der südwestlichen Ostsee stärkere Korrelationen mit der durchschnittlichen Niederschlagsmenge in der Region auf (Hünicke 2010).

Innerhalb des letzten Jahrhunderts wurde an allen Pegeln der deutschen Ostseeküste ein mittlerer Meeresspiegelanstieg von

■ **Abb. 9.2** Lineare Trends des mittleren Meeresspiegels innerhalb 30- (grau), 60- (schwarz) und 80-jähriger (rot) gleitender Zeitfenster in Warnemünde. (Richter et al. 2012)



etwa 1 mm pro Jahr gemessen (Mudersbach und Jensen 2008; Richter et al. 2012; Meinke 1999). Dieser Anstieg weist innerhalb der südwestlichen Ostsee ein deutliches Gefälle von Süd-West nach Nord-Ost auf. Die gemessenen Trends liegen zwischen 1,5 mm pro Jahr in Eckernförde und Wismar und 0,4 mm pro Jahr in Saßnitz (vgl. ■ Abb. 9.1 sowie Mudersbach und Jensen 2008). Das bedeutet, dass eine Sturmflut wie am 12./13. November 1872 heute allein aufgrund des inzwischen angestiegenen Meeresspiegels etwa 5–20 cm höher auflaufen würde als damals. Dabei bleiben nichtlineare Wechselwirkungseffekte (z. B. Annutsch 1977) unberücksichtigt, die jedoch, vermutlich im Vergleich zum direkten Effekt des ansteigenden Meeresspiegels, gering ausfallen (z. B. Lowe et al. 2001). Stigge (1993) untersuchte die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ostseesturmfluten bei einer Änderung des mittleren Wasserstands von 10 cm und fand Hinweise für deutliche Häufigkeitszunahmen von Sturmfluten an der mecklenburgischen Küste.

Inwieweit sich der Meeresspiegelanstieg an der deutschen Ostseeküste bereits beschleunigt hat, kann z. B. mit einer Zeitreihe jeweils 30-jähriger Trends untersucht werden. Auf diese Weise kann die aktuelle Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs in Relation zu den Raten vergangener Zeitfenster analysiert werden. In ■ Abb. 9.2 ist diese Auswertung für Warnemünde auf Basis von Pegelmessungen dargestellt. Daraus wird deutlich, dass die Raten des relativen Meeresspiegelanstiegs in Warnemünde am Ende des Untersuchungszeitraums mit 2–2,5 mm pro Jahr recht hohe Werte im Vergleich zu früheren Perioden innerhalb des Messzeitraums aufweisen. Wird diese Rate jedoch in Relation zu historischen Raten gesetzt, wird deutlich, dass dies nicht beispiellos ist. Vielmehr zeigt sich, dass die Raten des Meeresspiegelanstiegs starken Schwankungen unterliegen, wobei zu Beginn des 20. Jahrhunderts und in den 1950er-Jahren ähnlich hohe Raten wie heute auftraten. Größere Zeitfenster von 60 oder 80 Jahren lassen eine langsame Beschleunigung des relativen Meeresspiegelanstiegs in Warnemünde vermuten, wobei dieser Trend statistisch jedoch nicht signifikant ist (vgl. Richter et al. 2012 und ■ Abb. 9.2).

Globale Klimaszenarien des Fünften Sachstandberichts des Weltklimarats (IPCC 2013) weisen darauf hin, dass sich der globale mittlere Meeresspiegelanstieg bis Ende des 21. Jahrhunderts beschleunigen kann. Demnach kann sich der globale mittlere Meeresspiegel bis Ende des 21. Jahrhunderts (2081–2100) im Vergleich zur Gegenwart (1986–2005) um weitere 30–80 cm erhöhen (Church et al. 2013). Dieser Meeresspiegelanstieg vollzieht

sich jedoch weltweit nicht gleichmäßig, sondern in räumlich sehr heterogenen Mustern. In der Ostsee erfolgt zudem eine Überlagerung durch glazial-isostatische Ausgleichsbewegungen der Erdkruste, durch die der künftige relative Meeresspiegelanstieg in der Ostsee je nach Region deutlich von den Werten des projizierten globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs abweichen kann.

