

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Rudolph, Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Meyer, Elke; Möller, Thomas; Tinz, Birger; Weisse, Ralf

Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) (Hg.)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107399>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Rudolph, Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Meyer, Elke; Möller, Thomas; Tinz, Birger; Weisse, Ralf (2019): Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung. In: Die Küste 87. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 47-73. <https://doi.org/10.18171/1.087111>.

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.



Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung

Elisabeth Rudolph¹, Tabea Brodhagen², Natacha Fery³, Lidia Gaslikova⁴, Iris Grabemann⁴, Elke Meyer⁴, Thomas Möller³, Birger Tinz³, Ralf Weisse⁴

¹ Bundesanstalt für Wasserbau, elisabeth.rudolph@baw.de

² Bundesanstalt für Wasserbau

³ Deutscher Wetterdienst

⁴ Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Zusammenfassung

Kenntnisse über mögliche Auswirkungen schwerer Sturmfluten sowie mögliche Änderungen im Zuge eines anthropogenen Klimawandels sind für die Planung des Küstenschutzes von großer Bedeutung. In EXTREMENESS werden aus einem umfangreichen Datensatz bestehend aus Reanalysen, Hindcasts und Klimaprojektionen für die Fokusregion Emsästuar Sturmflutereignisse extrahiert, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich aber potentiell mit extremen Konsequenzen verbunden sein könnten. Diese ausgewählten extremen Sturmfluten sowie ihr Potential für eine mögliche Verstärkung durch z. B. unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen Tidephase und Windentwicklung oder durch einen Meeresspiegelanstieg werden mit numerischen Modellen für die Nordsee und die Ästuare von Ems und Elbe untersucht und Sturmflutkenngößen entlang der Ästuare und besonders für die Region Emden analysiert.

Schlagwörter

Extreme Sturmfluten, Nordsee, Elbeästuar, Emsästuar, Meeresspiegelanstieg, Abfluss

Summary

Information about the impact of very severe storm tides and the possible changes that may occur due to anthropogenic climate change is required for planning of coastal protection. In EXTREMENESS a huge number of datasets containing reanalyses, hindcasts and climate change projections is searched for storm tides in the Ems estuary that are highly unlikely but are potentially linked with extreme consequences. Variations of boundary conditions e.g. tidal phase relative to the development of the wind or sea level rise are used to assess the potential for even more severe realizations of these storm tides. Numerical models of the North Sea and the estuaries of Ems and Elbe are used to analyze the extreme storm tides in detail.

Keywords

extreme storm tides, North Sea, Elbe estuary, Ems estuary, sea level rise, fresh water discharge

1 Einleitung

Sturmfluten in der Nordsee sowie in der Deutschen Bucht und den angrenzenden Ästuaren können großen Schaden verursachen und das Leben der Bewohner der Küstengebiete gefährden. Nach den verheerenden Sturmfluten in der Nordsee vom 31. Januar/1. Februar 1953 und vom 16./17. Februar 1962, die zu großen Überflutungen führten und über tausend Todesopfer forderten, wurde der Küstenschutz für die niedrig gelegenen Küstengebiete grundlegend verbessert (siehe z. B. Küstenausschuß Nord- und Ostsee 1962). Die Sturmfluten vom 3. Januar 1976 und vom 1. November 2006, die die höchsten beobachteten Wasserstände in Elbe bzw. Ems erreichten, verursachten deutlich geringere Schäden. Aber weiterhin besteht für den Küstenschutz permanent die Herausforderung, die küstennahen Gebiete vor Sturmfluten heute aber auch zukünftig vor dem Hintergrund eines Klimawandels zu schützen.

Im Projekt MUSE (Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste, Jensen et al. 2006) wurde nach heute möglichen Sturmflutereignissen mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit gesucht. Hierfür wurde mit dem Ensemble-Vorhersagesystem (Ensemble Prediction System, EPS) des EZMW (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) nach zusätzlichen möglichen Stürmen in Wettervorhersagen gesucht, die zu Sturmfluten in der Deutschen Bucht führen könnten. Diese physikalisch möglichen Wetterentwicklungen wurden als Randwerte für die Sturmflutmodellierung mit einem Nordseemodell verwendet. In MUSE konnten für die Deutsche Bucht zusätzliche heute mögliche Sturmfluten mit Wasserständen gefunden werden, die die heute bekannten höchsten Wasserstände übertreffen.

Im Projekt XtremRisK (Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten, Oumeraci et al. 2012) wurde u. a. die Bedeutung der in MUSE unter heutigen klimatischen Bedingungen gefundenen extremen Sturmfluten für das Elbeästuar untersucht. Um mögliche Folgen des Klimawandels zu berücksichtigen, wurde zusätzlich der Einfluss eines Meeresspiegelanstieges in der Nordsee von 80 cm auf die Sturmflutscheitelwasserstände im Elbeästuar betrachtet.

Die Risiken von Sturmfluten bleiben bestehen und können sich vor dem Hintergrund eines anthropogenen Klimawandels weiter verschärfen. Das hier vorgestellte Projekt EXTREMENESS (Extreme North Sea storm surges and their consequences, EXTREMENESS Gruppe 2019) verfolgt das Ziel, extreme Sturmflutereignisse an der deutschen Nordseeküste in atmosphärischen und meteo-marinen Modelldatensätzen ausfindig zu machen, die zum einen extrem unwahrscheinlich, zum anderen aber trotzdem physikalisch plausibel und möglich sind und die mit extremen Schäden oder Auswirkungen verbunden sein könnten.

Während die Untersuchungen in MUSE und XtremRisK auf Sturmfluten im heutigen Klima basierten, werden in EXTREMENESS neben Reanalysen und Hindcasts zusätzlich auch Projektionen für mögliche zukünftige Klimaentwicklungen und somit ein sehr umfangreiches Datenmaterial genutzt. Die in EXTREMENESS verwendeten meteo-marinen Klimaprojektionen enthalten keinen Anstieg des mittleren Meeresspiegels, die Wasserstandsänderungen und -schwankungen beruhen auf entsprechenden Änderungen der meteorologischen Bedingungen. Zwar sind Aussagen über mögliche zukünftige Änderungen der Sturmaktivität noch unsicher (z. B. Feser et al. 2015), allerdings zeigen beispielsweise

die jährlichen maximalen Windstauhöhen in den verwendeten CMIP3 Klimaprojektionen in der Deutschen Bucht neben starken Schwankungen keine signifikanten Trends von 1961 bis 2100 (Gaslikova et al. 2013). Daher wird im Folgenden angenommen, dass die ausgewählten Sturmflutereignisse unabhängig von ihrem individuellen Zeitpunkt des Auftretens sowohl heute als auch in der Zukunft vorkommen könnten.

Fokusregion für die Sturmflutuntersuchungen in EXTREMENESS ist das Emsästuar (siehe Abbildung 1 rechts unten). Je nach Zugbahn des Sturmtiefs über die Nordsee können sich Stürme an den Küstenabschnitten der Deutschen Bucht unterschiedlich auswirken. Daher wird vergleichend zum Emsästuar auch das Elbeästuar (siehe Abbildung 1 rechts oben) betrachtet, um die lokal unterschiedlichen Auswirkungen der ausgewählten Sturmflutereignisse abschätzen zu können.

Ausgehend von der oben genannten großen Modelldatenbasis für die Nordsee wird in EXTREMENESS eine Reihe extremer Sturmflutereignisse für Borkum identifiziert. Für ausgewählte extreme Ereignisse wird eine mögliche Verstärkung mit einem Modell für die Nordsee einschließlich des Nordostatlantiks (Nordsee-Modell, Abbildung 1, links) durch Ensemble-Simulationen getestet, wobei als möglicher Verstärkungsmechanismus z. B. die Auswirkung einer zeitliche Verschiebung der Windentwicklung gegenüber der Tidephase analysiert wird. Daten aus den Simulationen mit den höchsten Wasserständen für Borkum bilden die Randwerte einer detaillierteren Untersuchung der Sturmflutereignisse in den Ästuaren von Ems und Elbe mit einem Modell für die Deutsche Bucht einschließlich ihrer Ästuare (Deutsche-Bucht-Modell, Abbildung 1 rechts). Als weitere mögliche Verstärkung der Sturmflutereignisse werden eine Erhöhung des Abflusses in die Ästuare sowie ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 50 cm und 100 cm, vorgegeben auf dem Modellrand zur Nordsee, untersucht. Die Analyse des Sturmflutscheitelwasserstandes auf Profilen entlang der Fahrrinnenmitte in den Ästuaren ermöglicht die Abgrenzung der Einflussbereiche von Meeresspiegelanstieg oder Abfluss für die Höhe der Sturmflutwasserstände. Im Weiteren dienen die aus diesen Untersuchungen resultierenden Ergebnisse für die Region Emden zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Küstenschutz und das Küstenschutzmanagement (Schaper et al. 2019).

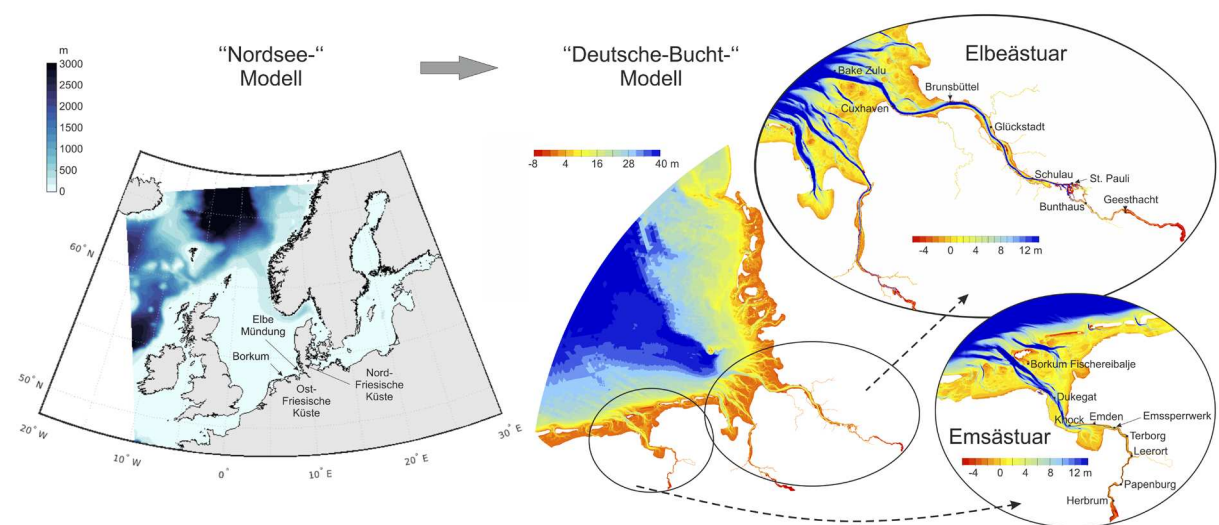


Abbildung 1: Modellgebiete mit Bathymetrie für das „Nordsee“- und das „Deutsche-Bucht“-Modell mit vergrößerten Darstellungen der Ästuare von Ems und Elbe.

2 Datenbasis für die Auswahl von Extremereignissen

Die aus Hindcasts, Reanalysen und Klimaprojektionen bestehende Datenbasis aus Modelldaten umfasst sowohl rein meteorologische als auch meteo-marine Datensätze, die neben den atmosphärischen Daten u. a. auch Wasserstandsdaten enthalten.

Um aus den meteorologischen Modelldatensätzen nicht nur die extremen Stürme herauszufiltern, sondern auch auf dadurch erzeugte Sturmfluten zu schließen, wurde die Methode des „effektiven Winds“ genutzt. Der effektive Wind (Koziar und Renner 2005) ist eine Projektion des Windes in 10 m Höhe auf die Windrichtung, bei der der Effekt des Windes auf den Wasserstand an der Küste am größten ist. In der Deutschen Bucht kommt der effektive Wind aus nordwestlicher Richtung und variiert entlang der deutschen Nordseeküste zwischen 295° und 315° .

Da in EXTREMENESS der Fokus der Untersuchungen auf der ostfriesischen Küste mit Borkum und der Emsmündung lag, wurden aus den Modelldatensätzen Zeitreihen stündlicher Wind- bzw. Wasserstandswerte für den für Borkum jeweils am nächsten liegenden Modellgitterpunkt extrahiert. Dieser Ort wird im Folgenden als „Borkum“ bezeichnet.

Aus der Liste der extremen Sturmereignisse, ermittelt an Hand der Zeitreihen des effektiven Windes (vgl. Abschnitt 2.1), und der Liste von Sturmfluten, die aus den meteo-marinen Datensätzen an Hand der Zeitreihen des Wasserstands ermittelt wurden (vgl. Abschnitt 2.2), wurden die Ereignisse ausgewählt, die für die weitere Analyse genutzt und auf ihr mögliches Verstärkungspotential untersucht wurden (vgl. Abschnitt 3.1).

Neben den Zeitreihen für Borkum wurden auch entsprechende Zeitreihen für die äußere Elbemündung extrahiert, um die Effekte der originalen und die der verstärkten Sturmereignisse an diesen beiden Küstenabschnitten im Vergleich zu analysieren. Dieser Ort in der äußeren Elbemündung wird im Folgenden als „Elbemündung“ bezeichnet.

