

Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt

EXTREMENESS Gruppe (Ralf Weisse¹, Iris Grabemann², Lidia Gaslikova², Elke Meyer², Birger Tinz³, Natacha Fery³, Thomas Möller³, Elisabeth Rudolph⁴, Tabea Brodhagen⁴, Arne Arns⁵, Jürgen Jensen⁵, Marius Ulm⁵, Beate Ratter⁶, Jürgen Schaper⁶)

¹ *Helmholtz-Zentrum Geesthacht, ralf.weisse@hzg.de*

² *Helmholtz-Zentrum Geesthacht*

³ *Deutscher Wetterdienst*

⁴ *Bundesanstalt für Wasserbau*

⁵ *Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt*

⁶ *Universität Hamburg, Institut für Geographie*

Zusammenfassung

Das Projekt EXTREMENESS verfolgte das Ziel, extreme Nordseesturmfluten zu identifizieren und zu beschreiben, die zum einen extrem unwahrscheinlich, zum anderen aber noch physikalisch plausibel sind. Darauf aufbauend wurden in einem transdisziplinären Ansatz mögliche Auswirkungen untersucht und diskutiert, welche Maßnahmen und Handlungsoptionen im Umgang mit solchen Extremereignissen existieren. EXTREMENESS leistet damit wichtige Beiträge zur Diskussion über Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes und Risikomanagements.

Schlagwörter

Sturmfluten, Extremereignisse, Risikomanagement, Katastrophenschutz, Küstenschutz, Emden, kaskadierende Ereignisse, EXTREMENESS

Summary

The objectives of the project EXTREMENESS were to provide detailed information and assessment of storm surge events that are highly unlikely but which are potentially linked with extreme consequences. In a transdisciplinary approach scientists together with a group of stakeholders from authorities, disaster risk management, industry and other interest groups identified those elements of severe storm tides that may create risk for strong impacts and cascading effects and analyzed options to mitigate and to deal with potential consequences. This way EXTREMENESS provides a contribution to the ongoing discussion on adaptation and needs for future sustainable coastal protection and risk management.

Keywords

storm surges, storm tides, extreme events, disaster risk management, coastal protection, Emden, cascading effects, EXTREMENESS

1 Einleitung

Sturmfluten und ihre möglichen Auswirkungen stellen für die niedrig gelegenen, zum großen Teil durch Deiche geschützten Regionen der deutschen Nordseeküste eine permanente Bedrohung dar. Historische Stürme und Sturmfluten sind dabei fest im Gedächtnis der Küstenbewohner verankert. Darunter befinden sich auch die beiden Sturmflutkatastrophen des vergangenen Jahrhunderts aus den Jahren 1953 und 1962, die jeweils mehrere tausend Hektar Land überfluteten und grenzüberschreitend in den Niederlanden, Großbritannien und Deutschland über tausend Todesopfer forderten. Seitdem wurde der Küstenschutz an der deutschen Nordseeküste massiv verstärkt und verbessert. So verursachten jüngere Ereignisse, deren Wasserstände zum Teil deutlich über denen aus 1953 und 1962 lagen, keine wesentlichen Schäden.

Im Verlauf der letzten ca. 100 Jahre ist der Meeresspiegel in der Nordsee um etwa 20 cm gestiegen (Wahl et al. 2013). Allein dadurch laufen Nordseesturmfluten heute höher auf als noch vor einhundert Jahren, obwohl sich das Sturmklima seitdem nicht systematisch verändert hat (Weisse et al. 2012, Krueger et al. 2019, Krieger et al. 2020). Für die Zukunft wird infolge des anthropogenen Klimawandels mit einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg gerechnet (IPCC 2019). Aussagen hinsichtlich möglicher zukünftiger Änderungen der Sturmaktivität sind nach wie vor mit großen Unsicherheiten behaftet (Feser et al. 2015, Christensen et al. 2015).