Ein Ansatz zur Erstellung regionaler Meeresspiegelprojektionen in der Ostsee ist die individuelle Projektion der einzelnen Haupteinflussgrößen, die auf den Meeresspiegel einwirken (Grinsted 2015). Hierzu zählen die thermische Ausdehnung des Wasserkörpers, Änderungen im Schwerfeld der Erde, der Einfluss schmelzender Eismassen im Inland, auf Grönland und in der Antarktis sowie glazial-isostatische Ausgleichsbewegungen. Dabei werden die zentralen Projektionen des globalen Einflusses dieser Größen mit ihren regionalen Charakteristika in der Ostsee kombiniert. Ausgehend von dem Emissionsszenario SRES A1B lässt dieser Ansatz bis Ende des 21. Jahrhunderts (2090–2099) im Vergleich zu heute (1990–1999) einen relativen Meeresspiegelanstieg von etwa 60 cm an der deutschen Ostseeküste erwarten. In diesem Fall würde sich die aktuelle Rate (1990–2000) des Meeresspiegelanstiegs von 2–2,5 mm pro Jahr (s. o.) an der südwestlichen Ostseeküste bis Ende des Jahrhunderts etwa verdreifachen.

Ein anderer Ansatz für regionalisierte Klimaszenarien von zukünftigen Ostseewasserständen basiert auf gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphäre-Modellen und zum Teil auch auf Erdsystemmodellen, deren Entwicklung derzeit an vielen Forschungseinrichtungen vorangetrieben wird. Obwohl einzelne Auswertungen bereits existieren, können bislang noch keine belastbaren Bandbreiten für mögliche Änderungen angegeben werden. Zudem werden wesentliche Komponenten, die den Meeresspiegel beeinflussen, außer Acht gelassen. So geben z. B. Klimasimulationen mit den gekoppelten Modellen (MPIOM/REMO) Aufschluss über die Größenordnung der thermischen Ausdehnung im Ozean und die regionale Verteilung dieser Komponente durch veränderte Meeresströmungen und Winde. Sie zeigen für die Ostsee unter Berücksichtigung von SRES A1B eine Erhöhung des Meeresspiegels in der Größenordnung von 30 cm bis Ende des Jahrhunderts (Klein et al. 2011). Der Beitrag der anderen Komponenten, etwa das Verhalten der großen Eisschilde und die Effekte der Landhebung und -senkung nach Verlust von Eismassen, wurden hier nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend deuten die bisherigen Ergebnisse regionaler Meeresspiegelszenarien, die für die Ostsee größtenteils auf

dem Emissionsszenario SRES A1B basieren, darauf hin, dass auch unter Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten der Meeresspiegelanstieg an der deutschen Ostseeküste auch künftig innerhalb der Bandbreite des zu erwartenden globalen mittleren Anstiegs liegen kann.

9.2.2 Ostseesturmfluten

Die Ostseesturmflut vom 12./13. November 1872 gilt bisher als eine der schwersten Naturkatastrophen an der westlichen Ostseeküste. Mindestens 270 Menschen starben, mehrere Tausend Bewohner wurden obdachlos. Nachfolgend werden wissenschaftliche Erkenntnisse zur bisherigen und zukünftigen Entwicklung von Häufigkeit, Höhe und Verweilzeit von Sturmfluten an der deutschen Ostseeküste dokumentiert. Es sei jedoch angemerkt, dass sich das Maß der Auswirkungen von Sturmfluten neben den sturmfluteigenen Merkmalen nach dem vorherrschenden wirtschaftlichen Status der Küstenbevölkerung, ihrer Risikowahrnehmung und – oft damit zusammenhängend – nach Präsenz und Zustand der Küstenschutzbauwerke richtet.