2.1 Atmosphärische Datensätze

Die genutzten meteorologischen Datensätze umfassen zusammen mehr als 12.000 Modelljahre und beinhalten u. a. bekannte Reanalysen wie COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015), NOAA-20CR (Compo et al. 2011), ERA-40 (Uppala 2005), ERA-Interim (Dee et al. 2011), ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S) (017), COSMO_CLM/NCEP (Rockel 2008, Hollweg et al. 2008) und NCEP/SN_REMO (Feser et al. 2001, Kalnay et al. 1996) und Daten aus dem Projekt OptempS-MohoWif (Brecht und Frank 2014). Des Weiteren wurden 24 Klimaprojektionen ausgewertet, denen die globalen Klimamodelle ECHAM5 (Röckner et al. 2003), ECHAM6 (Stevens et al. 2013), HadGEM2 (Collins et al. 2011), GFDL (GFDL Team 2004) und EC-Earth (Hazeleger 2010) und verschiedene, repräsentative Emissionsszenarien der weiteren Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Representative Concentration Pathways RCP 2.6, 4.5 und 8.5, van Vuuren 2011) zugrunde liegen.

Aus diesen Datensätzen wurden Zeitreihen extrahiert und die höchsten Sturmereignisse an Hand des effektiven Windes größer dem 99,99 Perzentil für Borkum für eine Windrichtung von 315° und für Cuxhaven für eine Windrichtung von 295° identifiziert. Die durch den effektiven Wind ermittelten Sturmflutereignisse wurden für Borkum entsprechend ihrer Stärke eingeordnet.

Die Methode des lokalen effektiven Windes ermöglicht eine schnelle Ermittlung von Sturmereignissen für ausgewählte Orte in der Deutschen Bucht aus umfangreichen Datensätzen, die potentiell zu hohen Wasserständen an der Küste führen können. Allerdings müssen mit diesen Sturmereignissen nicht immer hohe Sturmtiden einhergehen. Durch den effektiven Wind können auch einzelne Sturmereignisse identifiziert werden, die keine hohen Sturmtiden erzeugen. An Hand eines Datensatzes, bestehend aus Wind- und Wasserstandsdaten für Borkum, zeigte sich, dass die Höhe des effektiven Windes alleine nicht immer ausreicht, um zu bestimmen, ob durch den betreffenden Sturm hohe Wasserstände verursacht werden oder nicht. Hoher effektiver Wind, der nur kurz anhält, erzeugt in der Regel keine extremen Wasserstände. Andererseits kann es in einzelnen Fällen auch bei mittelhohem effektiven Wind zu hohen Wasserständen in der Deutschen Bucht kommen, wenn z. B. Fernwellen einen zusätzlichen Beitrag zum Gesamtwasserstand liefern (Ganske et al. 2018).

2.2 Meteo-marine Datensätze

Zusätzlich zu den in 2.1 beschriebenen meteorologischen Datensätzen, wurden meteo-marine Modelldatensätze analysiert, für die bereits modellierte Wasserstände einschließlich der zugrundeliegenden meteorologischen Bedingungen vorliegen. Diese Datensätze erlauben eine direkte Identifikation extremer Sturmflutereignisse.

Die zwei hydrodynamischen Hindcasts (1958-2002 (Weisse und Plüß 2006) bzw. 1948-2016 (Weisse et al. 2014, Weisse et al. 2015)) basieren auf regionalisierten globalen NCEP-NCAR Reanalysen (Kalnay et al. 1996, Kistler et al. 2001).

Den sechs mit dem hydrodynamischen Modell TRIM-NP (vgl. Abschnitt 3.2.1) simulierten Klimaprojektionen (1961-2100, 1971-2100 bzw. Zeitscheiben 1971-2000 und 2071-2100) liegen regionalisierte globale atmosphärische CMIP3 Klimaprojektionen, basierend auf den Emissionsszenarien A1B und B1 sowie CMIP5 Projektionen basierend auf dem Szenario RCP8.5 zugrunde (zu Emissionsszenarien siehe z. B. Nakicenivic und Swart 2000, Houghton et al. 2001, Stocker et al. 2013, Taylor et al. 2010). Diese atmosphärischen Klimaprojektionen wurden mit verschiedenen globalen und regionalen Zirkulationsmodellen und unterschiedlichen Anfangsbedingungen simuliert (Globalmodelle: ECHAM5-MPIOM, z. B. Röckner et al. 2003, EC-EARTH, z. B. Hazeleger et al. 2010 und CMCC, z. B. Scoccimarro et al. 2011; Regionalmodelle: verschiedene Versionen von CCLM, z. B. Rockel et al. 2008 und RCA4, z. B. Samuelsson et al. 2011). Eine detaillierte Beschreibung der vier Wasserstandssimulationen für die Szenarien A1B und B1 mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen und derjenigen für RCP8.5 sind in Gaslikova et al. (2013) und Gaslikova et al. (2016) zu finden.

In den Klimaprojektionen beruhen die Wasserstandsschwankungen in der Nordsee auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen, ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels ist nicht berücksichtigt. Des Weiteren sind in den Hindcasts und den Klimaprojektionen keine im Laufe der Zeit möglichen Änderungen der Bathymetrie der Nordsee einschließlich der Wattgebiete berücksichtigt.

3 Auswahl und Modellierung extremer Sturmflutereignisse

3.1 Auswahl extremer Sturmflutereignisse

In einem transdisziplinären Ansatz wurde zusammen mit Stakeholdern in der Region Emden herausgearbeitet, was diese unter extremen Sturmflutereignissen verstehen (Schaper et al. 2019). Basierend auf diesen Ergebnissen, wurden aus extrahierten Sturmfluten für Borkum die jeweils extremsten Ereignisse für jeden der drei folgenden Fälle ausgewählt und für die weiteren Analysen zugrunde gelegt:

- die Sturmflut mit dem absolut höchsten Wasserstand (Hohe Flut, HF)
- die Sturmflutserie (SFS) mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche
- die Sturmflut mit der längsten Dauer von Wasserständen über dem mittleren Tidehochwasser (Lange Flut, LF). Dieses Ereignis stellt gleichzeitig das erste Ereignis der Sturmflutserie dar und wird im Folgenden als Teil dieser Serie behandelt

Die Hohe Flut (Abbildung 2 oben) mit einem maximalen Wasserstand von NHN +4,73 m wurde in einer der Klimaprojektionen basierend auf dem Emissionsszenario B1 (Februar 2030) gefunden. Die Sturmflutserie, die gleichzeitig als Lange Flut auch das zweithöchste Ereignis mit einem maximalen Wasserstand von NHN +4,66 m enthält (Abbildung 2 unten), wurde aus einer der Klimaprojektionen basierend auf dem Szenario A1B (November 2030) herausgefiltert.

Beide Extremereignisse stammen aus meteo-marinen Klimaprojektionen, die keinen Meeresspiegelanstieg enthalten. Beruhend auf Änderungen im Windklima zeigen die jährlichen maximalen Wasserstände in diesen Projektionen für Borkum starke Variationen ohne signifikante Trends von 1961 bis 2100 (Abbildung 3). Daher wird davon ausgegangen, dass diese Ereignisse prinzipiell sowohl in der Zukunft, als auch bereits heute möglich sein könnten.

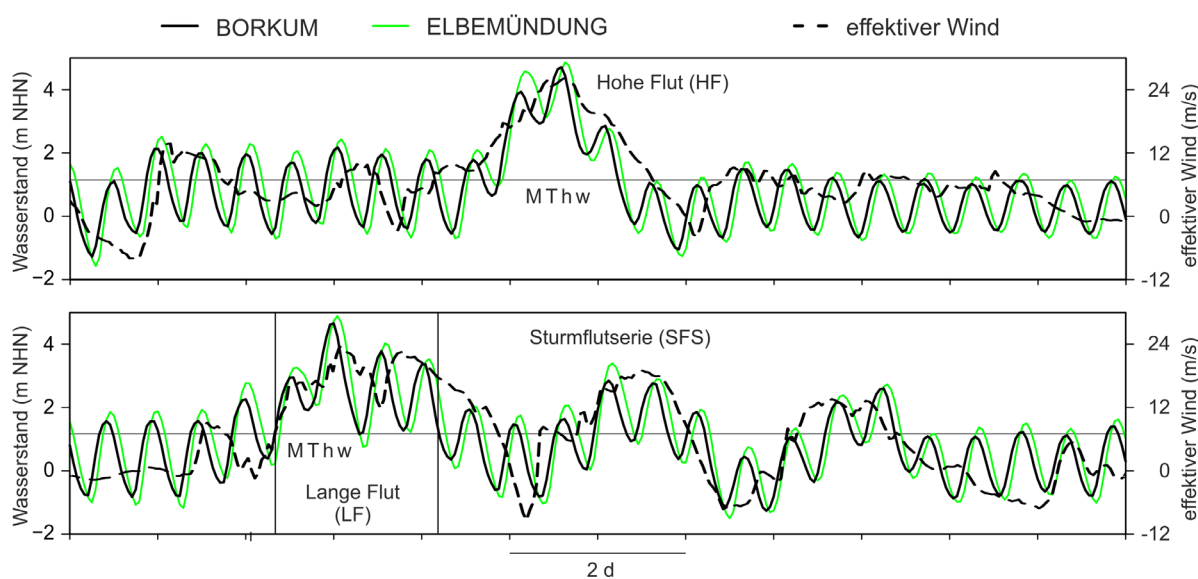


Abbildung 2: Zeitreihen des Wasserstands für die ausgewählten Ereignisse Hohe Flut (HF, oben) und Lange Flut/Sturmflutserie (LF/SFS, unten) aus den Originalmodell Datensätzen für Borkum (schwarz) und Elbemündung (grün) zusammen mit einer Zeitreihe des effektiven Winds für Borkum (schwarz gestrichelt).

Der höchste beobachtete Wasserstand bei Borkum von NHN +4.06 m (NLWKN 2010) trat während der Sturmflut vom 13. März 1906 auf. Die zweit- und dritthöchsten Wasserstände von NHN +3,83 m und NHN +3,80 m wurden während der Sturmfluten vom 1. November 2006 und vom 6. Dezember 2013 gemessen (DGJa 2014). Die Hohe Flut (HF) mit einem maximalen Wasserstand von NHN +4,73 m und die Lange Flut (LF) mit NHN +4,66 m übertreffen damit das beobachtete Hochwasser vom 13. März 1906 um ca. 60 bis 70 cm. Somit sind die beiden ausgewählten simulierten Ereignisse auch bereits ohne weitere potentielle Verstärkung deutlich höher als die bisher beobachteten Ereignisse.

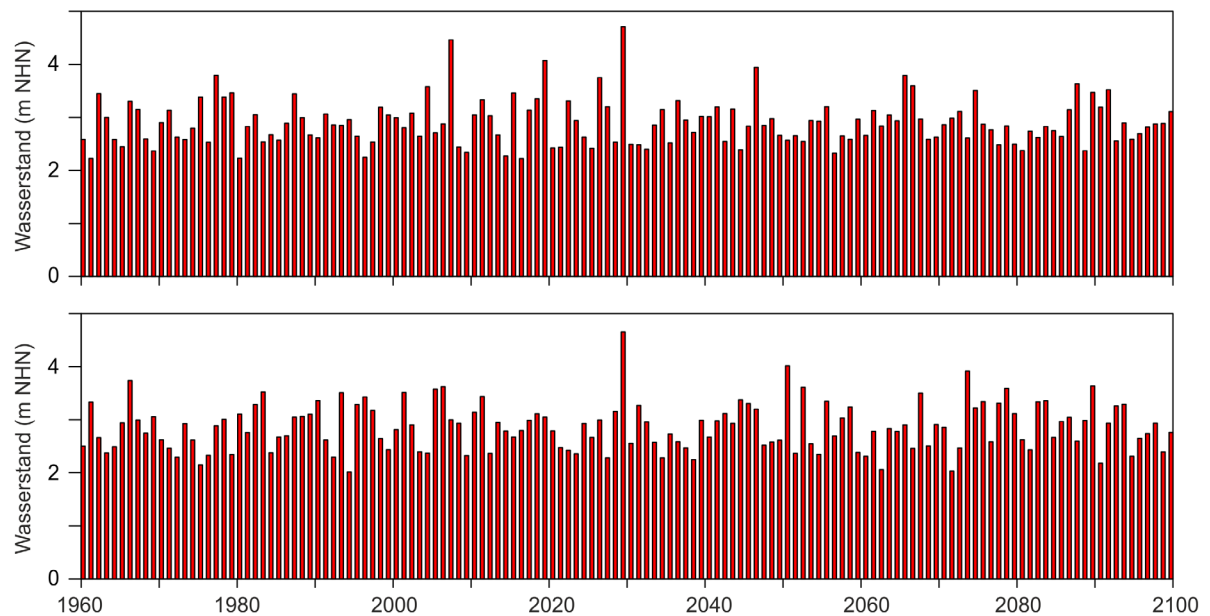


Abbildung 3: Zeitreihen des simulierten jährlichen maximalen Hochwassers für Borkum zwischen 1961 und 2100 für Klimaprojektionen basierend auf den Emissionsszenarien B1 (oben) und A1B (unten). Das Hochwasser 2030 im oberen Bild gibt die Hohe Flut und das Hochwasser 2030 im unteren Bild Lange Flut wieder.

