

EXTREME NORTH SEA STORM SURGES AND THEIR CONSEQUENCES

Schlussbericht
10/2016 bis 09/2019



Gefördert durch: BMBF
Förderkennzeichen: 03F0758A-E
Fördermaßnahme: Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee
Rahmenprogramm: Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA 3)

INHALTSVERZEICHNIS

Inhalt

Projektpartner	1
Zusammenfassung	2
EXTREMENESS-A	4
EXTREMENESS-B	15
EXTREMENESS-C	25
EXTREMENESS-D	42
EXTREMENESS-E	49
Anhang	61
Gemeinsames Literaturverzeichnis	63

Projektpartner

HELMHOLTZ-ZENTRUM GEESTHACHT, INSTITUT FÜR KÜSTENFORSCHUNG (HZG)

Max-Planck-Str. 1, 21502 Geesthacht

Dr. Ralf Weisse (Verbundkoordinator)

Telefon: +49-(0)4152-87-2819, Email: ralf.weisse@hzg.de

Titel: Analyse extremer Sturmfluten und möglicher Verstärkungen (EXTREMENESS-A)

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD)

Bernhard Nocht Straße 76, 20359 Hamburg

Dr. Birger Tinz

Telefon: +49-(0)69-8062-6250, Email: birger.tinz@dwd.de

Titel: Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können (EXTREMENESS-B)

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW)

Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg

Dr. Elisabeth Rudolph

Telefon: +49-(0)40-81908-361, Email: elisabeth.rudolph@baw.de

Titel: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkungen (EXTREMENESS-C)

UNIVERSITÄT SIEGEN

FORSCHUNGSINSTITUT WASSER UND UMWELT (FWU)

Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57076 Siegen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen, Dr.-Ing. Arne Arns

Telefon: +49-(0)271-740-2172, Email: juergen.jensen@uni-siegen.de

Titel: Analyse möglicher Auswirkungen extremer Sturmfluten (EXTREMENESS-D)

UNIVERSITÄT HAMBURG (UNIHH)

INSTITUT FÜR GEOGRAFIE

Bundesstraße 55, 20146 Hamburg

Prof. Dr. Beate M.W. Ratter

Telefon: +49-(0)40-42838-5225, Email: beate.ratter@uni-hamburg.de

Titel: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen (EXTREMENESS-E)

Zusammenfassung

VERANLASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Sturmfluten und deren möglichen Auswirkungen stellen für die niedrig gelegenen, zum großen Teil durch Deiche geschützten Regionen der deutschen Nordseeküste eine ständige Bedrohung dar. Obwohl sich das Windklima in der jüngsten Vergangenheit nicht systematisch verändert hat, laufen allein durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels Sturmfluten unter ansonsten gleichen Wetterbedingungen heute höher auf, als noch vor etwa 100 Jahren. Mögliche zukünftige Änderungen sind nach wie vor mit zum Teil erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Die Verantwortlichen im Küsten- und Katastrophenschutz sehen sich heute mit der Herausforderung konfrontiert, Vorsorge und Risikomanagement robust und nachhaltig an solche unsicheren Veränderungen anzupassen. Während die Analysen historischer Daten und von Klimaprojektionen hilfreiche Aussagen in Form von Veränderungen statistischer Parameter liefern, ermöglichen sie jedoch keine Aussagen über die für das Risikomanagement wichtigen Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aber potentiell hohen Auswirkungen.

Das Projekt EXTREMENESS hatte es sich deshalb zum Ziel gesetzt, solche extrem unwahrscheinlichen aber physikalisch noch plausiblen Nordseesturmfluten zu identifizieren, zu beschreiben und deren potentiellen Auswirkungen zu untersuchen.