In der südwestlichen Ostsee ist das bisherige Sturmflutklima anhand von Wasserstandsmessungen und mit Modellen untersucht worden (z. B. Baerens 1998; Hupfer et al. 2003; Meinke 1998, Weidemann 2014). Basierend auf der Idee von der Ronde bereinigte Meinke (1998) die Wasserstandszeitreihe von Warnemünde um ihre jährlichen Mittelwerte und verwendete die Residuen als Proxy für den meteorologisch bedingten Anteil von Sturmfluten. Bezogen auf den Untersuchungszeitraum 1883–1997 lässt sich eine Zunahme der Sturmfluthäufigkeit erkennen. Bei Unterteilung des Untersuchungszeitraums in zwei gleichlange Zeiträume von 57 Jahren, weist die zweite Hälfte mit 35 Sturmfluten zehn Ereignisse mehr auf als die erste Hälfte. So hat sich die durchschnittliche Dauer von sturmflutfreien Zeitfenstern von knapp 3 Jahren in der ersten Hälfte auf knapp 2 Jahre in der zweiten Hälfte verkürzt. Sturmflutpausen von mehr als 5 aufeinanderfolgenden Jahren, wie sie in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums noch auftreten, sind im zweiten Zeitabschnitt verschwunden. Dennoch ist die Häufigkeitszunahme der Sturmfluten dieses Untersuchungszeitraums insgesamt nicht statistisch signifikant. Einen alternativen Ansatz, Änderungen im Sturmflutklima der Ostsee zu analysieren, verfolgt Weidemann (2014) unter Verwendung hydrodynamischer Modelle. Da die Modellläufe ausschließlich mit beobachteten Wind- und Luftdruckfeldern angetrieben werden, bleiben andere Einflüsse unberücksichtigt, z. B. der Meeresspiegelanstieg oder Veränderungen durch wasserbauliche Maßnahmen. Somit ist davon auszugehen, dass langfristige Änderungen der Wasserstände in den Modellläufen meteorologischen Ursachen zuzuordnen sind. Nach diesem Ansatz rekonstruiert Weidemann (2014) die Wasserstände der Ostsee von 1948 bis 2011. Die Auswertungen der Modellläufe zeigen eine leichte Zunahme der Sturmfluthäufigkeit in der südwestlichen Ostsee, beispielhaft in Flensburg, Wismar und Greifswald. Während die Häufigkeit der Ereignisse in den 1950er- und 1960er-Jahren unter dem langjährigen Durchschnitt liegt, weist insbesondere der Zeitraum 1980–1995 auf erhöhte Sturmfluthäufigkeit hin. Ab etwa 1996 ist im langjährigen Mittel

wiederum eine Abnahme der Sturmfluthäufigkeit zu beobachten. Weidemann (2014) untersuchte weiterhin die Beiträge von Eigenschwingungen und Füllungsgrad der Ostsee (Vorfüllung) zu den Sturmflutwasserständen. Er zeigte, dass beide Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Sturmflutwasserstände haben können. Sturmfluten mit und ohne Beiträge von Vorfüllung traten demnach in den letzten Dekaden zu ungefähr gleichen Anteilen auf. Bei etwa einem Drittel der Fälle wurden Beiträge von Eigenschwingungen von mehr als 10 cm zum Höchstwasserstand nachgewiesen. Zeitreihenanalysen zeigen außerdem, dass die erhöhten Sturmfluthäufigkeiten in der südwestlichen Ostsee mit einer erhöhten Häufigkeit von Eigenschwingungen in der Ostsee zusammenfallen (Weidemann 2014). Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Ergebnissen von Meinke (1998), bei denen gezeigt wird, dass die Häufigkeitszunahme der Sturmfluten in Warnemünde innerhalb des Zeitraums 1953–1997 mit einer Zunahme leichter Sturmfluten zusammenfällt, bei deren Entstehung Beiträge von Eigenschwingungen ermittelt wurden. Zudem fällt die Häufigkeitszunahme der Sturmfluten insgesamt mit einer Häufigkeitszunahme von Sturmfluten mit erhöhter Vorfüllung zusammen.