Zur Einordnung der ermittelten Werte wurde zusätzlich ein Vergleich mit in MUSE ermittelten Sturmflutscheiteln vorgenommen. Der in MUSE gefundene höchste Wasserstand betrug bei Borkum NHN +4,99 m für eine Variante der Sturmflut vom Januar 1976 (Jensen et al. 2006).

Um zu untersuchen, ob HF und LF/SFS noch extremer hätten ausfallen können, wurden Ensemble-Simulationen mit dem Modell TRIM-NP (siehe Abschnitt 3.2.1) für die Nordsee einschließlich Nordostatlantik (vgl. Modellgebiet in Abbildung 1) durchgeführt, in denen Auswirkungen der Wechselwirkungen zwischen astronomischer Tide und Windfeld betrachtet wurden. Des Weiteren wurden daran anschließend hochaufgelöste Simulationen der Deutschen Bucht einschließlich der Ästuar durchgeföhrt, um die Auswirkungen der Ereignisse dort genauer zu untersuchen.

Neben den Sturmfluten aus den Modelldatensätzen wurde auch die historische Sturmflut vom März 1906 untersucht, die bei Borkum zu den höchsten bisher beobachteten Wasserständen führte. Um zu einer Abschätzung zu gelangen, wurde auf ein von Rosenhagen und Bork (2009) entwickeltes Verfahren zurückgegriffen. Aus durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) digitalisierten historischen Wetteraufzeichnungen wurden Wetterkarten erstellt, die wiederum beim Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) digitalisiert wurden. Basierend auf den daraus abgeleiteten Druckgradienten wurden geostrophische Windfelder

und mit Hilfe einer Parametrisierung von Hasse (1974) bodennahe Windfelder berechnet. Diese Windfelder dienten als Antrieb für die mit TRIM-NP durchgeführten Wasserstandssimulationen (vgl. Kapitel 3.2.1). Mit den so ermittelten Windfeldern konnten die 1906 beobachteten Wasserstände reproduziert werden. Zusätzlich wurden Windfelder aus der 20 Century Reanalyse 2c (20CR, Compo et al. 2011) und den ERA-CLIM Projekten als Antrieb für Wasserstandssimulationen mit TRIM-NP genutzt. Simulationen von einzelnen Ensemble-Membren, angetrieben mit 20CR-Daten, reproduzierten nahezu den 1906 beobachteten Wasserstand. Insgesamt sind die Windgeschwindigkeiten aus den Reanalyseprojekten niedriger als die nach Hasse berechneten. Die Ursache hierfür ist vermutlich die unterschiedliche Parametrisierung der Grenzschicht bzw. Bodenrauigkeit der verschiedenen Methoden und die vergleichsweise wenigen zu Beginn des 20. Jahrhunderts in die Reanalyse eingehenden Daten. Die Sturmflut 1906 war während einer Springtide aufgetreten und ihr Verstärkungspotential gering. Insbesondere lagen die Wasserstände nicht über denen der ausgewählten Hohen Flut (HF).

3.2 Modellbeschreibung

3.2.1 Nordsee-Modell

Die Ensemble-Simulationen, die zur Untersuchung einer möglichen Verstärkung der ausgewählten extremen Sturmflutereignisse HF und LF/SFS durchgeführt wurden, wurden ebenso wie die Simulationen der originalen Ereignisse mit dem hydrodynamischen Modell TRIM-NP erzeugt, um die Ergebnisse der Ensemble-Simulationen direkt mit den originalen Ereignissen vergleichen zu können. Das hier im 2D-Modus genutzte Modell TRIM-NP (Nested und Parallelized, Kapitza und Eppel 2000, Pätsch et al. 2017) basiert auf dem Modell TRIM (Tidal Residual Intertidal Mudflat) von Casulli und Cattani (1994). Das Modellgebiet (Abbildung 1) mit einer Auflösung von 12,8 km x 12,8 km und ohne Nesten feinerer Gitter umfasst die Nordsee und angrenzende Teile des Nordostatlantiks. Durch Einbeziehen des Nordostatlantiks werden Fernwellen berücksichtigt. Das Modell löst die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen auf einem regulären Arakawa-C-Gitter mit kartesischen Koordinaten, wobei tidebedingtes Trockenfallen und Überfluten küstennaher Gitterpunkte gewährleistet ist. Felder des 10-m-Winds und des bodennahen Luftdrucks dienen als Antrieb für die Simulationen des Wasserstands. Hier wurden die Wind- und Luftdruckfelder aus den ursprünglichen Simulationen für HF und LF/SFS (Klimaprojektionen für B1 und A1B) genutzt. Der Einfluss des Windes wird durch eine Parametrisierung von Smith und Banke (1975) berücksichtigt, die ursprünglich auf Windgeschwindigkeitsmessungen zwischen 3 und 21 m/s beruht. Jensen et al. (2006) zeigten, dass diese Parametrisierung für die Nordsee auch bei höheren Windgeschwindigkeiten während Sturmfluten angewendet werden kann. Des Weiteren wurden an den offenen Rändern des Modellgebiets astronomische Tiden aus dem FES-Atlas (Lyard et al. 2006) vorgegeben. Die Ausgabe der Wasserstände und weiterer Parameter erfolgte bei den Ensemble-Simulationen alle 20 Minuten. In Gaslikova et al. (2013) und Weisse et al. (2014) sind eine ausführlichere Beschreibung der ursprünglichen Wasserstandssimulationen mit TRIM-NP und des Modells zu finden. Erläuterungen zur Kalibrierung und Validierung geben Gaslikova et al. (2013) sowie Pätsch et al. (2017).

3.2.2 Deutsche-Bucht-Modell

Für die hochaufgelöste Simulation der Sturmflutereignisse in der Deutschen Bucht und den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems wird das hydrodynamisch numerische Verfahren UnTRIM² (Casulli 2008, Casulli und Stelling 2010) verwendet. Das auf der Methode der finiten Differenzen/finiten Volumen basierende drei-dimensionale mathematische Verfahren UnTRIM² löst die Flachwassergleichungen und die Transportgleichung für Salz auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitternetz. Grundlage des Verfahrens sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls darstellen. Der Einsatz der SubGrid Technologie ermöglicht, die Modelltopographie mit einer höheren Auflösung zu berücksichtigen als das Rechengitter (Sehili et al. 2014). Dies erlaubt sowohl eine gute Abbildung des Wasservolumens in den Flachwassergebieten der inneren Deutschen Bucht und der Ästuarie als auch eine detaillierte Modellierung des Trockenfallens und Überflutens von Wattflächen ohne zusätzliche Verfeinerung des Gitters. Das mathematische Verfahren UnTRIM² eignet sich deshalb besonders für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Überfluten und Trockenfallen.

Das Deutsche-Bucht-Modell (siehe Abbildung 1 rechts) umfasst das Gebiet der inneren Deutschen Bucht von Terschelling in den Niederlanden bis Hvide Sande in Dänemark sowie die Ästuarie der Ems bis zum Küstenkanal, der Weser bis Intschede und der Elbe bis Blekede. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wird angenommen, dass die Wehre Herbrum und Bollingerfähr in der Ems, Hemelingen in der Weser und Geesthacht in der Elbe im Untersuchungszeitraum gelegt sind. Die landseitige Modellgrenze wird durch den heutigen Verlauf der Deichlinie gebildet. Diese Deichlinie kann im Modell nicht überflutet werden oder brechen. Die Nebenflüsse von Ems, Weser und Elbe sind in der Modelltopographie enthalten, während der Sturmflutuntersuchungen sind sie jedoch durch geschlossene Sturmflutsperrwerke geschützt. Die Wahl dieses Modellgebietes ermöglicht es, die Auswirkungen von ausgewählten Sturmfluten in Ems und Elbe vergleichend zu betrachten.

Die Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht und in den Ästuaren wird bestimmt durch die Wasserstandsentwicklung auf dem Rand zur Nordsee, den Wind über dem Modellgebiet und den Abflüssen aus dem Binnenbereich in die Ästuarie. Für die hier vorgestellte Untersuchung werden die bereits in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Windfelder verwendet, die auch für die Nordseemodellierung eingesetzt werden. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird wie in TRIM-NP mit dem von Smith und Banke (1975) vorgeschlagenen Koeffizienten parametrisiert. Am binnenseitigen Ende der Ästuarie wird der Abfluss vorgegeben. Für die untersuchten extremen Sturmflutereignisse wird für Ems, Weser und Elbe ein konstanter mittlerer Abfluss MQ (Ems: 80 m³/s, Weser: 324 m³/s und Elbe: 714 m³/s, DGJb 2018 und DGJc 2015) gewählt. Auf dem offenen Rand zur Nordsee wird die Wasserstandsentwicklung aus den Modellergebnissen des Nordsee-Modells übernommen. Der Salzgehalt auf dem Rand zur Nordsee wird mit 33, einem für dieses Nordseegebiet charakteristischen Wert (BSH 2016), vorgegeben.

Das Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum ist in der SubGrid-Topographie abgebildet (Abbildung 1) und kann während der Simulation der Sturmflutereignisse gesteuert werden. In Abwägung der Belange des Küstenschutzes und des Naturschutzes soll das Emsperrwerk vor Sturmfluten schützen, die Wasserstände höher als NHN +3,70 m erreichen. Das Sperrwerk wird bei einem Wasserstand von NHN +3,50 m bei Gandersum

geschlossen und wieder geöffnet, sobald der Binnen- und der Außenwasserstand gleich sind. Um die Schutzfunktion des Sperrwerkes auch bei einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 100 cm zu gewährleisten, wird die Höhe der Sperrwerktoore von NHN +7 m bzw. NHN +8 m in der Natur auf NHN +9 m im Deutsche Bucht Modell angehoben. Kalibrierung und Validierung des Modells sind im FuE Bericht EXTREMENESS-C (BAW 2020) dargestellt.

3.3 Modelluntersuchungen zur potentiellen Verstärkung der ausgewählten Sturmtiden in der Nordsee

Je nach Auftreten des astronomischen Hochwassers relativ zum vorgegebenen Windfeld können die maximalen Wasserstände höher oder weniger hoch ausfallen.

Durch Ensemble-Simulationen für die Nordsee mit TRIM-NP wurde untersucht, inwieweit die beiden ausgewählten Ereignisse (HF und LF/SFS) noch Verstärkungspotential besitzen. Mit diesen Ensemble-Simulationen wurden mögliche Verstärkungen der maximalen Hochwasser durch verschiedene stündliche Verschiebungen zwischen antreibendem Wind und an den Modellrändern vorgegebener astronomischer Tide von +/- 6 Stunden getestet (Ensemble „Verschiebung“). Des Weiteren wurde durch weitere Ensemble-Simulationen untersucht, wie sich die Ereignisse bei Springtide und zusätzlichen zeitlichen Verschiebungen zwischen Windfeld und astronomischer Tide innerhalb von +/- 6 Stunden verändern (Ensemble „Verschiebung+Springtide“). Für jedes Ensemble-Member wurden wieder Zeitreihen des Wasserstands für Borkum und die Elbemündung extrahiert. Die Zeitreihen für Borkum wurden auf die größte Verstärkung untersucht und mit den Auswirkungen für die Elbemündung verglichen.

Entsprechende Daten von dem Ensemble-Member mit dem höchsten verstärkten Hochwasser für die Hohe Flut und für die Lange Flut/Sturmflutserie (im Folgenden durch „_v“ gekennzeichnet) wurden für hochaufgelöste Simulationen der Deutschen Bucht und der Ästuare genutzt.

3.4 Modelluntersuchungen zur potentiellen Verstärkung der ausgewählten Sturmtiden in Ems und Elbe

Für die Sturmflutereignisse Hohe Flut HF_v, Lange Flut LF und Sturmflutserie SFS werden für die Ästuare von Ems und Elbe als zwei mögliche Verstärkungen eine Erhöhung des Abflusses aus dem Binnenbereich in die Ästuare und ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee untersucht. Hierfür wird der Abfluss in Ems und Elbe von MQ auf den höchsten beobachteten Abfluss HHQ, d. h. für die Ems auf 1200 m³/s (Februar 1946, DGJb 2018) und für die Elbe auf 4080 m³/s (Juni 2013, DGJc 2015) angehoben. Zusätzlich wird der Meeresspiegel auf dem Rand des Deutsche-Bucht-Modells zur Nordsee um 50 cm bzw. 100 cm angehoben. Diese Werte liegen innerhalb der Bandbreite des auf Grund eines erwarteten Klimawandels möglichen Meeresspiegelanstieges in der Nordsee bis zum Jahr 2100 (IPCC 2013).

Die Bedeutung dieser möglichen Verstärkung extremer Sturmtiden für die Sturmflutscheitelwasserstände HW, die Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände THW sowie die Dauer hoher Wasserstände DHW wird analysiert.