Die Verantwortlichen im Bereich des Küstenschutzes sehen sich mit der Herausforderung konfrontiert, den Küstenschutz und das Risikomanagement unter diesen Unsicherheiten an mögliche Veränderungen robust und nachhaltig anzupassen. Dabei können sie sich auf historische Beobachtungen, die Auswertung von Messdaten und die Analyse von Klimaprojektionen für die Zukunft stützen. Während diese Daten hilfreiche Aussagen über Veränderungen in Form von Trends statistischer Parameter liefern, ermöglichen sie jedoch keine Aussagen über die für das Risikomanagement wichtigen Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aber potentiell hohen Auswirkungen. Diese Problematik wurde unseres Wissens nach erstmalig im vom KFKI geförderten Projekt „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste“ (MUSE) (Jensen et al. 2006) aufgenommen. Mit Hilfe archivierter Ensemblewettervorhersagen wurden eine Reihe historischer Stürme und Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste simuliert und untersucht, inwieweit diese Sturmfluten aufgrund leicht geänderter Wetterabläufe (wie sie aus den Ensemblevorhersagen entnommen wurden) potentiell höher hätten auflaufen können. Während beispielsweise für die Sturmflut von 1962 auf diese Weise keine wesentlichen Veränderungen gefunden wurden, konnten die Scheitelwasserstände während der Sturmflut im Januar 1976, die über denen von 1962 lagen, so gegenüber den Beobachtungen lokal um bis zu 140 cm erhöht werden (Jensen et al. 2006).

Im Projekt EXTREMENESS haben wir die Idee aus MUSE aufgegriffen und weiterentwickelt. Ähnlich wie in MUSE verfolgte EXTREMENESS zunächst das Ziel, in vorliegenden Daten extreme Sturmflutereignisse ausfindig zu machen, die zum einen sehr unwahrscheinlich, zum anderen aber trotzdem noch physikalisch plausibel und möglich sind. Im Vergleich zu MUSE stützte sich EXTREMENESS dabei auf wesentlich umfangreicheres Datenmaterial und untersuchte weitere potentielle Verstärkungsmechanismen, wie zum

Beispiel den Einfluss des Auftretens des Windmaximums relativ zur Tidephase. Ein zusätzlicher, wesentlicher und neuer Aspekt in EXTREMENESS ist die transdisziplinäre Betrachtung und Analyse möglicher Auswirkungen und Möglichkeiten im Umgang mit solchen Extremereignissen, die einen Beitrag zur Diskussion über Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes und Risikomanagements liefern sollen.

Im vorliegenden Beitrag werden grob die allgemeine Herangehensweise (Kapitel 2), die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse (Kapitel 3) sowie Schlussfolgerungen (Kapitel 4) dargestellt. Detaillierte Beschreibungen der Teilprojekte A, B und C, die sich mit der Identifikation von extremen Ereignissen und möglichen Verstärkungsmechanismen befassen, sind in Rudolph et al. (2019) in diesem Heft dargestellt. Vorgehensweise und Ergebnisse der Teilprojekte D und E, die sich mit den Auswirkungen und der transdisziplinären Analyse befassen, sind in Schaper et al. (2019) ebenfalls in diesem Heft beschrieben.

2 Methoden und Herangehensweise

Ziel von EXTREMENESS war es, mögliche extreme Sturmflutereignisse zu identifizieren, die zum einen extrem unwahrscheinlich, zum anderen aber trotzdem noch physikalisch plausibel sind und die mit extremen Schäden oder Auswirkungen verbunden sein können. Dazu galt es zunächst einmal aus Sicht des Risikomanagements und anderer Akteure herauszuarbeiten, was die verschiedenen am Projekt beteiligten Gruppen unter extremen Sturmfluten verstanden. In der transdisziplinären Herangehensweise stellte sich dabei heraus, dass neben der Höhe der Scheitelwasserstände auch die Verweildauer hoher Wasserstände und Serien von Sturmfluten innerhalb kurzer Zeiträume eine zentrale Rolle spielten (Schaper et al. 2019). Infolge dessen wurden im Projektverlauf neben sehr hohen, auch sehr lange Sturmfluten und Sturmflutserien in die Untersuchungen einbezogen.