METHODEN UND VORGEHENSWEISE

In einem transdisziplinären Ansatz wurde mit lokalen Stakeholdern zunächst herausgearbeitet, welche Eigenschaften eine Sturmflut aus Sicht des Risikomanagements und der verschiedenen Akteure extrem erscheinen lassen. Anhand dieser Eigenschaften wurde eine Reihe von Metriken ausgewählt, mit deren Hilfe solche Ereignisse in einem möglichst umfangreichen Datenmaterial identifiziert werden sollten. Das Datenmaterial wurde dabei so ausgewählt, dass es physikalisch plausible, wenn auch so bisher noch nicht eingetretene Sturmfluten und Wetterlagen umfassen sollte. Dazu wurden neben Beobachtungen auch umfangreiche Ensembles atmosphärischer und meteo-mariner Reanalysen sowie von Klimaprojektionen eingesetzt, in denen keine systematische Veränderung der Sturmaktivität analysiert werden konnte. Insgesamt umfasst der so in EXTREMENESS untersuchte Datensatz mehr als 13.000 Datenjahre. Die in diesem Datensatz identifizierten und ausgewählten Ereignisse wurden hinsichtlich potentieller Verstärkungsmechanismen untersucht, d.h. es wurde analysiert inwieweit die ausgewählten Ereignisse noch extremer hätten ausfallen können.

Darauf aufbauend wurden in einem transdisziplinären Ansatz mögliche Auswirkungen untersucht und diskutiert, welche Maßnahmen und Handlungsoptionen im Umgang mit solchen Extremereignissen existieren. EXTREMENESS leistete damit wichtige Beiträge zur Diskussion über Anpassung, Formen und Notwendigkeiten eines zukünftigen Küstenschutzes und Risikomanagements.

Dazu gliederte sich das Vorhaben in die folgenden Teilvorhaben, deren Aufgabenstellung, Vorgehensweise und Ergebnisse im Folgenden beschrieben sind:

ZUSAMMENFASSUNG

- EXTREMENESS-A: Analyse extremer Sturmfluten und möglicher Verstärkungen (HZG)
- EXTREMENESS-B: Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können (DWD)
- EXTREMENESS-C: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkung (BAW)
- EXTREMENESS-D: Analyse möglicher Auswirkungen extremer Sturmfluten (FWU)
- EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen (UniHH)

WESENTLICHE ERGEBNISSE

Während oftmals in der Öffentlichkeit extreme Sturmfluten mit ungewöhnlich hohen Ereignissen assoziiert werden, stellte sich als ein erstes und wesentliches Ergebnis der transdisziplinären Herangehensweise heraus, dass aus Sicht des Katastrophenschutzes und der betroffenen Akteure neben der Höhe auch die Verweildauer oder auch das sehr schnelle Aufeinanderfolgen mehrerer Sturmfluten über einen längeren Zeitraum das Risikomanagement vor extreme Herausforderungen stellen kann. Im Projektverlauf wurden deshalb sowohl hohe, als auch langandauernde sowie Serien kurz aufeinanderfolgender Sturmfluten betrachtet. Es stellte sich heraus, dass in dem untersuchten Datenmaterial solche Extremereignisse identifiziert werden konnten, die zum Teil über den bisher beobachteten Werten lagen und des Weiteren Potenzial für zusätzliche Verstärkungen aufwiesen.

Für das Gebiet um Emden wurde darauf aufbauend gemeinsam mit lokalen Akteuren eine Reihe von Szenarien entwickelt. Schadenspotenzialanalysen zeigten, dass für diese Szenarien mögliche Auswirkungen gegenüber einer bereits aufgetretenen Referenzflut zum Teil deutlich erhöht sein könnten. So lag beispielsweise für eine extrem hohe Flut das über das gesamte Gebiet betrachtete Schadenspotenzial um etwa einen Faktor drei über dem der Referenzflut. Die Vergrößerung des Schadenspotenzials ist dabei sowohl auf den höheren seeseitigen Wasserstand bei potentiell Versagen, als auch auf die längere Zeit, in der der Wasserstand dabei über der Deichfußhöhe läge, zurückzuführen.

Der Umgang mit möglichen Auswirkungen solcher Ereignisse sowie die Ableitung und Bewertung von Maßnahmen und Handlungsnotwendigkeiten war Teil des transdisziplinären Prozesses im Projektverlauf. Hierbei 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.