Bei Untersuchungen von Langzeitänderungen der Sturmflut-tätigkeit ist neben der Häufigkeit solcher Ereignisse auch von Interesse, ob Sturmfluten heute höher auflaufen als in der Vergangenheit. Die Ergebnisse solcher Auswertungen sind abhängig vom zugrunde liegenden Zeitfenster und variieren räumlich. Richter et al. (2012) haben Zeitreihen der Wasserstandspegel in der südwestlichen Ostsee analysiert und um historische Dokumente und Flutmarken ergänzt. Innerhalb der letzten 200 Jahre konnten keine klimabedingten Änderungen der Wasserstandsextreme nachgewiesen werden (s. auch Hünicke et al. 2014). Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Ergebnissen einer Auswertung der jährlichen maximalen Wasserstände am Pegel Warnemünde innerhalb des Zeitraums 1905–1995 (Meinke 1998). Nach Bereinigung um die jährlichen Mittelwasserstände zeigen die Wasserstandsextreme starke jährliche und dekadische Schwankungen (Meinke 1998). In den 1950er-Jahren vollzog sich in Warnemünde der stärkste Anstieg jährlicher Wasserstandsextreme. Allerdings wurde dieses Höhenniveau schon einmal Anfang des 20. Jahrhunderts erreicht und überschritten. In den 1990er-Jahren erfolgte erneut ein Anstieg der jährlichen Wasserstandsextreme, wobei das Höhenniveau der 1950er-Jahre jedoch nicht erreicht wurde. Weidemann (2014) fand innerhalb des Zeitraums von 1948 bis 2011 positive lineare Anstiege der maximalen Sturmflutwasserstände an der deutschen Ostseeküste (Flensburg, Wismar und Greifswald). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Mudersbach und Jensen (2008), deren Pegelaufzeichnungen größtenteils ab 1920 vorlagen. Die Auswertung der längsten lückenlosen Wasserstandszeitreihe von 1826 bis 2006 in Travemünde zeigt für die jährlichen maximalen Hochwasser einen linearen Trend von 2,2 mm pro Jahr im gesamten Zeitraum (Jensen et al. 2004). Fast alle in dieser Studie untersuchten Pegel in der südwestlichen Ostsee, mit Ausnahme von Kiel und Flensburg, weisen für die jährlichen maximalen Hochwasser höhere Trends auf als für den mittleren Meeresspiegel. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen von Hünicke et al. (2014). Zusammenfassend scheint das Vorzeichen des Trends bei den

Sturmfluthöhen von dem jeweils betrachteten Zeitfenster abhängig zu sein. Insgesamt sind hinsichtlich der Sturmfluthöhen bisher keine Tests bekannt, die statistisch signifikante Änderungen belegen.

Bezüglich der Auswirkungen von Sturmfluten sind auch die Verweilzeiten relevant. Die erhöhten Wasserstände stellen sich wegen der schwachen Gezeitenwirkung während der gesamten Stormdauer ein und können somit über mehrere Tage unvermindert anhalten. Hierdurch ergeben sich auch bei mittleren Hochwasserständen hohe Energieeinträge auf die Küste und auf Küsten- und Hochwasserschutzbauwerke. Gefährdet sind insbesondere Hochwasserschutzdünen, die bereits bei Wasserständen, die den Dünenfuß erreichen, abgetragen werden (Koppe 2003). Insbesondere im Höhenbereich 552–626 cm über Pegelnull (etwa 50–125 cm über NN) fand Meinke (1998) am Pegel Warnemünde Zunahmen der absoluten jährlichen Verweilzeiten und Wellenenergien innerhalb des Beobachtungszeitraums 1953–1997. Diese sind jedoch nicht auf eine zunehmende Andauer einzelner Sturmfluten zurückzuführen, sondern vor allem auf die zunehmende Häufigkeit von leichten Sturmfluten bzw. erhöhten Wasserständen. Weidemann (2014) untersuchte die Änderung der maximalen jährlichen Verweilzeit von Wasserständen oberhalb eines definierten Schwellenwertes und beschrieb eine leicht zunehmende, nichtsignifikante Tendenz der maximalen Verweilzeiten innerhalb des Zeitraums von 1948 bis 2010 für Flensburg, Greifswald und Wismar.