In einem ersten Schritt wurde versucht, extreme Realisierungen der oben erwähnten Merkmale in einem möglichst umfangreichen meteo-marinen Datensatz zu identifizieren (Abbildung 1). Dazu wurden unter anderem Ensemble atmosphärischer Reanalysen sowie Daten meteo-mariner Hindcasts und Klimaprojektionen untersucht. Da bei den Klimaprojektionen keine wesentliche Änderung der Sturmaktivität zum Ende des 21. Jahrhunderts diagnostiziert werden konnte, wurde davon ausgegangen, dass identifizierte Realisationen extremer Sturmflutereignisse in diesen Datensätzen mit Ausnahme des Beitrags des steigenden Meeresspiegels bereits heute möglich wären. Weiterhin wurden mit Hilfe archivierter Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes Windfelder für historische Sturmfluten (wie beispielsweise der für Teile Ostfrieslands bisher höchsten Sturmflut vom 13. März 1906) durch Zeichnen und Digitalisieren von Wetterkarten erstellt und anschließend die Sturmfluten mit einem Wasserstandsmodell nachsimuliert. Insgesamt wurde auf diese Weise ein hauptsächlich aus Modelldaten bestehender Datensatz von etwa 13.000 Jahren nach extremen Sturmfluten durchsucht. Details der Vorgehensweise sind in Ganske et al. (2018) und in Rudolph et al. (2019) beschrieben.

Während dieser Teil der Arbeiten für die gesamte deutsche Nordseeküste durchgeführt wurde, wurden die daran anschließenden Arbeiten aufgrund der umfangreichen iterativen und transdisziplinären Herangehensweise exemplarisch für die Region Emden und das Emsästuar durchgeführt. Hier wurden für die ausgewählten Extreme zunächst Sensitivitätsstudien hinsichtlich möglicher Verstärkungsmechanismen, wie z. B. der Einfluss des

Auftretens eines Sturms zu verschiedenen Tidephasen, durchgeführt. Anschließend wurden für die extremsten Fälle hochaufgelöste Rechnungen für das Emsästuar durchgeführt, in denen ebenfalls verschiedene Mechanismen wie z. B. der Einfluss des Abflusses, der Steuerung des Emssperrwerks, oder des steigenden Meeresspiegels analysiert wurden. Details sind in Rudolph et al. (2019) erläutert.

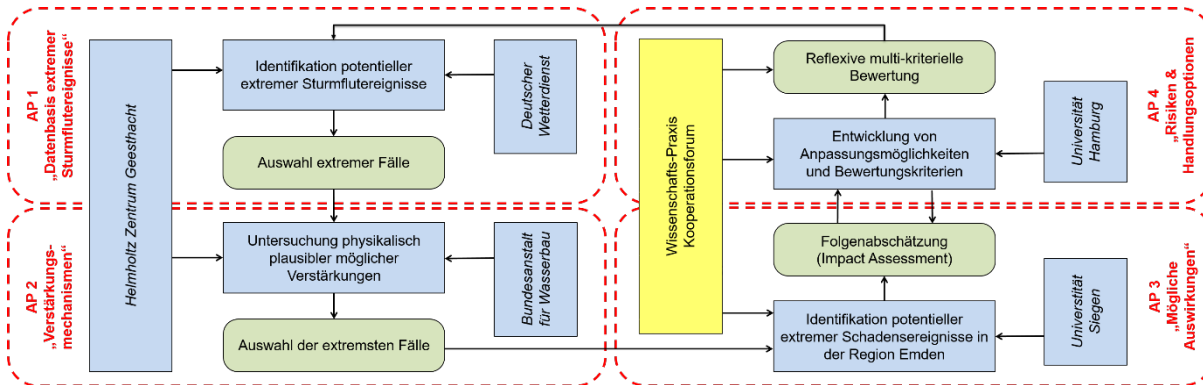


Abbildung 1: Wechselbeziehungen zwischen den Arbeitspaketen (rot), den einzelnen Arbeitsschritten sowie den Rollen der Projektpartner (blau) und den Hauptergebnissen (grün). Zusätzlich ist die Rolle des Kooperationsforums (gelb) dargestellt.