Ralf Weisse
Projektkoordinator
26 März 2020

EXTREMENESS-A

Analyse extremer Sturmfluten und möglicher Verstärkungen

ZE: Helmholtz-Zentrum Geesthacht	Förderkennzeichen: 03F0758A
Vorhabenbezeichnung: Analyse extremer Sturmfluten und möglicher Verstärkungen	
Laufzeit des Vorhabens: 10/2016 – 09/2019	
Verfasser: Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Elke Meyer, Ralf Weisse	

KURZDARSTELLUNG

Veranlassung und Aufgabenstellung

Starke Stürme mit auflandigen Winden stauen das Wasser, je nach vorherrschender Windrichtung, an den verschiedenen Küstenabschnitten der Deutschen Bucht (südöstliche Nordsee) und können zu extremen Sturmfluten mit extremen Wasserständen und daraus resultierend zu potentieller Überflutung des niedrig gelegenen Hinterlands führen. Die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit sehr schwerer Sturmfluten sowie möglicher Änderungen in Zuge des anthropogenen Klimawandels ist für den Küstenschutz von großer Bedeutung. Ziel des Projektes war daher die Identifikation und Analyse extremster Sturmflutereignisse, die zum einen sehr unwahrscheinlich aber trotzdem physikalisch plausibel und sowohl heute als auch in Zukunft möglich wären und die mit extremen Schäden oder Auswirkungen verbunden sein könnten. Ein wesentlicher Schwerpunkt im Projekt 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.

Die Aufgabe des Teilprojektes EXTREMENESS-A im Projektverbund EXTREMENESS war die Identifizierung extremster Sturmfluten für ausgewählte Positionen an der deutschen Nordseeküste und die Untersuchung, ob diese Extremereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen noch extremer hätten ausfallen können. Die Identifizierung der Extremereignisse erfolgte in Zusammenarbeit mit EXTREMENESS-B hauptsächlich aus sehr umfangreichen meteo-marinen und atmosphärischen Modelldatensätzen. Aus dem Satz der identifizierten Extremereignisse wurden diejenigen mit dem größten Nutzen für die regionalen Akteure (Workshops in EXTREMENESS-E) für die weiteren Analysen ausgewählt. Für diese ausgewählten Extremereignisse wurden in EXTREMENESS-A Sensitivitätsstudien

mit Hilfe eines numerischen hydrodynamischen Modells für die Nordsee durchgeführt und untersucht, inwieweit die ausgewählten Extremereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch höheren bzw. noch länger andauernden sehr hohen Wasserständen hätten führen können. Auf den Ergebnissen dieser Sensitivitätsstudien aufbauend wurden die Auswirkungen der ausgewählten Extremereignisse im Emsästuar in EXTREMENESS-C und Überflutungsszenarien in EXTREMENESS-D und -E untersucht und bewertet.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Als Folge eines verbesserten Küstenschutzes verursachten die Sturmfluten 1976 und 2006 mit höheren Wasserständen in Elbe bzw. Ems deutlich geringere Schäden als die Sturmfluten 1953 und 1962 an der südöstlichen Nordseeküste. Die Risiken von Sturmfluten bleiben aber bestehen und können sich vor dem Hintergrund eines anthropogenen Klimawandels weiter verschärfen, wobei für den Küstenschutz permanent die Herausforderung besteht, die niedrig gelegenen Küstengebiete vor Sturmfluten heute aber auch zukünftig zu schützen. Daher besteht auch weiterhin Bedarf an Untersuchungen zu extremen Stürmen insbesondere auch im Zuge möglicher Veränderungen als Folge eines Klimawandels.

Während in den Projekten MUSE (Jensen et al. 2006) und XtremRisk (Oumeraci et al. 2012) extreme Sturmfluten und deren mögliche Verstärkung auf der Basis von beobachteten historischen Ereignissen untersucht wurden, besteht die Datengrundlage in EXTREMENESS hauptsächlich aus vorhandenen umfangreichen atmosphärischen (hauptsächlich EXTREMENESS-B) und meteo-marinen Modelldatensätzen (hauptsächlich EXTREMENESS-A). Diese Datensätze, aus denen die extremsten Ereignisse extrahiert wurden, umfassen Reanalysen, Hindcasts und Projektionen möglicher zukünftiger Entwicklungen im Zuge eines Klimawandels. Die verwendeten meteo-marinen Klimaprojektionen enthalten keinen Meeresspiegelanstieg. Beruhend auf der Variabilität des Windklimas zeigen die jährlichen maximalen Wasserstände in den berücksichtigten Projektionen starke multidekadische Variationen ohne signifikante Trends bis 2100. Daher wird davon ausgegangen, dass aus den verwendeten Projektionen extrahierte Extremereignisse sowohl in der Zukunft als auch bereits unter heutigen Klimabedingungen möglich wären.