Szenarien für mögliche zukünftige Entwicklungen von Ostseesturmfluten wurden bislang von Meier (Meier et al. 2004, Meier 2006) sowie von Gräwe und Burchard (2011) durchgeführt. Dabei wurden jedoch die Sturmfluthöhen in Meier (Meier et al. 2004, Meier 2006) bei einer Modellgitterweite von 10 km deutlich unterschätzt, wogegen Gräwe und Burchard (2011) bei einer Auflösung von 1 km zu deutlich besseren Ergebnissen kamen. Gräwe und Burchard (2011) testeten ferner die Sensitivität der Sturmfluthöhen in Bezug auf einen vorgegebenen Meeresspiegelanstieg von 50 cm und eine Windgeschwindigkeitserhöhung von 4%. Bei diesen Vorgaben kommen sie zu der Erkenntnis, dass der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf den Anstieg der Sturmflutwasserstände größer ist als der Einfluss des Windstaus. Hundertjährige Wasserstände an den Pegeln Lübeck, Koserow und Geedser würden sich demnach von 2,10 auf 2,70 m erhöhen. Da ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm vorgegeben war, entfallen lediglich 10 cm der Wasserstandserhöhung auf den Windstau.

9.3 Kurz gesagt

Extreme Wasserstände an Nord- und Ostsee entstehen durch das Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren. Während der Anstieg des mittleren Meeresspiegels sowie Veränderungen im Windklima eine zentrale Rolle in beiden Randmeeren spielen, stellen Beiträge von Füllungsgrad oder Eigenschwingungen eine Besonderheit der Ostsee dar. Vertikale Landbewegungen spielen für die Küsten in beiden Meeren eine Rolle, sind jedoch im nördlichen Teil der Ostsee besonders ausgeprägt. Gezeiten und ihre Wechselwirkungen mit anderen Faktoren wie z. B. Stau oder Meeresspiegelanstieg spielen dagegen hauptsächlich in der

Nordsee eine Rolle. In beiden Meeren haben sich Sturmflutwasserstände in den letzten 100 Jahren im Wesentlichen infolge von mittleren Meeresspiegeländerungen erhöht. Der Meeresspiegel ist in diesem Zeitraum im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküsten um etwa 10–20 cm angestiegen. Sowohl für die Nord- als auch für die Ostsee wurden in der jüngsten Vergangenheit höhere Anstiegsraten ermittelt, die aber, verglichen mit historischen Raten, bisher jedoch noch nicht als außergewöhnlich anzusehen sind, sodass derzeit keine signifikante Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs zu erkennen ist. Die meteorologisch bedingten Anteile an den Extremwasserständen zeigen eine ausgeprägte Variabilität im Zeitbereich von Jahren bis zu einigen Jahrzehnten, jedoch ebenfalls bisher keine systematische Veränderung über längere Zeiträume. Aussagen zu zukünftigen Änderungen meteorologisch bedingter Anteile an Sturmflutwasserständen wie Windstau oder Seegang weisen erhebliche Bandbreiten auf, insbesondere als Folge von Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Änderungen im Windklima.