Die verbleibenden extremsten Fälle bildeten daran anschließend die Grundlage für die Analyse möglicher Auswirkungen und Maßnahmen im Risikomanagement (Schaper et al. 2019). Dazu wurden unter anderem die Schadenspotenziale dieser Ereignisse im Vergleich zu einer Referenzflut untersucht. Als Referenzflut wurde die Allerheiligenflut 2006 verwendet, die im kollektiven Gedächtnis in der Region ein seltenes, aber noch aktuelles und erinnerbares Extremereignis darstellt. Diese Darstellungsweise unterstützte die Verknüpfung möglicher Auswirkungen und Schäden in Bezug zu einem bekannten Ereignis („Was wäre gewesen, wenn das 2006 passiert wäre?“) ohne konkrete monetäre Betrachtungsweise. Details sind in Schaper et al. (2019) beschrieben.

Basierend auf den extremen Sturmflutereignissen wurden in einem iterativen Prozess in einer Serie transdisziplinärer Workshops narrative Szenarien entwickelt, Auswirkungen simuliert, neuralgische Punkte identifiziert sowie mögliche Maßnahmen zur Unterbrechung von Versagenskaskaden und zur Anpassung eruiert, um über Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes und Risikomanagements zu diskutieren. Details dieser Arbeiten und Vorgehensweise sind in Schaper et al. (2019) beschrieben.

3 Wesentliche Ergebnisse

Im ersten durchgeführten transdisziplinären Workshop beschäftigten sich die Teilnehmer mit der Frage, was aus Sicht des Risikomanagements das *Extreme* an einer außergewöhnlichen, unerwarteten Sturmflut sein kann. Aus Sicht des Katastrophenschutzes kann so zum Beispiel neben der Höhe auch die Verweildauer oder Serien kurz aufeinanderfolgender Sturmfluten aufgrund der Andauer zu extremen Problemen im Risikomanagement führen. Im weiteren Projektverlauf wurde deshalb sowohl hohe, als auch langandauernde und Serien kurz aufeinanderfolgender Sturmfluten betrachtet.

Bei der Suche nach *hohen* Extremereignissen wurden in den Datensätzen Ereignisse identifiziert, deren Scheitelwasserstände zum Teil über den bisher beobachteten Maximalwerten, aber noch unterhalb der Bemessungswasserstände liegen. So beträgt beispielsweise für Borkum der höchste seit 1900 gemessene Wasserstand 4,06 m NHN (März 1906). Analysen mit für diesen Fall rekonstruierten Windfeldern und entsprechende Variationen der Tidephase lieferten für dieses Ereignis kein wesentliches Erhöhungspotential, da der beobachtete Scheitelwasserstand bereits zu einer Springtide auftrat. In den untersuchten meteo-marinen Modelldaten wurden jedoch Sturmfluten mit höheren Wasserständen als der 1906 beobachtete identifiziert. Für Borkum betrug der höchste so ermittelte Scheitelwasserstand beispielsweise 4,71 m NHN, welcher durch Variation der Tidephase um weitere 52 cm auf 5,23 m NHN erhöht werden konnte. Dieser Wert liegt damit plausibel in der Größenordnung, die am selben Pegel im Projekt MUSE für eine Variante der Sturmflut vom Januar 1976 erzielt werden konnte (4,99 m NHN, Jensen et al. 2006).