Um abzuschätzen inwieweit die ausgewählten Extremereignisse in der Nordsee noch extremer hätten ausfallen können, wurden mit Hilfe des hydrodynamischen Modell TRIM-NP (Kapitza und Eppel 1990) Sensitivitätsmodellierungen durchgeführt. Das in der Community etablierte und für das Modellgebiet Nordsee/Nordostatlantik validierte Modell nutzt Wind- und Luftdruckfelder als atmosphärischen Antrieb. An den offenen Modellrändern werden die astronomischen Tiden (Lyard et al. 2006) vorgegeben. Mit diesem Modell waren auch die Wasserstände der zur Identifizierung extremer Sturmfluten genutzten meteo-marinen Datensätze simuliert worden.

Das HZG hat eine lange Tradition in der Analyse vergangener und zukünftiger langfristiger Veränderungen im Küstenklima. In diesem Zusammenhang beteiligte sich das HZG an und/oder koordinierte eine Anzahl von Projekten, die sich mit Sturmfluten und ihren Auswirkungen beschäftigten. Projekte aus der kürzlichen Vergangenheit waren beispielsweise A-KÜST (Veränderliches Küstenklima: Evaluierung von Anpassungsstrategien im Küstenschutz) und KLIWAS (Auswirkung des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen) und die EU-Projekte THESEUS (Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate) und RISES-AM (Responses to Coastal Climate Change: Innovative Strategies for High End Scenarios), die sich auf die Entwicklung innovativer Strategien im Küstenschutz konzentrierten. Analysen von Hindcasts und Klimaszenarien im

EXTREMENESS-A

Hinblick auf langfristige Veränderungen in der Sturmflutstatistik sind beispielsweise in Weisse und Plüß (2006), Weisse et al. (2015) sowie in Gaslikova et al. (2013; 2016) zu finden.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Identifikation von extremen Sturmflutereignissen in der Nordsee (Arbeitspaket AP1, s. Anhang Zeitplan) arbeiteten EXTREMENESS-A und EXTREMENESS-B sehr eng zusammen und nutzten einen sehr großen Datensatz, der Daten über historische Sturmfluten sowie hauptsächlich Modelldaten aus atmosphärischen und meteo-marinen Reanalysen, Hindcasts und Projektionen möglicher zukünftiger Entwicklungen im Zuge eines Klimawandels beinhaltet. Während in EXTREMENESS-A aus den meteo-marinen Daten Wasserstände und Windstauhöhen für ausgewählte Positionen entlang der Küste der Deutschen Bucht direkt ermittelt werden konnten, wurden in EXTREMENESS-B für entsprechende Positionen extreme Stürme aus den atmosphärischen Daten extrahiert und der entsprechende Windstau über empirische Beziehungen abgeschätzt.

Aufgrund der umfangreichen iterativen und transdisziplinären Herangehensweise wurden die daran anschließenden Arbeiten exemplarisch für die Region Borkum/Emsästuar durchgeführt. In Zusammenarbeit mit dem gebildeten Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (bestehend aus Projektpartnern und Vertretern aus u.a. regional ansässigen Behörden und Verbänden, der Landkreise, Einrichtungen des Katastrophenschutzes sowie der Industrie) wurde herausgearbeitet, was aus Sicht des Risikomanagements und anderer Akteure extreme Sturmfluten ausmacht. Danach spielen neben der Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände auch die Verweildauer hoher Wasserstände und Serien von Sturmfluten innerhalb kurzer Zeiträume eine Rolle. Infolge dessen wurden aus dem Satz der extrahierten extremen Sturmflutereignisse neben sehr hohen Sturmfluten auch Sturmflutserien und langanhaltende Sturmfluten für weitere Analysen ausgewählt.