Literatur

- Albrecht F, Wahl T, Jensen J, Weisse R (2011) Determining sea level change in the German Bight. *Ocean Dynamics* 61(12):2037–2050
- Annutsch R (1977) *Der Seewart Nautische Zeitschrift für die deutsche Seefahrt. Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung* 38:185–204
- Arns A, Dangendorf S, Wahl T, Jensen J (2015) The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. *Coastal Engineering* 96:118–131. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.12.002
- Baerens Chr (1998): *Extremwasserstandereignisse an der Deutschen Ostseeküste*. Dissertation, FU Berlin, 163 S
- Christensen J, Hewitson B, Busiuc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli R, Kwon W-T, Laprise R, Rueda VM, Mearns L, Menéndez C, Räisänen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P (2007) Regional climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor M, Miller H (Hrsg) *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne GA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D, Unnikrishnan AS (2013) *Sea Level Change*. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Hrsg) *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Dangendorf S, Müller-Navarra S, Jensen J, Schenk F, Wahl T, Weisse R (2014) North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843. *J Climate* 27:3582–3595. doi:10.1175/JCLI-D-13-00427.1
- Debernhard J, Roed L (2008) Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas: a revisit. *Tellus A* 60:427–438. doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00312.x
- Emeis K, Beusekom J van, Callies U, Ebinghaus R, Kannen A, Kraus G, Kröncke I, Lenhart H, Lorkowski I, Matthias V, Möllmann C, Pätsch J, Scharfe M, Thomas H, Weisse R, Zorita E (2015) The North Sea – a shelf sea in the anthropocene. *Journal of Marine Systems* 141:18–33. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.03.012
- Flather R, Williams J (2000) Climate change effects on storm surges: methodology and results. In: Beersma J, Agnew M, Viner D, Hulme M (Hrsg) *Climate Scenarios for Water-related and Coastal Impact. ECLAT-2 Workshop Report*, Bd. 3., S 66–78