Bei der Untersuchung *langanhaltender* und von *Serien kurz aufeinanderfolgender* Sturmfluten wurde die Definition des BSH zugrunde gelegt, wonach der Wasserstand bei einer Sturmflut mindestens 1,50 m über dem mittleren Hochwasser liegt. Unter dieser Annahme besteht die extremste in den meteo-marinen Modelldaten identifizierte Sturmflutserie aus einem Cluster von insgesamt sieben Sturmfluten innerhalb einer Woche. Diese Serie enthält gleichzeitig auch die Flut mit der längsten Verweildauer, bei der der Wasserstand bei Borkum über 45 Stunden nicht unter das mittlere Tidehochwasser fällt. Ein weiterer Meeresspiegelanstieg in der Nordsee erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände um den Betrag des Meeresspiegelanstieges bis weit in das Emsästuar hinein und verkürzt das für eine Entwässerung (ohne Pumpen) der eingedeichten Niederungsgebiete zur Verfügung stehende Zeitfenster bei Sturmfluten deutlich. Weitere Einzelheiten sind in Rudolph et al. (2019) beschrieben.

Schadenspotenzialanalysen für die entwickelten Szenarien zeigten, dass die möglichen Auswirkungen gegenüber der Referenzflut von 2006 zum Teil deutlich erhöht sind. So lag beispielsweise für die oben beschriebene extreme hohe Flut das über das gesamte Gebiet betrachtete Schadenspotenzial um etwa einen Faktor drei über dem der Referenzflut. Für die langanhaltende Sturmflut ist das Gesamtschadenspotenzial gegenüber dem der Referenzflut in etwa verdoppelt. Die Vergrößerung der Schadenspotenziale ist dabei sowohl auf den höheren seeseitigen Wasserstand bei potentielltem Versagen, als auch auf die längere Zeit, in der der Wasserstand dabei über der Deichfußhöhe läge, zurückzuführen. Details sind in Schaper et al. (2019) beschrieben.

Der Umgang mit möglichen Auswirkungen sowie die Ableitung und Bewertung von Maßnahmen und Handlungsnotwendigkeiten war Teil des transdisziplinären Prozesses im Projektverlauf. Basierend auf den entwickelten Szenarien wurden dazu verschiedene Situationen mit den beteiligten Akteuren in einem Planspiel analysiert. Dabei zeigte sich, dass der Küstenschutz in Ostfriesland gegenwärtig gut aufgestellt ist. Forschungs- und Handlungsbedarfe zeigten sich unter anderem bei möglichen kaskadierenden Effekten. Hier wurde insbesondere die Notwendigkeit verdeutlicht, die Gefahren von Nordseesturmfluten und kritischen Entwässerungszuständen gemeinsam zu betrachten, um die Sicherheit der Region auch in Zukunft bei weiter steigendem Meeresspiegel und möglichen Veränderungen in der Häufigkeit und/oder Intensität von Extremereignissen (z. B. Starkniederschläge) langfristig und nachhaltig zu gewährleisten (Ratter und Schaper 2019). Dabei

spielen insbesondere auch der mögliche Umgang der Akteure mit den Auswirkungen kaskadenartiger Ereignisse auf kritische Infrastrukturen wie Strom-, Gas- und Wasserversorgung sowie auf Entwässerung und Verkehrswege eine Rolle. Weitere Einzelheiten sind in Schaper et al. (2019) beschrieben.