4 Ergebnisse

4.1 Extreme Sturmfluten in der Deutschen Bucht und mögliche Verstärkungen

Verschiedene Wettersituationen können schwere Sturmfluten entlang der Küste der Deutschen Bucht erzeugen (zur Klassifikation der Wettersituationen siehe z. B. Kruhl 1978), wobei die einzelnen Küstenabschnitte in Abhängigkeit von der Zugbahn des Tiefdruckgebietes unterschiedlich betroffen sein können. Die beiden ausgewählten Sturmflutereignisse Hohe Flut und Lange Flut/Sturmflutserie gehören hinsichtlich ihrer zugrundeliegenden Zugbahnen zum „Nord-West-Typ“ (z. B. Abbildung 3 in Gerber et al. (2016) zeigt Zugbahnen für die verschiedenen Kategorien). Abbildung 4 in Ganske et al. (2018) zeigt beispielsweise die Zugbahn von LF (schwarze Kurve 11.2030).

Im Folgenden wird der effektive Wind als lokaler Repräsentant des das Ereignis verursachenden Windfeldes genutzt. In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass die Variationen des Wasserstands bei den einzelnen Ereignissen den zeitlichen Variationen des effektiven Windes folgen.

Da die astronomische Tide von der ostfriesischen Küste über die Elbemündung und weiter über die nordfriesische Küste fortschreitet, tritt das Hochwasser in der Elbemündung etwa 1,3 Stunden später ein als in Borkum. Des Weiteren nimmt der Tidenhub von ca. 2,4 m an der ostfriesischen Küste bei Borkum auf ca. 3 m in der Elbemündung zu und dann auf ca. 2,6 m an der nordfriesischen Küste nahe Amrum ab.

Obwohl Hohe Flut und Lange Flut für Borkum ausgewählt wurden, repräsentieren beide Ereignisse auch für die Elbemündung extreme, fast gleichhohe Sturmzeiten mit NHN +4,86 m und NHN +4,88 m. Die Auswirkungen beider Ereignisse und die ihrer Verstärkungen werden für Borkum und Elbemündung vergleichend analysiert.

4.1.1 Hohe Flut bei Borkum und in der äußeren Elbemündung

Bei der hohen Flut geht dem Sturmflutscheitelwasserstand (höchster Wasserstand im Sturmflutzeitraum, HW2 in Abbildung 4) ein ebenfalls erhöhtes Hochwasser (HW1) sowohl bei Borkum als auch in der Elbemündung voraus. Während in der Elbemündung HW1 und HW2 mit NHN +4,58 m und NHN +4,86 m ähnlich hoch sind, ist HW1 bei Borkum 80 cm niedriger als HW2.

HW2 liegt im Zeitraum sehr hohen effektiven Windes, während HW1 in der Phase ansteigenden effektiven Windes vorkommt. Allerdings liegt HW2 das wegen der täglichen Ungleichheit kleinere der astronomischen Tidehochwasser zugrunde; das astronomische Tidehochwasser bei HW2 ist etwa 20 cm kleiner als dasjenige bei HW1.

Wird angenommen, dass der Zeitraum maximalen Windes mit anderen Tidephasen zusammentrifft, d. h., werden astronomische Tide und Windfeld stundenweise gegeneinander verschoben, zeigen sowohl HW1 als auch HW2 Veränderungen in ihrer Höhe (Abbildung 4). Das höchste Hochwasser von NHN +4,88 m für Borkum tritt bei einer zeitlichen Verschiebung der astronomischen Tide von +5 Stunden gegenüber dem atmosphärischen Antrieb für HW1 ein. Das astronomische Hochwasser von HW1 liegt in diesem Fall im Zeitraum des starken Windes und erhöht sich um 95 cm. Allerdings kommt es gegenüber

dem originalen Ereignis HF mit NHN +4,73 m beruhend auf HW2 insgesamt nur zu einer Verstärkung des maximalen Wasserstands von 15 cm für Borkum.

Wird zusätzlich die astronomische Tide bei HW2 durch das höchste im Datensatz vorkommende astronomische Springtidehochwasser ersetzt, und werden astronomische Tide und Windfeld wieder stundenweise gegeneinander verschoben, ergibt sich als größte Verstärkung ein auf HW2 beruhendes Hochwasser von NHN +5,23 m (Abbildung 4). Das höchste astronomische Springtidehochwasser im Datensatz ist etwa 40 cm höher als das HW2 zugrundeliegende originale astronomische Tidehochwasser.

Das originale Ereignis Hohe Flut fand etwa zwischen Spring- und Nipptide statt. Durch den Austausch der originalen astronomischen Tide mit der Zeitreihe um die höchste Springtide und unter Berücksichtigung der täglichen Ungleichheit erhöhen sich auch insbesondere das Hochwasser vor HW1 und das zweite Hochwasser nach HW2.

Die Auswirkungen der Verstärkungsprozeduren sind in der Elbemündung ähnlich wie bei Borkum (Abbildung 4). In der Elbemündung zeigt die Verschiebung der astronomischen Tide um +5 Stunden gegenüber dem Windfeld ebenfalls für HW1 eine Erhöhung. Diese Erhöhung von ca. 75 cm tritt in der Elbemündung ca. 1,3 Stunden später ein als in Borkum. Wie für Borkum liefert diese Simulation aus dem Ensemble „Verschiebung“ die bezogen auf das originale maximale Hochwasser (HW2) größte Verstärkung (etwa 50 cm). Die Simulation aus dem Ensemble „Verschiebung+Springtide“, die für Borkum die größte Verstärkung liefert, erhöht auch in der Elbemündung HW2 um 37 cm auf NHN +5,23 m. Allerdings ist diese Verstärkung etwas kleiner als diejenige durch das Member aus dem Ensemble „Verschiebung“.

Die Member aus den beiden Ensembles wurden derart ausgewählt, dass sich für Borkum jeweils die stärkste Erhöhung der Wasserstände ergab, d. h., die Verstärkung war für Borkum angepasst. Daher sind höhere Wasserstände für andere Verschiebungen der Tidephase gegenüber dem Windfeld für den ausgewählten Ort in der äußeren Elbemündung möglich. So liefert ein anderes Ensemble-Member aus dem Ensemble „Verschiebung+Springtide“ für die Elbemündung ein Hochwasser von NHN +5,58 m und damit die größte Verstärkung von 72 cm bezogen auf den originalen höchsten Wasserstand von NHN +4,86 m (Abbildung 4).

Das originale Ereignis Hohe Flut gibt für Borkum nicht nur das höchste Hochwasser wieder, sondern präsentiert auch einen langanhaltenden Zeitraum von 33 Stunden mit Wasserständen größer als das mittlere Tidehochwasser von NHN +1,15 m. Bei den einzelnen Simulationen beider Ensembles ändert sich dieser Zeitraum in der Regel nur um +/- eine Stunde. Bei zwei der Ensemble-Member, die keine oder nur eine geringe Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstands zeigen, verlängert sich dieser Zeitraum um knapp einen Tidezyklus, da das Tideniedrigwasser vor HW1 und dasjenige nach HW2 nicht unter das mittlere Tidehochwasser fallen. In den anderen Simulationen ist entweder das Tideniedrigwasser vor HW1 oder das Tideniedrigwasser nach HW2 niedriger als NHN +1,15 m. Entsprechende Analysen zeigen für die ausgewählte Position in der äußeren Elbemündung ähnliche Ergebnisse.

Das Ensemble-Member mit der größten Verstärkung für die Hohe Flut bei Borkum (Sturmflutscheitelwasserstand von NHN +5,23 m) wird mit HF_v bezeichnet und für die weitere Untersuchung in Ems und Elbe ausgewählt.

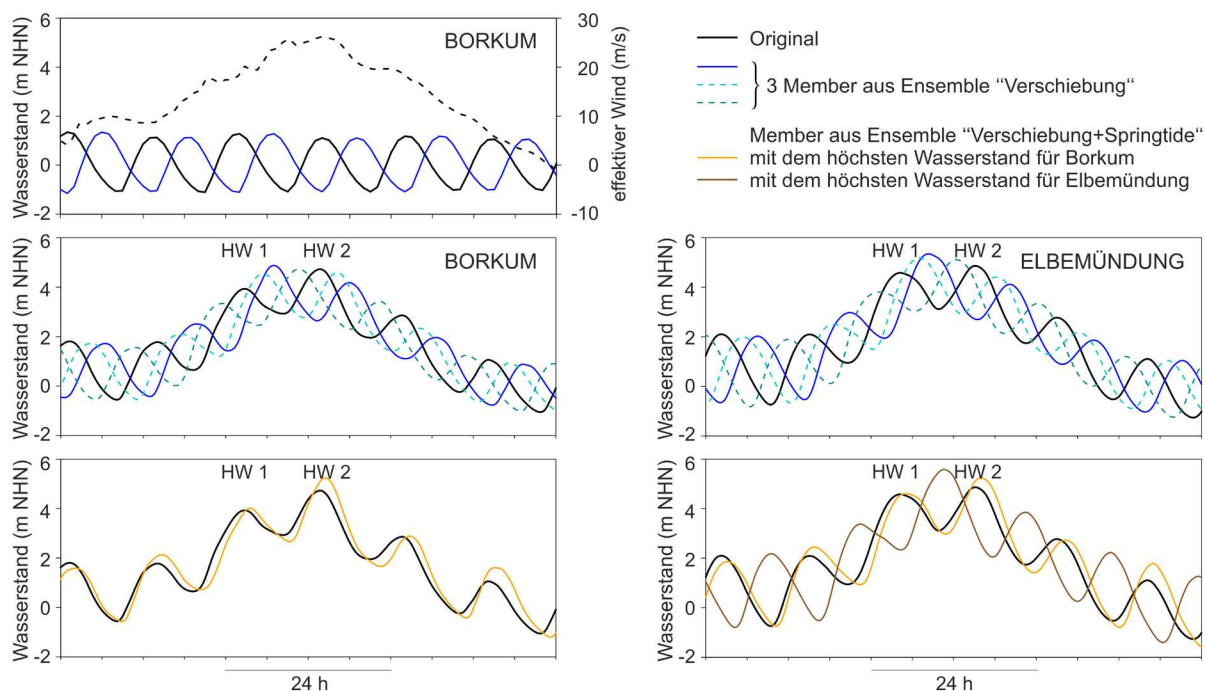


Abbildung 4: Hohe Flut: Zeitreihen des effektiven Windes (links oben, schwarz gestrichelt) und der astronomischen Tide (links oben, original: schwarz, +5h-Verschiebung: blau) für Borkum. Zeitreihen des Wasserstands für Borkum (links Mitte und unten) und Elbemündung (rechts Mitte und unten) für das originale Ereignis (schwarz) und für Ensemble-Member aus dem Ensemble „Verschiebung“ (blau, hell- und dunkelzyan) und aus dem Ensemble „Verschiebung+Springtide“ (orange, braun nur Elbemündung). Die blauen und orangen Kurven geben jeweils das Member mit der größten Verstärkung für Borkum wieder, wobei die orangen Kurven HF_v repräsentieren.

4.1.2 Lange Flut/Sturmflutserie bei Borkum und in der äußeren Elbemündung

Die Sturmflutserie für Borkum besteht aus einer Serie von sieben Sturmtiden innerhalb von knapp acht Tagen (Abbildung 5). Der Definition von Sturmtiden liegt die Klassifikation des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zugrunde, nach der ein Wasserstand von 1,5 m über dem mittleren Tidehochwasser eine Sturmflut wiedergibt (EXTREMENESS Gruppe 2019). In dieser Serie ist auch die Lange Flut enthalten, bei der die Wasserstände bei Borkum über 45 Stunden nicht unter das mittlere Tidehochwasser (MThw) von NHN +1,15 m sinken und im Mittel etwa 1,5 m darüber liegen.

Auch die Zeitreihe für die Elbemündung weist sieben Sturmtiden auf. Aufgrund der größeren Wasserstandsschwankungen in der Elbemündung zeigt die Zeitreihe allerdings keine 45 Stunden über dem dortigen MThw; im Zeitraum um das Tideniedrigwasser nach dem höchsten Hochwasser sinkt der Wasserstand kurzfristig unter das mittlere Tidehochwasser (Abbildung 5).

Die Lange Flut fällt mit einer astronomischen Springtide zusammen und zeigt kein weiteres Verstärkungspotential. Im Ensemble „Verschiebung“ ändert sich der Sturmflutseitelwasserstand aufgrund der verschiedenen zeitlichen Verschiebungen zwischen Tidephase und Windfeld für die Lange Flut nur um wenige Zentimeter. Allerdings können die Hochwasser der folgenden Sturmfluten, je nach Variation zwischen Wind und Tidephase, bis zu etwa 30 cm höher ausfallen (Abbildung 5). Wie bei der Hohen Flut ändert sich auch bei der Langen Flut die Zeitdauer mit Wasserständen größer MThw in der Regel um

+/- 1 Stunde. Bei Borkum kann sich die Zeit in einzelnen Fällen auch deutlich verkürzen, wenn die Wasserstände um das Tideniedrigwasser nach dem Sturmflutscheitelwasserstand unter MThw sinken. Dagegen gibt es für die Elbemündung einzelne Ensemble-Member, bei denen das genannte Tideniedrigwasser nicht wie in der Originalserie unter das MThw sinkt und sich die Zeitdauer mit Wasserständen kontinuierlich über MThw verlängert.