- Gaslikova L, Grabemann I, Groll N (2013) Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. *Nat Hazards* 66:1501–1518. doi:10.1007/s11069-012-0279-1
- Grabemann I, Weisse R (2008) Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. *Ocean Dynamics* 58:199–212
- Grabemann I, Groll N, Möller J, Weisse R (2015) Climate change impact on North Sea wave conditions: a consistent analysis of ten projections. *Ocean Dynamics* 65:255–267. doi:10.1007/s10236-014-0800-z
- Gräwe U, Burchard H (2011) Storm surges in the Western Baltic Sea: the present and a possible future. *Clim Dyn* 39:165–183. doi:10.1007/s00382-011-1185-z
- Grinsted A (2015) Changes in the Baltic Sea Level. In: BACC II (Hrsg) Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin
- Groll N, Grabemann I, Gaslikova L (2014) North Sea Wave Conditions: an analysis of four Transient Future Climate Realization. *Ocean Dynamics* 64:1–12. doi:10.1007/s10236-013-0666-5
- Günther H, Rosenthal W, Stawarz M, Carretero J, Gomez M, Lozano I, Serrano O, Reistad M (1998) The wave climate of the Northeast Atlantic over the period 1955–1994: the WASA wave hindcast. *Global Atmos Ocean Syst* 6:121–164
- Haigh ID, Nicholls RJ, Wells NC (2009) Mean sea-level trends around the English Channel over the 20th century and their wider context. *Continental Shelf Research* 29:2083–2098
- Hollebrandse F (2005): Temporal development of the tidal range in the southern North Sea, PhD, TU Delft,
- Horsburgh K, Wilson C (2007) Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *J Geophys Res* 112:C08003. doi:10.1029/2006JC004033
- Hünicke B (2010) Contribution of regional climate drivers to future winter sea-level changes in the Baltic Sea estimated by statistical methods and s of climate models. *Int J Earth Sci* 99:1721–1730. doi:10.1007/s00531-009-0470-0
- Hünicke B, Zorita E, Soomere T, Skovgaard Madsen K, Johansson M, Suursaar Ü (2014) Recent (mainly last 200 years) and current climate change Baltic Sea: Sea level and wind waves. In *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Springer,
- Hupfer P, Harff J, Sterr H, Stigge HJ (2003) Sonderheft: Die Wasserstände an der Ostseeküste, Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel. In: Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen (Hrsg) *Die Küste*, Bd. 66. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co, Heide i Holstein
- IPCC (2013) Working group I, Contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5), *Climate Change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge
- Jensen J, Mudersbach C (2004) Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Gönnert G, Graß H, Kelletat D, Kunz H, Probst B, von Storch H, Sündermann J (Hrsg.): *Klimaänderung und Küstenschutz*, Proceedings, Universität Hamburg
- Katsman CA, Sterl A, Beersma JJ, van den Brink HW, Hazeleger W et al (2011) Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta – the Netherlands as an example. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-011-0037-5
- Kauker F (1999) Regionalization of Climate Model Results for the North Sea. *Univ of Hamburg, Hamburg*, S 111
- Kauker K, Langenberg H (2000) Two Models for the Climate Change Related Development of Sea Levels in the North Sea – A Comparison. *Climate Res* 15:61–67
- Klein B, Mikolajewicz U, Sein D, Groeger M, Heinrich H, Rosenhagen G (2011) Der Anstieg des Meeresspiegels im 21. Jahrhundert. Poster KLIWAS-Statustagung.
- Koppe B (2013) Hochwasserschutzmanagement an der deutschen Ostseeküste. *Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen*, Heft 8, Dissertation Universität Rostock
- Krüger O, Schenk F, Feser F, Weisse R (2013) Inconsistencies between long-term trends in storminess derived from the 20th CR reanalysis and observations. *J Climate* 26:868–874
- Lampe R, Meyer M (2003) Wasserstandsentwicklungen in der südlichen Ostsee während des Holozäns. *Die Küste* 66:4–21
- Langenberg H, Pfizenmayer A, von Storch H, Sündermann J (1999) Storm-Related Sea Level Variations along the North Sea Coast: Natural Variability and Anthropogenic. *Change Continental Shelf Res* 19:821–842
- Liebsch 1997: Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielsetzungen. *Dissertation Universität Leipzig* (1997), 105 S
- Lowe J, Gregory J (2005) The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom. *Phil Trans R Soc A* 363:1313e1328. doi:10.1098/rsta.2005.1570
- Lowe J, Gregory J, Flather R (2001) Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Clim Dyn* 18:179–188
- Lowe JA, Howard TP, Pardaens A, Tinker J, Holt J, Wakelin S, Milne G, Leake J, Wolf J, Horsburgh K, Reeder T, Jenkins G, Ridley J, Dye S, Bradley S (2009) *UK Climate Projections Science Report: Marine and Coastal Projections*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK
- Madsen KS (2009): *Recent and Future Climatic Changes in Temperature, Salinity and Sea Level of the North Sea and the Baltic Sea*. (PhD thesis) Niels Bohr Institute, University of Copenhagen
- Meier HEM (2006) *Baltic Sea climate in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios*. *Clim Dynam* 27:39–68. doi:10.1007/s00382-006-0124-x
- Meier HEM, Broman B, Kjellström E (2004) Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Clim Res* 27(1):59–75
- Meinke I (1998): *Das Sturmflutgeschehen in der südwestlichen Ostsee – dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde*. Diplomarbeit am Fachbereich Geographie der Universität Marburg, 171 S
- Meinke I (1999) *Sturmfluten in der südwestlichen Ostsee – dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde*. *Marburger Geographische Schriften* 134:1–23
- Menéndez M, Woodworth PL (2010) Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *J Geophys Res Oceans* 115:C10011
- Mudersbach C, Jensen J (2008): *Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste*. In: *Abschlussbericht 1.4 KFKI-VERBUNDPROJEKT Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)*
- Mudersbach C, Wahl T, Haigh I, Jensen J (2013) Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes. *Continental Shelf Res* 65, 111–120 (online first)
- Müller M, (2011) Rapid change in semi-diurnal tides in the North Atlantic since 1980. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11602 doi: 10.1029/2011GL047312
- Nielsen JEØ, Drange H, Richter K, Jansen E, Nesje A (2012) Changes in the past, present and future sea level on the coast of Norway. *NERSC Special Report*, Bd. 89. Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen, S 48
- Pickering M, Wells N, Horsburgh K, Green J (2011) The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides. *Continental Shelf Res* 35:1–15
- Plüß A (2006) *Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe*. In: Gönnert G, Grassl H, Kellat D, Kunz H, Probst B, von Storch H, Sündermann J (Hrsg) *Klimaänderung und Küstenschutz*. Proceedings
- Pugh D (2004) *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press, Cambridge
- Pugh DT, Woodworth PL (2014) *Sea-level science: understanding tides, surges tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press, Cambridge
- Richter A, Groh A, Dietrich R (2012) Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region. *Physics and Chemistry of the Earth* 53–54:43–53. doi:10.1016/j.pce.2011.04.011
- Rossiter JR (1958) *Storm Surges in the North Sea*, 11 to 30 December 1954. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 251(991):139–160. doi:10.1098/rsta.1958.0012
- Simpson M, Breili K, Kierulf HP, Lysaker D, Ouassou M, Haug E (2012) *Estimates of future sea-level changes for Norway*. Technical Report of the Norwegian Mapping Authority
- Slangen ABA, Katsman CA, van de Wal RSW, Vermeersen LLA, Riva REM (2012) *Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios*. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-011-1057-6