In Sensitivitätsstudien (AP 2, s. Anhang) mit dem obengenannten hydrodynamischen Modell TRIM-NP, das die Nordsee und den nordöstlichen Atlantik zur Berücksichtigung von Fernwellen umfasst, wurde untersucht, inwieweit ausgewählte Ereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch extremeren Sturmfluten hätten führen können. Dabei wurden für die für die Nordsee ausgewählten Positionen die Effekte des zeitlichen Ablaufs eines Sturms relativ zur Tidephase analysiert. Entsprechende Daten aus den ausgewählten und verstärkten Extremereignissen wurden an das Teilprojekt EXTREMENESS-C zur Modellierung von Auswirkungen im Emsästuar übergeben, wobei des Weiteren zusätzlich mögliche verstärkende Einflüsse des Oberwasserabflusses der Ems, der Steuerung des Emssperrwerkes und des Meeresspiegelanstiegs analysiert wurden.

Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

Für die deutsche Nordseeküste existiert eine größere Anzahl an Studien, die sich mit der Analyse der Variabilität und/oder von langfristigen Veränderungen extremer Wasserstände beschäftigt (z.B. Dangendorf et al. 2014). Dabei werden sowohl vergangene (z.B. Weisse und Plüß 2006) als auch mögliche zukünftige Veränderungen (z.B. Gaslikova et al. 2013) beschrieben und mögliche zugrundeliegende Antriebsmechanismen analysiert (u.a. Woodworth et al. 2007). Derartige Untersuchungen wurden sowohl basierend auf Beobachtungen (z.B. Dangendorf et al. 2014) als auch basierend auf Modellansätzen oder statistischen Analysen (z.B. Butler et al. 2007) durchgeführt.

In der Mehrzahl der bisherigen Untersuchungen wurde gezeigt, dass sich die Extremwasserstände entlang der deutschen Nordseeküste über die letzten ca. 100 Jahre erhöht haben und zwar hauptsächlich

aufgrund des entsprechenden Anstiegs des mittleren Meeresspiegels. Veränderungen im Windklima verursachten inter-annuale und multi-dekadische Schwankungen der extremen Wasserstände, aber bisher keinen langfristigen Trend (u.a. Weisse et al. 2012). Für die Zukunft wird von einem weiter ansteigenden Meeresspiegel ausgegangen, wobei die Höhe des Anstiegs allerdings mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist (z.B. Oppenheimer et al. 2019). Mögliche, durch Änderungen im Windklima verursachte Anstiege hoher Wasserstände sind ebenfalls mit großen Unsicherheiten verbunden (u.a. Weisse et al. 2012). Für den Bereich der Deutschen Bucht existieren Studien, die einen Anstieg des Sturmflutscheitelwasserstandes jenseits des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels möglich erscheinen lassen (Arns et al. 2015).

Die Mehrzahl der bisherigen Studien basiert auf Analysen oberer Perzentile der Häufigkeitsverteilung oder auf Analysen von Wiederkehrwerten verschiedener Sturmflutparameter (z.B. Debernard und Røed 2008) zur Beurteilung von langfristiger Variabilität und Veränderung. Die für Risikobewertungen notwendigen Untersuchungen der schwersten möglichen Ereignisse stehen zurzeit nur eingeschränkt zur Verfügung. Mit derartigen Untersuchungen beschäftigten sich die Projekte MUSE (Jensen et al. 2006) und XtremRisk (Oumeraci et al. 2012). So wurden in MUSE z.B. untersucht, inwieweit durch Variation von Anfangsbedingungen in den meteorologischen Vorhersagen beobachtete Sturmfluten theoretisch höher hätten ausfallen können. Der regionale Fokus lag bei beiden Projekten auf der Elbemündung. In EXTREMENESS wurde dieser Ansatz u.a. durch die umfangreiche Datenbasis an atmosphärischen und meteo-marinen Modelldaten, innerhalb derer Extremereignisse identifiziert werden konnten, weiter ausgebaut. Des Weiteren wurden zusätzliche Effekte betrachtet, die die Gefährdung weiter verstärken können, wie z.B. die Wechselwirkung zwischen Tidephase und Eintritt des Sturmmaximums. Außerdem wurde der regionale Fokus durch die Betrachtung des Emsästuars und der Stadt Emden erweitert.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Partnern im Verbundvorhaben erfolgte entsprechend des Ablaufdiagramms (Abbildung Anhang-1). Eine intensive Zusammenarbeit fand insbesondere mit den Kollegen von EXTREMENESS-B und EXTREMENESS-C statt, da die Arbeiten unmittelbar aufeinander aufbauten. Mit den Kollegen von EXTREMENESS-D und EXTREMENESS-E erfolgte ein intensiver Austausch, wobei insbesondere die Ergebnisse der Workshops des Science Stakeholder Collaboration Forums wesentlichen Input für die Modellierung und Auswahl der Extremereignisse lieferten.