Für die weiteren Untersuchungen in den Ästuaren von Ems und Elbe wurden die originalen Ereignisse LF/SFS genutzt.

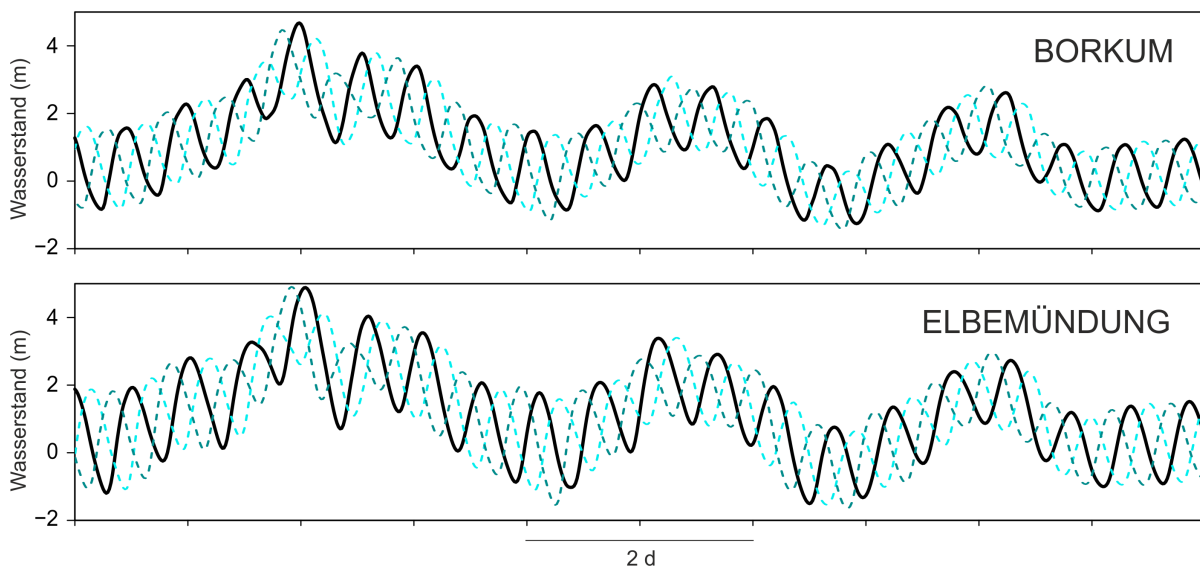


Abbildung 5: Sturmflutserie einschließlich Langer Flut: Zeitreihen des Wasserstands für das originale Ereignis (schwarz) und beispielhaft für zwei Ensemble-Member mit Verschiebung der astronomischen Tide gegenüber dem Windfeld (blau und zyan gestrichelt) für Borkum und Elbemündung.

4.2 Ästuare von Ems und Elbe

4.2.1 Bedeutung von Abfluss und Meeresspiegelanstieg für den Wasserstand an ausgewählten Orten

Mit dem räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modell der Deutschen Bucht wird die Auswirkung einer zusätzlichen Verstärkung der extremen Sturmflutereignisse HF_v und LF/SFS mit offenem und mit gesteuertem Emssperrwerk untersucht. Die Wahl des Modellgebietes erlaubt es, das gleiche Sturmflutereignis für Ems und Elbe gleichzeitig zu betrachten und die Auswirkungen des gewählten Sturmflutereignisses zu vergleichen. Beispielhaft ist für das Sturmflutereignis HF_v mit offenem Emssperrwerk der Wasserstandsverlauf für zwei Hafenstädte, Emden im Emsästuar und Hamburg im Elbeästuar (für die Lage der Orte siehe Abbildung 1) in Abbildung 6 dargestellt. Zusätzlich ist der Wasserstandsverlauf für einen Meeresspiegelanstieg sowie für einen erhöhten Abfluss abgebildet. Bereits die Tidehochwasser Thw und Tideniedrigwasser Tnw der Vortiden dieses Sturmflutereignisses liegen bei Emden (MThw: NHN +1,48 m, MTnw: NHN -1,80 m) und Hamburg (MThw: NHN +2,12 m, MTnw: NHN -1,60 m) auf Grund der Wasserstandsentwicklung in der Nordsee (siehe Abbildung 4) deutlich höher als bei mittleren Tiden. HF_v erreicht einen Sturmflutscheitelwasserstand (höchster Wasserstand im Sturmflutzeitraum) von NHN +6,36 m in Emden und von NHN +6,89 m in Hamburg. Für beide

Ästuar wird dieses Sturmflutereignis nach der Klassifikation des BSH als sehr schwere Sturmflut bezeichnet, da die Sturmflutscheitelwasserstände mehr als 3,50 m über dem MThw (z. B. Emden NHN +1,48 m, Hamburg St. Pauli NHN +2,12 m) liegen. Ähnlich wie bei „Borkum“ und „Elbemündung“ erzeugt die gleiche meteorologische Situation auf Grund der unterschiedlichen Überlagerung von astronomischer Tide und Windentwicklung in Ems und Elbe, in der Ems zwei Sturmflutscheitel mit deutlich unterschiedlicher Höhe und in der Elbe zwei Sturmflutscheitel mit nahezu gleicher Höhe.

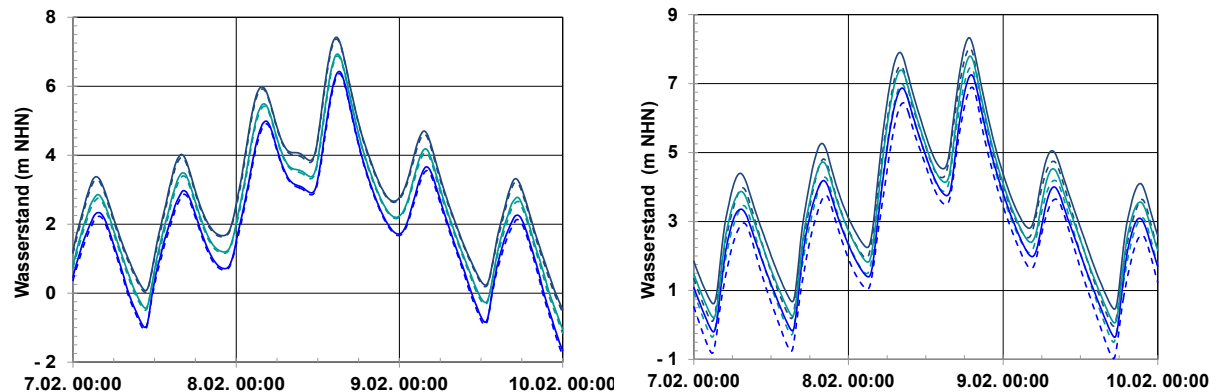


Abbildung 6: Hohe Flut HF_v: Wasserstandsverlauf bei Emden (Emsästuar, links) und Hamburg St. Pauli (Elbeästuar, rechts) ohne Meeresspiegelanstieg (blau) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (hellblau) und von 100 cm (dunkelblau). Die gestrichelte Linie kennzeichnet mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

Eine Erhöhung des Abflusses von MQ auf HHQ hebt die Wasserstände im gesamten Sturmflutzeitraum an. Der Sturmflutscheitelwasserstand steigt in Emden um einige Zentimeter und in Hamburg um einige Dezimeter. Im weiten und tiefen Bereich des Emsästuars bei Emden hat der Abfluss einen deutlich kleineren Einfluss auf den Wasserstand als im engeren Bereich des Elbeästuars bei Hamburg (siehe auch Abbildung 1 bzw. Tabelle 1).

Tabelle 1: Hohe Flut: Sturmflutscheitelwasserstand HW und Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstands THW bei Emden mit offenem bzw. gesteuertem Emssperrwerk und Hamburg für unterschiedlichen Abfluss (Q) und Meeresspiegelanstieg (SLR). Die Eintrittszeit ist für Emden bezogen auf Ems-km 107 (Hubertgat) in der Emsmündung und für Hamburg auf Elbe-km 758 (Bake Z) in der Elbmündung. Zusätzlich ist das HHThw (höchster beobachteter Wasserstand) für Emden (13.03.1906, DGJb 2018) und Hamburg (03.01.1976, DGJc 2015) eingetragen.

	Emden (Ems-km 40) Emssperrwerk offen		Emden (Ems-km 40) Emssperrwerk gesteuert		Hamburg (Elbe-km 623N)	
	HW m NHN	THW Minuten	HW m NHN	THW Minuten	HW m NHN	THW Minuten
HF_v_MQ_SLR000	6,36	89	6,61	80	6,89	207
HF_v_HHQ_SLR000	6,43	88	6,65	74	7,25	201
HF_v_MQ_SLR050	6,88	88	7,13	77	7,46	202
HF_v_HHQ_SLR050	6,93	87	7,16	76	7,80	195
HF_v_MQ_SLR100	7,37	82	7,61	70	8,02	198
HF_v_HHQ_SLR100	7,42	79	7,65	69	8,33	191
HHThw	5,18	-	-	-	6,45	-

Ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee führt sowohl in Emden als auch in Hamburg zu einer Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände in der Größenordnung des angenommenen Meeresspiegelanstiegs (Tabelle 1). Eine Zunahme des Abflusses erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände zusätzlich (Tabelle 1). Der Einfluss von Meeresspiegelanstieg und Abfluss auf die Sturmflutscheitelwasserstände bei HF_v stimmt mit den Ergebnissen einer Sensitivitätsstudie von Rudolph (2014) zur Bedeutung von Abfluss und Meeresspiegelanstieg für die Sturmflutscheitelwasserstände auf Grundlage sehr hoher historischer Sturmflutereignisse überein.

Eine Erhöhung des Abflusses führt in Emden und Hamburg zu einer geringfügigen Veränderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes. Die Zunahme der Wassertiefe durch einen angenommenen Meeresspiegelanstieg von 50 cm bzw. 100 cm erhöht die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle. Der Sturmflutscheitelwasserstand tritt bezogen auf einen Ort in der Ems- bzw. Elbmündung in Emden bzw. Hamburg um einige Minuten früher ein. In Tabelle 1 ist für HF_v die Eintrittszeit THW des Sturmflutscheitelwasserstandes HW für Emden bezogen auf Hubertgat in der Außenems und für Hamburg bezogen auf Bake Z in der Außenelbe aufgeführt.

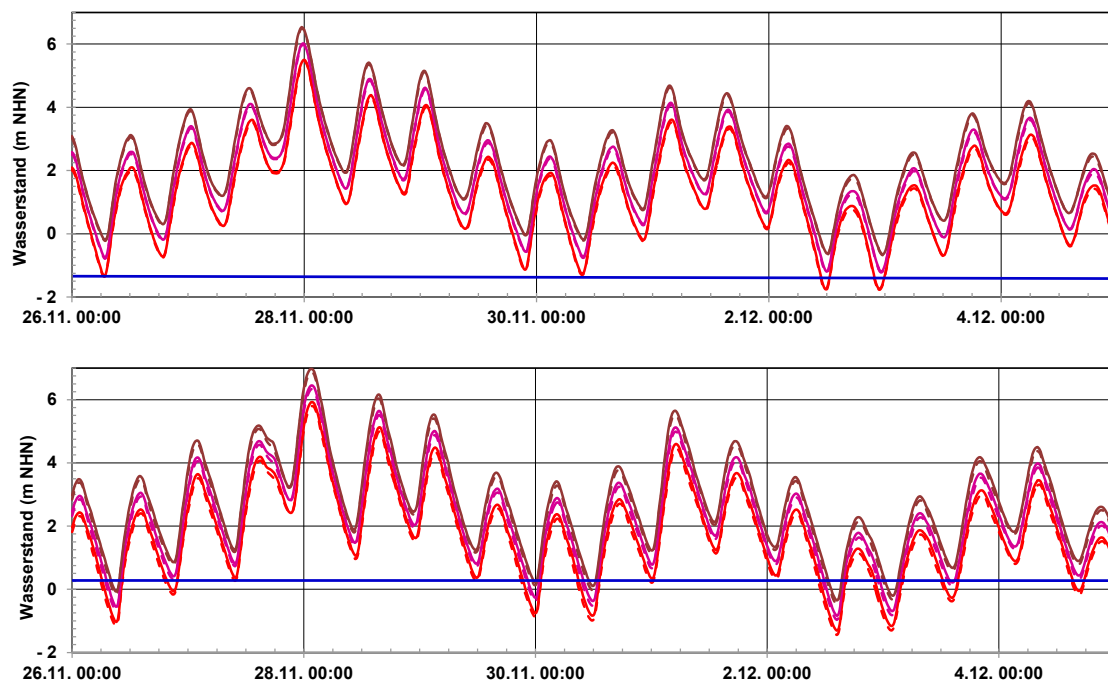


Abbildung 7: Lange Flut/Sturmflutserie LF/SFS: Wasserstandsverlauf bei Knock (Emsästuar, oben) und Brunsbüttel (Elbeästuar, unten) ohne Meeresspiegelanstieg (rot) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (violett) und 100 cm (dunkelrot). Die gestrichelte Linie kennzeichnet MQ, die durchgezogene Linie HHQ. Die blaue Linie markiert einen Wasserstand von NHN $-1,40$ m bei Knock bzw. NHN $+0,25$ m bei Brunsbüttel.