Literatur

- Sterl A, van den Brink H, de Vries H, Haarsma R, van Meijgaard E (2009) An ensemble study of extreme storm surge related water levels in the North Sea in a changing climate. *Ocean Sci* 5:369–378
- Stigge H-J (1993) Sea level change and high water probability on the German Baltic Coast. International Workshop, Sea Level Changes and Water Management 19–23 April 1993. Noordsdwijerhout Nederlands: pp. 19–29, Hamburg, S 19–23
- Storch H von, Reichardt H (1997) A scenario of storm surge statistics for the German Bight at the expected time of doubled atmospheric carbon dioxide concentration. *J Climate* 10:2653–2662
- Vikebø F, Furevik T, Furnes G, Kvamstø N, Reistad M (2003) Wave height variations in the North Sea and on the Norwegian Continental Shelf, 1881–1999. *Cont Shelf Res* 23:251e263
- Wahl T, Jensen J, Frank T (2010) On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10:171–179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010
- Wahl T, Haigh I, Woodworth PL, Albrecht F, Dillingh D, Jensen J, Nicholls R, Weisse R, Wöppelmann G (2013) Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. *Earth Science Reviews* 124:51–67
- Wanninger L, Rost C, Sudau A, Weiss R, Niemeier W, Tengen D, Heinert M, Jahn C-H, Horst S, Schenk A (2009) Bestimmung von Höhenänderung im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken. *Die Küste* 76:121–180
- WASA (1998) Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? *Bull Amer Met Soc* 79:741–760
- Weidemann H (2014): Klimatologie der Ostseewasserstände: Eine Rekonstruktion von 1949–2011. Dissertation Universität Hamburg
- Weisse R, Günther H (2007) Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958–2002. *Ocean Dynamics* 57:161–172
- Weisse R, Plüß A (2006) Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958–2002. *Ocean Dynamics* 56:16–25
- Weisse R, Storch H von (2009) Marine Climate and Climate Change. Storms, Wind Waves and Storm Surges. Springer Praxis 219:1
- Weisse R (2011) Das Klima der Region und mögliche Änderungen in der Deutschen Bucht. In: von Storch H, Claussen M (Hrsg.) Klimabericht für die Metropolregion Hamburg. Springer Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 978-3-642-16034-9, 91–120
- Weisse R, Storch H von, Niemeyer H, Knaack H (2012) Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? *Ocean and Coastal Management* 68:58–68
- Woodworth PA (2010) Survey of recent changes in the main components of the ocean tides. *Cont. Shelf Res* 30:1680–1691
- Woodworth PL, Shaw SM, Blackman DB (1991) Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. *Geophysical Journal International* 104(3):593–610
- Woodworth PL, Teferle FN, Bingley RM, Shennan I, Williams SDP (2009) Trends in UK mean sea level revisited. *Geophysical Journal International* 176(22):19–30. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03942.x
- Woth K (2005) North Sea storm surge statistics based on projections in a warmer climate: How important are the driving GCM and the chosen emission scenario? *Geophys Res Lett* 32:L22708. doi:10.1029/2005GL023762
- Woth K, Weisse R, Storch H von (2006) Climate change and North Sea storm surge extremes: An ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different Regional Climate Models. *Ocean Dynamics* 56:3–15. doi:10.1007/s10236-005-0024-3

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.