Einen regelmäßigen regen Austausch gab es mit den Mitgliedern der Projektbegleitenden Gruppe. Hier wurden zum einen die Ergebnisse des Projekts vorgestellt, zum anderen wurden aber auch Vorschläge aus dieser Gruppe aufgegriffen und in EXTREMENESS-A umgesetzt. Beispielsweise wurde auf Anregung der Gruppe die historische Sturmflut von 1906, die für Emden die bisher höchsten Wasserstände lieferte, in Zusammenarbeit mit EXTREMENESS-B (Erarbeitung der meteorologischen Antriebsdaten für das hydrodynamische Wasserstandsmodell) nachmodelliert.

Des Weiteren fand ein Erfahrungsaustausch mit den Kollegen des dänischen Projektes COHERENT (Coastal Hazard Risk Reduction and Management, <https://www.coherent-project.dk/>, 2017 - 2020) statt, das sich mit einer ähnlichen Thematik befasst.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Nachfolgend sind nur die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Eine eingehende Darstellung der Ergebnisse finde sich in dem Fachbeitrag für „Die Küste“.

Extreme Sturmflutereignisse und Sensitivitätsstudien hinsichtlich ihrer Verstärkung

Ziele des Teilprojektes A im Verbundvorhaben EXTREMENESS waren zum einen die Zusammenstellung extremer Sturmfluten mit extremen Wasserständen aus vorhandenen meteo-marinen Modelldatensätzen, die heutige und mögliche zukünftige Bedingungen wiedergeben, und zum anderen die Auswahl und Analyse von Ereignissen hinsichtlich ihres Potentials, unter leicht geänderten, aber physikalisch plausiblen Bedingungen möglicherweise noch extremer (Sturmflutscheitelhöhe und/oder Ereignisdauer) ausfallen zu können.

Die vorliegenden meteo-marinen Modelldatensätze umfassten einen Hindcast und sechs Klimaprojektionen, die Änderungen der meteorologischen Bedingungen, aber keinen Meeresspiegelanstieg berücksichtigen. Die Wasserstände waren jeweils mit dem hydrodynamischen Modell TRIM-NP (Kapitza und Eppel 1990) für die Nordsee einschließlich des Nordostatlantiks simuliert worden. Der Hindcast (Weisse et al. 2015) umfasst die Jahre 1948 bis 2016, die als Antrieb dienenden atmosphärischen Daten wurden einem atmosphärischen Hindcast (Geyer 2014) entnommen, der auf NCEP-NCAR globalen Reanalysen (Kalnay et al. 1996) basiert. Die sechs Klimaprojektionen (Gaslikova et al. 2013, 2016) umfassen die Jahre 1961 bis 2100 bzw. die Zeitscheiben 1971-2000 und 2071-2100 und beruhen auf den CMIP3 und CMIP5 Emissionsszenarien A1B, B1 (Nakicenovic et al. 2006) und RCP8.5 (Taylor et al. 2012). Die atmosphärischen Antriebsdaten für TRIM-NP basieren auf den Globalmodellen ECHAM5-MPIOM (Röckner et al. 2003), EC-EARTH (Hazeleger et al. 2010) und CMCC (Scoccimarro et al. 2011) und wurden mit den Regionalmodellen CCLM (z.B. Rockel et al. 2008) und RCA4 (Samuelsson et al. 2016) regionalisiert.