Für die Sturmflutereignisse LF/SFS mit offenem Emssperrwerk ist beispielhaft der Wasserstandsverlauf für zwei für die Entwässerung des Hinterlandes bedeutende Orte, Knock im Emsästuar und Brunsbüttel im Elbeästuar (für die Lage siehe Abbildung 1), in Abbildung 7 dargestellt. Zusätzlich ist der Wasserstandsverlauf für einen Meeresspiegelanstieg von 50 cm und 100 cm sowie für einen von MQ auf HHQ erhöhten Abfluss abgebildet. LF/SFS erreicht einen Wasserstand von NHN $+5,47$ m bei Knock und NHN $+5,81$ m bei Brunsbüttel. Für beide Ästuarie ist auch dieses Sturmflutereignis nach der Klassifikation des

BSH eine sehr schwere Sturmflut, da die Sturmflutscheitelwasserstände mehr als 3,50 m über dem MThw (z. B. Knock NHN +1,39 m, Brunsbüttel NHN +1,48 m) liegen.

Ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee führt sowohl bei Knock (Emsästuar) als auch bei Brunsbüttel (Elbeästuar) zu einer Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände in der Größenordnung des angenommenen Meeresspiegelanstiegs. Eine Zunahme des Abflusses erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände zusätzlich um wenige Zentimeter. An diesen ausgewählten Orten im Mündungsbereich der Ästuarie ist der Einfluss des Abflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände deutlich geringer als im zentralen Bereich der Ästuarie bei z. B. Emden oder Hamburg.

4.2.2 Bedeutung von Abfluss und Meeresspiegelanstieg für den Sturmflutscheitelwasserstand

Um den Einfluss einer Abflusserhöhung sowie eines Meeresspiegelanstieges entlang der Ästuarie von Ems und Elbe zu untersuchen, wird der Sturmflutscheitelwasserstand HW von HF_v und LF/SFS auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte von Ems und Elbe analysiert. Abbildung 8 zeigt HW für den heutigen Meeresspiegel sowie einen Meeresspiegelanstieg von 50 cm bzw. 100 cm jeweils in Kombination mit dem Abfluss MQ bzw. HHQ. Der Meeresspiegelanstieg erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände bis tief in die Ästuarie hinein um einen Betrag in der Größenordnung des Meeresspiegelanstieges. Abbildung 9 zeigt die Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes aufgrund eines Meeresspiegelanstieges entlang der Ästuarie von Ems und Elbe für die Sturmflutereignisse HF_v und LF/SFS. Bis Leerort in der Ems und Zollenspieker in der Elbe wird der Sturmflutscheitelwasserstand um den vorgegebenen Meeresspiegelanstieg ± 10 cm angehoben. Stromauf dieser Orte verringert sich der Einfluss des Meeresspiegelanstieges. Eine Erhöhung des Abflusses von MQ auf HHQ führt im oberen Bereich der Ästuarie von Ems (stromauf von Papenburg) und Elbe (stromauf von Zollenspieker) bei den betrachteten Sturmflutereignissen zu einer Erhöhung von HW um mehrere Dezimeter. In beiden Ästuarie wird stromauf des breiten und tiefen Mündungsbereiches, d. h. stromauf von Knock in der Ems bzw. Brunsbüttel in der Elbe, der Sturmflutscheitelwasserstand sowohl durch den Meeresspiegelanstieg als auch durch eine Zunahme des Abflusses erhöht.

Der Vergleich der Sturmflutscheitelwasserstände der Hohen Flut HF_v mit den höchsten beobachteten Wasserständen HHThw (siehe Tabelle 1) zeigt, dass das für Borkum in der Emsmündung ausgewählte Ereignis HF_v bei Emden mehr als 110 cm über dem HHThw liegt, in Hamburg dagegen lediglich ca. 45 cm. In Emden erreicht der Wasserstand die Höhe des Bemessungswasserstandes (NHN +6,50 m, NLWKN 2007) während er in Hamburg deutlich darunter bleibt (NHN +8,10 m, FHH 2013).

Das Emsästuar ist bereits heute durch ein Sturmflutsperrwerk vor Sturmfluten geschützt. Das geschlossene Sperrwerk trennt die Unterems von der Außenems, sodass der Einfluss der Sturmfluten nur bis zum Sperrwerk reicht. Abbildung 10 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Emsästuars für ein gesteuertes Emssperrwerk. Da das Sperrwerk bei einem Wasserstand von NHN +3,50 m geschlossen wird, ist die Unterems vor hohen Wasserständen geschützt. Die Scheitelwasserstände in der Unterems hängen nun lediglich vom Abfluss und der Dauer, für die das Sperrwerk geschlossen ist, ab. Bei MQ bleiben die Scheitelwasserstände für alle betrachteten Sturmflutereignisse stromauf des Sperrwerkes deutlich unter NHN +4,00 m. Aber auch bei Sturmfluten verstärkt durch

einen Meeresspiegelanstieg in Kombination mit HHQ ist der geschützte Bereich stromauf des Sperrwerkes groß genug, um den Abfluss aufzunehmen, der im Sturmflutzeitraum in die Unterems fließt.

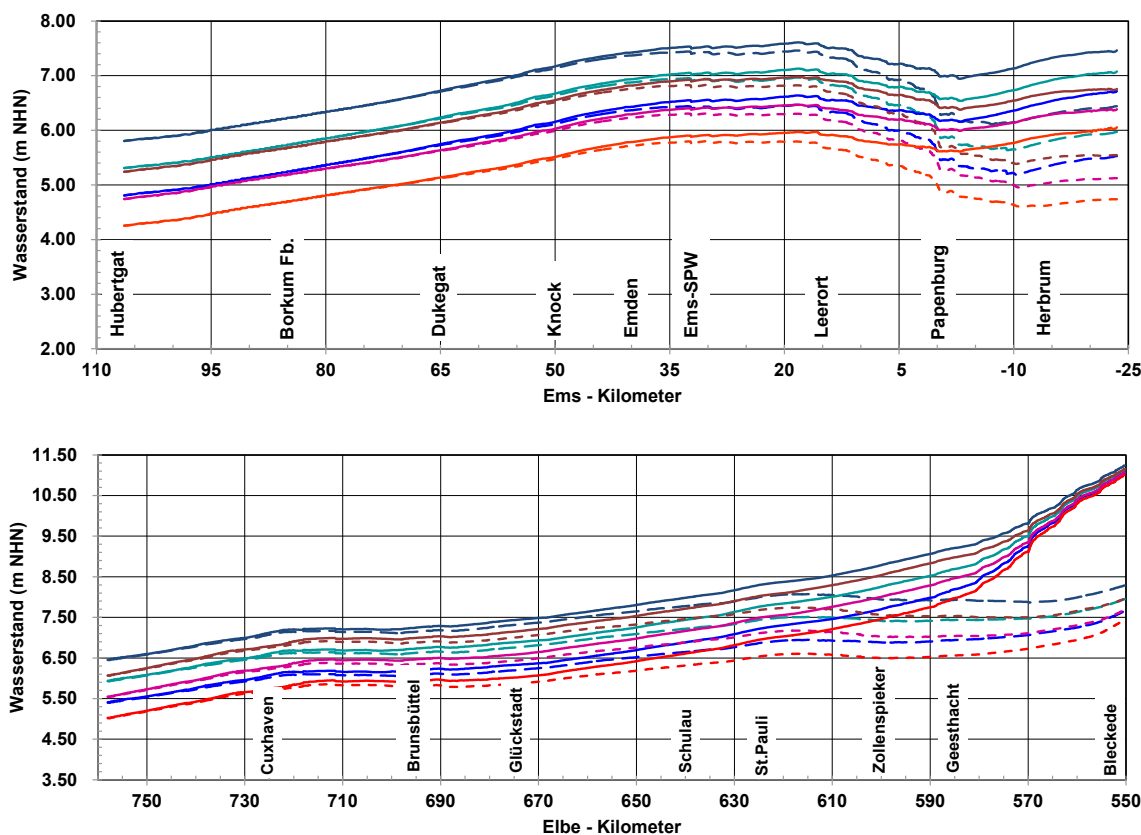


Abbildung 8: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Emsästuars (oben) und des Elbeästuars (unten) für die Sturmflutereignisse HF_v (blau) und LF/SFS (rot). Ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm ist türkis (HF_v) bzw. violett (LF/SFS) und von 100 cm dunkelblau (HF_v) bzw. dunkelrot (LF/SFS) markiert. Die gestrichelte Linie kennzeichnet mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

Im Emdener Fahrwasser sind für die Sturmfluten HF_v und LF/SFS die Sturmflutscheitelwasserstände bei gesteuertem Sperrwerk ca. 20 cm höher als bei offenem Sperrwerk (vergleiche HW in Abbildung 8 oben mit HW in Abbildung 10, bzw. siehe Tabelle 1). Das geschlossene Sperrwerk verkürzt bei Sturmflut das Emsästuar und verändert somit die Dissipation und auch das Reflektionsverhalten des Ästuars. Eine zusätzliche Erhöhung der HW kann durch die beim Schließen auf Grund der Flutstromgeschwindigkeit entstehende Sunk- und Schwallwelle entstehen. Die Schwallwelle kann den Dollart (Bucht bei Emden) zu einer Eigenschwingung anregen, die eine zusätzliche kurzzeitige Erhöhung der Wasserstände erzeugt. Eine detaillierte Beschreibung der Wasserstandsentwicklung beim Steuern des Emssperrwerkes gibt BAW (2007).

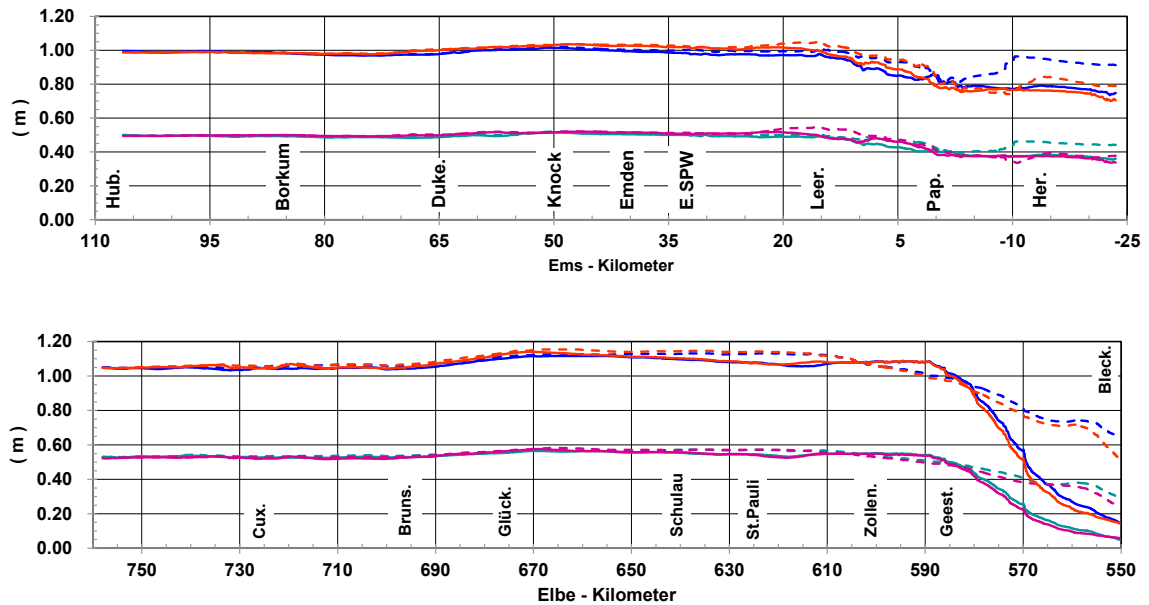


Abbildung 9: Änderung des Sturmflutschwanzwasserstandes HF_v und LF/SFS entlang des Emsästuares (oben) und des Elbeästuares (unten) auf Grund eines Meeresspiegelanstieges von 100 cm (HF_v in Blau, LF/SFS in Rot) und 50 cm (HF_v in Violett, LF/SFS in Türkis). Die gestrichelte Linie kennzeichnet mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

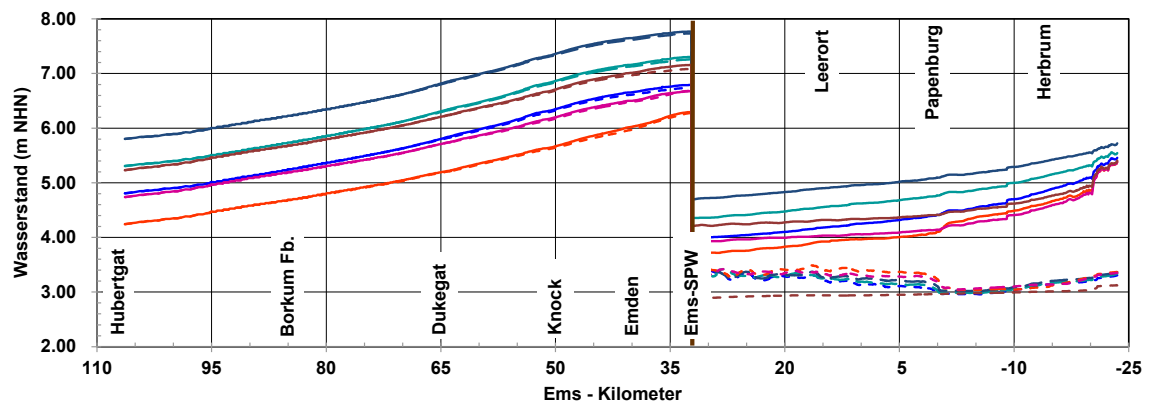


Abbildung 10: Sturmflutschwanzwasserstand entlang des Emsästuares für die Sturmflutereignisse HF_v (blau) und LF/SFS (rot). Ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm ist türkis (HF_v) bzw. violett (LF/SFS) und von 100 cm dunkelblau (HF_v) bzw. dunkelrot (LF/SFS) markiert. Die gestrichelte Linie kennzeichnet mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ. Die Lage des Ems-Sperwerkes ist durch die braune Linie markiert.