4 Zusammenfassung

Das Projekt EXTREMENESS befasste sich mit Identifikation und der Analyse extremer Sturmflutereignisse, die zum einen sehr unwahrscheinlich aber trotzdem noch physikalisch plausibel und möglich sind. Ein wesentlicher Schwerpunkt dabei war die transdisziplinäre Herangehensweise, bei der zum einen herausgearbeitet wurde, was aus Sicht der regionalen Akteure ein Extremereignis ausmacht, zum anderen potentielle Auswirkungen und Möglichkeiten im Umgang mit solchen Extremereignissen betrachtet wurden. Im Laufe des Prozesses wurden bisher nicht aufgetretene Ereignisse identifiziert und narrative Szenarien über deren Wirkungen und Folgen entwickelt. Die Simulation möglicher Auswirkungen und die Diskussion von Handlungsoptionen zeigten, dass der Küstenschutz in Ostfriesland gegenwärtig gut aufgestellt ist, aber Bedarf an weiteren Untersuchungen zum Auftreten und möglichen Auswirkungen kaskadierender Effekte bestehen. EXTREMENESS hat damit wesentliche Beiträge zur Diskussion über Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes und Risikomanagements geliefert, die unter anderem auch Eingang in eine im Dezember 2018 durchgeführte Katastrophenschutzübung der Stadt Emden fanden (Schaper et al. 2019).

5 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das das Projekt EXTREMENESS im Rahmen der Fördermaßnahme „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee“ im Rahmenprogramm FONA 3 (Förderkennzeichen 03F0758A-E) über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Wir danken weiterhin dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die fachliche Begleitung des Projektes in der Bearbeitungsphase. Zu besonderem Dank sind wir den Mitgliedern des Kooperationsforums in Emden verpflichtet, die uns während der Projektlaufzeit sowohl mit ihrem Wissen als auch logistisch unterstützt und das Projekt kritisch und konstruktiv begleitet haben.

6 Literaturverzeichnis

Christensen, Ole Bøssing; Kjellström, Erik; Zorita, Eduardo: Projected Change—Atmosphere. In: The BACC Author Team, II (Hg.): Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Cham: Springer International Publishing (Regional Climate Studies), 217–233, 2015.

Feser, F.; Barcikowska, M.; Krueger, O.; Schenk, F.; Weisse, R.; Xia, L.: Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review. In: Q.J.R. Meteorol. Soc, 141, 687, 350–382. <https://doi.org/10.1002/qj.2364>, 2015.

Ganske, Anette; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Weisse, Ralf; Tinz, Birger: Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. In: *Ocean Dynamics*, 68, 10, 1371–1382. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1190-4>, 2018.

IPCC: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Tignor, M.; Poloczanska, E. et al. (Hg.): *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, in press, 2019.

Jensen, Jürgen; Mudersbach, Christoph; Müller-Navarra, Sylvain H.; Bork, Ingrid; Koziar, Christian; Renner, Volker: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: *Die Küste*, 71, 123–167, 2006.

Krieger, Daniel; Krueger, Oliver; Feser, Frauke; Weisse, Ralf; Tinz, Birger; Storch, Hans: German Bight storm activity, 1897-2018. In: *Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.6837>, 2020.

Krueger, Oliver; Feser, Frauke; Weisse, Ralf: Northeast Atlantic Storm Activity and Its Uncertainty from the Late Nineteenth to the Twenty-First Century. In: *J. Climate*, 32, 6, 1919–1931. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0505.1>, 2019.

Ratter, Beate M. W.; Schaper, Jürgen: Risiko-Management in der „Badewanne“. Wenn in Ostfriesland bei Sturmflut Wasser von allen Seiten kommt. In: *Geographische Rundschau* 9, 28–39, 2019.

Rudolph, Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Ganske, Anette; Grabemann, Iris et al.: Analyse extremer Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste und ihre möglichen Verstärkungen. In: *Die Küste*, 87, 2019.

Schaper, Jürgen; Ulm, Marius; Arns, Arne; Jensen, Jürgen; Ratter, Beate M.W.; Weiße, Ralf: Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten: Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation. In: *Die Küste*, 87, 2019.

Wahl, T.; Haigh, I. D.; Woodworth, P. L.; Albrecht, F.; Dillingh, D.; Jensen, J. et al.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. In: *Earth-Science Reviews* 124, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003>, 2013.

Weisse, Ralf; Storch, Hans von; Niemeyer, Hanz Dieter; Knaack, Heiko (2012): Changing North Sea storm surge climate. An increasing hazard? In: *Ocean & Coastal Management*, 68, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005>, 2012.