4.2.3 Entwässerung und Meeresspiegelanstieg

Die Entwässerung der eingedeichten Niederungsgebiete entlang der Nordseeküste bildet eine zentrale Voraussetzung für die Nutzung der Küstenregion als Kulturlandschaft und Siedlungsraum (KLEVER 2018). Die tiefliegenden Gebiete im Bereich von Elbe und Ems werden über eine Reihe von Sielen und Pumpwerken entwässert. Das Knockster Siel entwässert das vor allem landwirtschaftlich genutzte Hinterland und hält den Binnenwasserstand bei Knock auf NHN $-1,40$ m. Mit einem MT_{nw} bei Knock von NHN $-1,58$ m ist eine Entwässerung ohne Pumpen auch bei mittleren Tiden lediglich in sehr kurzen Zeiträumen möglich. Bei Sturmflut verkürzen sich diese Zeiträume weiter. Während der Sturmflutserie SFS (Abbildung 7 oben) muss auch ohne Verstärkung fast im gesamten Zeitraum

von 176 Stunden (Tabelle 2) gepumpt werden, wobei ca. 90 Stunden lang gegen einen Wasserstand höher als NHN +1,39 m (MThw) in der Ems gepumpt werden muss. Durch einen Meeresspiegelanstieg von 50 cm verlängert sich der Zeitraum mit Wasserständen höher als NHN +1,39 m um 20 Stunden, bei einem Meeresspiegelanstieg von 100 cm um 40 Stunden.

Große Gebiete Schleswig-Holsteins werden über den Nord-Ostsee-Kanal (NOK) entwässert. Um einen uneingeschränkten Schiffsverkehr im Kanal zu gewährleisten, darf der Wasserstand im NOK einen Wasserstand von NHN -0,20 m nicht unterschreiten aber auch nicht über NHN +0,25 m steigen (BSHb 2016). Die Entwässerung des NOK erfolgt heute zum größten Teil (ohne Pumpen) in die Elbe bei Brunsbüttel (MThw: NHN +1,48 m). Während der 176 Stunden dauernden Sturmflutserie SFS (Abbildung 7 unten) liegt der Wasserstand in der Elbe bei Brunsbüttel ca. 24 Stunden unter NHN +0,25 m. Nur in diesem Zeitraum wäre während der Sturmflutserie eine Entwässerung des NOK in die Elbe möglich. Durch einen Meeresspiegelanstieg von 50 cm verkürzt sich dieser Zeitraum auf ca. 16 Stunden und bei einem Meeresspiegelanstieg von 100 cm auf ca. 8 Stunden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Lange Flut/Sturmflutserie: Dauer von Wasserständen über einem ausgewählten Grenzwasserstand für Knock in der Ems NHN -1,40 m und für Brunsbüttel in der Elbe NHN +0,25 m für unterschiedliche Abfluss- und Meeresspiegelanstiegsszenarien. Der Untersuchungszeitraum umfasst 176 Stunden.

Sturmflutereignis	Knock (Ems km 50)	Brunsbüttel (Elbe km 696)
	≥ NHN -1,40 m Stunden	≥ NHN +0,25 m Stunden
SFS_MQ_SLR000	172	151
SFS_HHQ_SLR000	172	154
SFS_MQ_SLR050	176	159
SFS_HHQ_SLR050	176	162
SFS_MQ_SLR100	176	167
SFS_HHQ_SLR100	176	169

5 Zusammenfassung und Ausblick

In EXTREMENESS ist es gelungen, für die Fokusregion Emsästuar in einem umfangreichen Modelldatensatz Sturmflutereignisse zu finden, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich aber potentiell mit extremen Konsequenzen (Schaper et al. 2019) verbunden sein könnten. Diese aus etwa 13.000 Modelljahren bestehende Datenbasis umfasst atmosphärische und meteo-marine Reanalysen, Hindcasts und Klimaprojektionen. Die verwendeten Klimaprojektionen beinhalten keinen Anstieg des mittleren Meeresspiegels und die jährlichen maximalen Wasserstände bei Borkum zeigen keinen signifikanten Anstieg von 1961 bis 2100 (vgl. Abbildung 3). Daher wird davon ausgegangen, dass die in diesen Datensätzen gefundenen Ereignisse sowohl in Zukunft als auch bereits heute möglich sein könnten. Je nach Stärke und Zugbahn des Tiefdruckgebietes wirken sich Sturmfluten an Küstenabschnitten entlang der Deutschen Bucht unterschiedlich aus. Die Auswirkungen der ausgewählten Ereignisse werden für Ems- und Elbeästuar deshalb vergleichend betrachtet.

Für das Sturmflutereignis Hohe Flut mit dem höchsten Wasserstand, das Ereignis Sturmflutserie mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche und das Ereignis Lange Flut mit der längsten Dauer von Wasserständen über dem mittleren Tidehochwasser bei Borkum werden weitere Verstärkungsmöglichkeiten untersucht, indem Windentwicklung und astronomische Tide zeitlich variiert werden und der Einfluss einer Springtide berücksichtigt wird. Der Sturmflutscheitelwasserstand des Sturmflutereignisses HF steigt durch diese Verstärkung bei Borkum von NHN +4,73 m auf NHN +5,23 m (HF_v). Diese Sturmflut HF_v überschreitet deutlich den höchsten bisher in Borkum beobachteten Wasserstand von NHN +4,06 m vom 13. März 1906 (DGJb 2018). Ihre Höhe liegt ebenfalls etwa einen viertel Meter über der Höhe von NHN +4,99 m, die im Projekt MUSE für die für die Elbe höchste Variante der Sturmflut vom Januar 1976 (MUSE Sturmflut 1976 EPS 45) berechnet wurde (Jensen et al. 2006).

Die in EXTREMENESS gewählten Verstärkungen sind für Borkum optimiert. Für die Elbmündung verursacht HF_v zwar ebenfalls eine Erhöhung des maximalen Scheitelwasserstands, jedoch würde eine andere Phasenverschiebung zwischen Windfeld und Tide zu einer weiteren Verstärkung führen. Das zeigt, dass es für die einzelnen Küstenabschnitte der Deutschen Bucht individuelle ereignisabhängige Phasenverschiebungen zwischen Windentwicklung und Tidephase gibt, die jeweils die höchsten Scheitelwasserstände verursachen würden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zur Wechselwirkung zwischen astronomischer Tide (Phasenverschiebung und Springtide) und antreibendem Windfeld legen nahe, dass auch bisher beobachtete Sturmfluten lokal höher hätten auflaufen können.

Als weitere mögliche Verstärkungen der Sturmflutereignisse in den Ästuaren von Ems und Elbe werden eine Erhöhung des Abflusses aus dem Binnenbereich und ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee untersucht. Eine Erhöhung des Abflusses aus dem Binnenbereich von MQ auf HHQ erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände im mittleren Bereich der Ästuarum um einige Zentimeter und im oberen Bereich der Ästuarum um einige Dezimeter. Ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee dagegen erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände bis tief in die Ästuarum von Ems (bei offenem Emssperrwerk) und Elbe hinein um den Wert des angenommenen Meeresspiegelanstiegs, d. h. hier um 50 cm bzw. 100 cm. Im oberen Teil der Ästuarum nimmt der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf den Sturmflutscheitelwasserstand ab und der Einfluss des Abflusses zu. Das Steuern bzw. Schließen des Emssperrwerkes schützt den stromauf des Sperrwerkes gelegenen Teil der Ems vor den durch die extremen und zusätzlich verstärkten Sturmflutereignisse verursachten Wasserständen. Dieser Bereich stromauf des Sperrwerkes ist groß genug, um den im Sturmflutzeitraum aus dem Binnenbereich zufließenden Abfluss aufzunehmen.

Die Betrachtung der Wasserstandsentwicklung der Sturmflutserie SFS bei Knock zeigt, dass in Zeiten eines Klimawandels und einem damit verbundenen Meeresspiegelanstieg nicht nur die Sturmflutscheitelwasserstände und die damit verbundenen Fragen zu einem zukünftigen Küstenschutzkonzept betrachtet werden müssen. Die Sturmflutserie in Kombination mit einem Meeresspiegelanstieg würde zusätzlich zu einer Verschärfung der bereits heute bestehenden Entwässerungsproblematik der eingedeichten tiefliegenden norddeutschen Niederungsgebiete führen.

Für Fragen des Küstenschutzes konnte bis in das letzte Jahrhundert hinein lediglich auf Erfahrungen aus tatsächlich eingetretenen Sturmfluten zurückgegriffen werden. Der Küstenausschuß Nord- und Ostsee (1962) weist darauf hin, dass die verhängnisvolle Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 gleichzeitig eine Bewährungsprobe für den

Küstenschutz darstellte, da sie einerseits erwiesen hat, wo und wann der Küstenschutz den Angriffen der See nicht standgehalten hat, aber andererseits gezeigt hat, wie der Küstenschutz gestaltet sein muss, um auch schwersten Angriffen widerstehen zu können. Der Einsatz numerischer Modelle wie in EXTREMENESS ermöglicht es, zusätzlich zu historischen Sturmfluten auch Sturmflutszenarien aus möglichen Zukünften, d. h. Klimaprojektionen, zu untersuchen. So besteht die Möglichkeit, nicht nur aus vergangenen Ereignissen zu lernen, sondern auch den Küstenschutz bzw. das Küstenschutzkonzept auf zukünftige durch einen Klimawandel verursachte mögliche Entwicklungen vorzubereiten. Die Ergebnisse aus EXTREMENESS können ein Baustein bei der Entwicklung von flexiblen Anpassungsmaßnahmen an die Auswirkungen des Klimawandels im Küstenbereich unter Berücksichtigung des Küstenschutzes, der Entwässerung des Hinterlandes und der Belange der Wasserstraßen sein.

Im Rahmen von EXTREMENESS werden die hier vorgestellten extremen Sturmflutereignisse, die sehr unwahrscheinlich aber trotzdem physikalisch plausibel und möglich sind, verwendet, um eine Analyse ihrer Auswirkungen durchzuführen. Eine transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher (Sturmflut-)Risikomanagementoptionen im Küstenschutz in der Region Emden – Krummhörn wird mit Fachleuten des regionalen Küsten- und Katastrophenschutzes erarbeitet. Die Ergebnisse dieser weiterführenden Untersuchungen zu extremen Nordseesturmfluten und ihren möglichen regionalen Auswirkungen werden in Schaper et al. (2019) vorgestellt.

6 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, vertreten durch Norbert Blum vom Projektträger Jülich, für die gewährte Finanzierung im Rahmen der Fördermaßnahme „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee“ im Rahmenprogramm FONA 3 (Förderkennzeichen 03F0758A, 03F0758D und 03F0758E). Wir danken dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die fachliche Begleitung des Projektes in der Bearbeitungsphase. Wir danken Frank Thorenz als Forschungsleiter Küste des KFKI und Gabriele Gönnert als Obfrau der projektbegleitenden Gruppe und den weiteren Mitgliedern der projektbegleitenden Gruppe Cordula Berkenbrink, Anette Ganske, Katharina Heinrich, Jacobus Hofstede, Ferk Jensen, Sylvin Müller-Navarra, Frank Rosenberg, Karina Stockmann und Andreas Wurpts, für fruchtbare Diskussionen und weiterführende Anregungen. Unser Dank geht an Etor Emanuel Lucio Eceiza und Robert Scholz vom DWD für die Handanalysen der Wetterkarten der historischen Stürme.

7 Literaturverzeichnis

Bollmeyer, C.; Keller, J. D.; Ohlwein, C.; Wahl, S.; Crewell, S.; Friederichs, P.; Hense, A.; Keune, J.; Kneifel, S.; Pscheidt, I.; Redl, S.; Steinke, S.: Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141, 1–15, 2015.

Brecht, B.; Frank, H.: High resolution modelling of wind fields for optimization of empirical storm flood predictions. In: Adv. Sci. Res., 11, 1–6, 2014.

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Nordseezustand 2008–2011. Berichte des BSH 54, 2016.

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: ExpN TF1 SP108 Meilenstein: Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979–2012, 2016.

BAW Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): FuE-Abschlussbericht EXTREMENESS-C: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkung. Bericht BAW. https://www.baw.de/content/files/forschung_entwicklung/documents/B3955.03.04.70237.pdf, 2020.

BAW Bundesanstalt für Wasserbau: Endbericht zur Durchführung einer wasserbaulichen Systemanalyse der Sturmflut 5. Allerheiligenflut vom 1.11.2006. Bericht BAW A3955 03 10161, 2007.

Casulli, V.: A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60, 391–408, 2008.

Casulli, V.; Cattani, E.: Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. In: *Computers Math Appl*, 27, 4, 99112, 1994.

Casulli, V.; Stelling, G. S.: Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67, 441–449, 2010.

Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T.; Martin, G.: Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2. In: *Geoscientific Model Development*, 4, 4, 1051–1075, 2011.

Compo, G. P.; Whitaker, J. S.; Sardeshmukh, P. D.; Matsui, N.; Allan, J. R.; Yin, X.; Gleason, B. E.; Vose, R. S.; Rutledge, G.; Bessemoulin, P.; Brönnimann, S.; Brunet, M.; Crouthamel, R. I.; Grant, A. N.; Groisman, P. Y.; Jones, P. D.; Kruk, M.; Kruger, A. C.; Marshall, G. J.; Maugeri, M.; Mok, H. Y.; Nordli, Ø.; Ross, T. F.; Trigo, R. M.; Wang, X. L.; Woodruff, S. D.; Worley, J. S.: The Twentieth Century Reanalysis Project. In: *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 1–28, <https://doi.org/10.1002/qj.776>, 2011.

Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Stand: 2017, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.

Dee, D. P.; Uppala, S. M.; Simmons, A. J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M. A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A. C. M.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A. J.; Haimberger, L.; Healy, S. B.; Hersbach, H.; Holm, E. V.; Isaksen, L.; Kallberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A. P.; Monge-Sanz, B. M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; deRosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.-N.; Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, <https://doi.org/10.1002/qj.828>, 2011.

DGJa: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Küstengebiet der Nordsee 2013. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein, 2014.

DGJb: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet 2015. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 2018.

DGJc: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung 2014. Hamburg Port Authority, 2015.

EXTREMENESS Gruppe (Ralf Weisse, Iris Grabemann, Lidia Gaslikova, Elke Meyer, Birger Tinz, Natacha Fery, Thomas Möller, Elisabeth Rudolph, Tabea Brodhagen, Arne Arns, Jürgen Jensen, Marius Ulm, Beate Ratter, Jürgen Schaper): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. In: Die Küste, 87, <https://doi.org/10.18171/1.087110>, 2019.

Feser, F.; Weisse, R.: Multi-decadal atmospheric modeling for Europe yields multi-purpose data. In: Eos, Transactions American Geophysical Union, 82, 28, 305–310, 2001.

FHH Freien und Hansestadt Hamburg - Behörde für Justiz und Gleichstellung: Wasserstände für die Planung öffentlicher Hochwasserschutzanlagen. In: Amtlicher Anzeiger, 63, 1282–1283, 2013.

Ganske, A.; Tinz, B.; Rosenhagen, G.; Heinrich, H.: Interannual and multidecadal changes of wind speed and directions over the North Sea from climate model results. In: Meteorologische Zeitschrift, <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0673>, 2016.

Ganske, A.; Fery, N.; Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Weisse, R.; Tinz, B.: Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. In: Ocean Dynamics, 68, 1371–1382, <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1190-4>, 2018.

Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Groll, N.: Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. In: Nat Hazards, 66, 3, 1501–1518, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0279-1>, 2013.

Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Weisse, R.; Groll, N.: Storm surge climatology for the NE Atlantic and the North Sea – where the new RCP 8.5 scenario lead us to? Proceedings of the 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazard Symposium, <http://www.waveworkshop.org/>, 2016.

Gerber, M.; Ganske, A.; Müller-Navarra, S. H.; Rosenhagen, G.: Categorisation of meteorological conditions for storm tide episodes in the German Bight. In: Meteorologische Zeitschrift, 25, 447–462, <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0660>, 2016.

GFDL Global Atmospheric Model Development Team; Anderson, J. L.; Balaji, V.; Broccoli, A. J.; Cooke, W. F.; Delworth, T. L.; Garner, S. T.: The new GFDL global atmosphere and land model AM2–LM2: Evaluation with prescribed SST simulations. In: Journal of Climate, 17, 24, 4641–4673, 2004.

Hasse, L.: Note on the Surface-to-Geostrophic Wind Relationship from Observations in the German Bight. In: Boundary-Layer Meteorology, 6, 197–201, <https://doi.org/10.1007/BF00232484>, 1974.

Hazeleger, W.; Severijns, C.; Semmler, T.; Ștefănescu, S.; Yang, S.; Wang, X.; Wyser, K.; Dutra, E.; Baldasano, J. M.; Bintanja, R.; Bougeault, P.; Caballero, R.; Ekman, A. M. L.; Christensen, J. H.; van den Hurk, B.; Jimenez, P.; Jones, C.; Källberg, P.; Koenigk, T.; McGrath, R.; Miranda, P.; van Noije, T.; Palmer, T.; Parodi, J. A.; Schmith, T.; Selten, F.;

- Storelvmo, T.; Sterl, A.; Tapamo, H.; Vancoppenolle, M.; Viterbo, P.; Willén, U.: EC-Earth. A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action. In: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1357–1364, <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2877.1>, 2010.
- Hollweg, H. D.; Böhm, U.; Fast, I.; Hennemuth, B.; Keuler, K.; Keup-Thiel, E.; Lauten-schlager, M.; Legutke, S.; Radtke, K.; Rockel, B.; Schubert, M.; Will, A.; Woldt, M.; Wunram, C.: Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. Technical report 3, Support for Climate- and Earth System Research at the Max Planck Institute for Meteorology, 2008. ISSN 1619-2257.
- Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A. (Hg.): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 2001. ISBN 052101495 6.
- Jensen, J.; Mudersbach, C.; Müller-Navarra, S. H.; Bork, I.; Koziar, C.; Renner, V.: Modell-gestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: *Die Küste*, 71, 123–167, 2006.
- IPCC (Hg.): *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Unter Mitarbeit von Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung et al. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D.: The NCEP/NCAR reanalysis project. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471, 1996.
- Kapitza, H.; Eppel, D. P.: Simulating morphodynamical processes on a parallel system. In: Spaulding, M. L.; Butler, H. L. (Hg.): *Estuarine and Coastal Modeling*, 1182–1191. American Society of Civil Engineers, 2000.
- Kistler, R.; Kalnay, E.; Collins, W.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Kanamitsu, M.; Kousky, V.; van den Dool, H.; Jenne, R.; Fiorino, M.: The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 247–268, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2), 2001
- KLEVER. Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden. Stand: Oktober 2019: https://uol.de/fileadmin/user_upload/proj/klever/KLEVER/KLEVER-Ergebnisbroschuere.pdf, 2018.
- Kruhl, H.: Sturmflutwetterlagen. In: *Promet*, 8, 6–8, 1978.
- Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe Küstenschutzwerke: Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. In: *Die Küste*, 10, 1, 113–130, 1962.
- Lyard, F.; Lefevre, F.; Letellier, T.; Francis, O.: Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. In: *Ocean Dynamics*, 56, 394–415, 2006.

Nakicenovic, N.; Swart, R., editors: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on Emission Scenarios. Cambridge University Press, United Kingdom, Summary available online at <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>, 2000.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, <http://www.nlwkn.niedersachsen.de>, 2007.

Oumeraci, H.; Gönnert, G.; Jensen, J.; Kortenhaus, A.; Fröhle, P.; Gerkenmeier, B.; Wahl, T.; Mudersbach, C.; Naulin, M.; Ujeyl, G.; Pasche, E.; Dassanayake, D. R.; Burzel, A.: XtremRisk: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten - Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel. Abschlussbericht, 2012.

Pätsch, J.; Burchard, H.; Dieterich, C.; Gräwe, U.; Gröger, M.; Mathis, M.; Kapitza, H.; Bersch, M.; Moll, A.; Pohlmann, T.; Su, J.; Ho-Hagemann, H.; Schulz, A.; Elizalde, A.; Eden, C.: An evaluation of the North Sea circulation in global and regional models relevant for ecosystem simulations. *Ocean Modelling*, 116, 70–95, <https://doi.org/10.1016/j.oceanmod.2017.06.005>, 2017.

Rockel, B.; Will, A.; Hense, A.: The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). In: *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 4, 347–348, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>, 2008.

Röckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblüeh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U.; Tompkins, A.: The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: model description. MPI - rep 349, Max Planck Institute for Meteorology, 2003.

Rosenhagen, G.; Bork, I.: Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872. In: *Die Küste*, 75, 51–70, 2009.

Rudolph, E.: Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. In: *Die Küste*, 81, 291–300, 2014.

Samuelsson, P.; Jones, C.; Willen, U.; Ullerstig, A.; Gollvik, S.; Hansson, U.; Jansson, C.; Kjellström, E.; Nikulin, G.; Wyser, K.: The Rossby-Center-Climate Model RCA3: model description and performance. In: *Tellus A*, 63, 4–23, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x>, 2011.

Schaper, J.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Ratter, B. M. W.; Weiße, R.: Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten: Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation. In: *Die Küste*, 87, <https://doi.org/10.18171/1.087112>, 2019.

Scoccimarro, E.; Gualdi, S.; Bellucci, A.; Sanna, A.; Fogli, R. G.; Manzini, E.; Vichi, M.; Oddo, P.; Navarra, A.: Effects of tropical cyclones on ocean heat transport in a high-resolution coupled general circulation model. In: *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4104.1>, 2011.

Sehili, A. M.; Lang, G.; Lippert, C.: High resolution subgrid models: background, grid generation and implementation. In: *Ocean Dynamics*, 64, 4, 519–535, 2014.

Stevens, B.; Giorgetta, M.; Esch, M.; Mauritsen, T.; Crueger, T.; Rast, S.; Salzmann, M.; Schmidt, H.; Bader, J.; Block, K.; Brokopf, R.; Fast, I.; Kinne, S.; Kornbluh, L.; Lohmann, U.; Pincus, R.; Reichler, T.; Roeckner, E.: Atmospheric component of the MPI-M earth system model: ECHAM6. In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 2, 146–172, <https://doi.org/10.1002/jame.20015>, 2013.

Smith, S. D.; Banke, E. G.: Variation of Sea Surface Drag Coefficient with WindSpeed. In: *Quart. Jour. of the Royal Meteorological Society*, 101, 665–673, 1975.

Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, B.; Midgley, P. M. et al.: *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, 2013.

Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A.: An overview of CMIP5 and the experiment design. In: *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>, 2010.

Uppala, S. M.; Kållberg, P. W.; Simmons, A. J.; Andrae, U.; da Costa Bechtold, V.; Fiorino, M.; Gibson, J. K.; Haseler, J.; Hernandez, A.; Kelly, G. A.; Li, X.; Onogi, K.; Saarinen, S.; Sokka, N.; Allan, R. P.; Andersson, E.; Arpe, K.; Balmaseda, M. A.; Beljaars, A. C. M.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Caires, S.; Chevallier, F.; Dethof, A.; Dragosavac, M.; Fisher, M.; Fuentes, M.; Hagemann, S.; Hólm, E.; Hoskins, B. J.; Isaksen, I.; Janssen, P. A. E. M.; Jenne, R.; McNally, A. P.; Mahfouf, J.-F.; Morcrette, J.-J.; Rayner, N. A.; Saunders, R. W.; Simon, P.; Sterl, A.; Trenberth, K. E.; Untch, A.; Vasiljevic, D.; Viterbo, P.; Woollen, J.: The ERA-40 reanalysis. In: *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961–3012, <https://doi.org/10.1256/qj.04.176>, 2005.

van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G. C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J.-F.; Masui, T.; Meinshausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S.J.; Rose, S. K.: The representative concentration pathways: an overview. In: *Climatic Change*, 109, 5, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>, 2011.

Weisse, R.; Gaslikova, L.; Geyer, B.; Groll, N.; Meyer, E.: coastDat - Model data for science and industry. In: *Die Küste*, 81, 5–18, 2014.

Weisse, R.; Bisling, P.; Geyer, B.; Gaslikova, L.; Hortamani, M.; Groll, N.; Matthias, V.; Maneke, M.; Meinke, I.; Meyer, E. M. I.; Schwichtenberg, F.; Stempinski, F.; Wiese, F.; Wöckner-Kluwe, K.: Climate services for marine applications in Europe. *Earth Perspectives*, <https://doi.org/10.1186/s40322-015-0029-0>, 2015.

Weisse, R.; Plüß, A.: Storm-related sea-level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution hindcast 1958–2002. In: *Ocean Dynamics*, 56, 16–25, 2006.