Zeitreihen des Wasserstands wurden für drei unterschiedliche Positionen entlang der deutschen Nordseeküste (Borkum, Elbemündung, Amrum, jeweils am nächsten liegenden Modellgitterpunkt) aus dem Hindcast und den sechs Klimaprojektionen extrahiert. Da in EXTREMENESS der Fokus der Untersuchungen auf Borkum und der Emsmündung lag, wurden für die weiteren Untersuchungen die Zeitreihen für Borkum genutzt. Die Zeitreihen für Elbemündung und Amrum wurden herangezogen, um die Auswirkungen ausgewählter Ereignisse an den verschiedenen Küsten der Deutschen Bucht zu vergleichen. Diese Zeitreihen wurden dann anhand folgender Kriterien nach Extremen durchsucht: (i) extrem hoher Wasserstand, (ii) extrem hoher Stau und (iii) langanhaltender Stau.

In Zusammenarbeit mit den Kollegen aus EXTREMENESS-B wurde eine Liste der extremsten Sturmfluten aus allen Datensätzen für Borkum erstellt. Die maximalen Sturmflutscheitelwasserstände der fünf höchsten Ereignisse liegen 30 bis 70 cm höher, als der bisher höchste bei Borkum gemessene Scheitelwasserstand während der Sturmflut 1906. Aus dieser Liste wurden basierend auf den Ergebnissen des 1. Workshops mit dem Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (vgl. EXTREMENESS-E) und in Absprache mit den Projektpartnern die Ereignisse für die folgenden Sensitivitätsuntersuchungen, inwieweit diese Ereignisse noch Verstärkungspotential besitzen, ausgewählt.

EXTREMENESS-A

1. die Sturmflut mit dem absolut höchsten Wasserstand (**Hohe Flut, HF**)
2. die **Sturmflutserie (SFS)** mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche
3. 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 deshalb im Folgenden als Teil der Sturmflutserie behandelt.

In den Sensitivitätssimulationen lag das Hauptaugenmerk auf einer zeitlichen Verschiebung zwischen Wind- und astronomischer Gezeit von +/- 6 Stunden unter Berücksichtigung von Variationen zwischen Spring- und Nipptide.

Für die Hohe Flut (HF), das Ereignis mit dem ursprünglich höchsten Sturmflutscheitelwasserstand von 4,73 m NHN, führte eine zeitliche Verschiebung um 5 Stunden zwischen astronomischer Tide und atmosphärischem Antrieb zu einer Erhöhung des maximalen Sturmflutscheitelwasserstands von 17 cm, der Austausch der ursprünglichen Tide durch eine Springtide plus zusätzliche zeitliche Verschiebung erzeugte eine Erhöhung um insgesamt 50 cm (HF_v). Diese Ergebnisse legen nahe, dass auch bisher beobachtete Sturmfluten zum Teil potentiell höher hätten auflaufen können.

Die Lange Flut (LF) als erste Ereigniskette innerhalb der Sturmflutserie (SFS), bei der das mittlere Tidehochwasser für 45 h nicht unterschritten wird, repräsentiert das zweithöchste Ereignis mit einem maximalen Sturmflutscheitelwasserstand von 4,66 m NHN. Da LF bereits bei einer hohen Springtide stattfand, erhöhte sich der Sturmflutscheitelwasserstand durch zeitliche Verschiebungen zwischen astronomischer Tide und atmosphärischem Antrieb nur um wenige Zentimeter. Wird die Definition des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSB) zugrunde gelegt, nach der Sturmtiden vorliegen, wenn der Wasserstand 1,5 m über dem mittleren Tidehochwasser liegt, besteht SFS aus sieben Sturmtiden innerhalb von knapp acht Tagen. Je nach Verschiebung zwischen astronomischer Tide und atmosphärischem Antrieb erhöhten sich einzelne der LF nachfolgenden Ereignisse mit niedrigeren Sturmflutscheitelwasserständen in SFS um bis zu 30 cm, während jedoch gleichzeitig andere abgeschwächt wurden. LF und SFS konnten somit nicht generell verstärkt werden.

Durch die zeitlichen Verschiebungen zwischen astronomischer Tide und atmosphärischem Antrieb änderte sich die jeweilige Dauer der Ereignisse in den einzelnen Simulationen nur um +/- 1 h (bis auf wenige Ausnahmen, bei denen aber die Hochwasserscheitelwasserstände abgeschwächt sind).

Da sich Sturmfluten je nach vorherrschender Windrichtung unterschiedlich an den Küsten der Deutschen Bucht auswirken können, zeigten auch die Sensitivitätsuntersuchungen zur potentiellen Verstärkung der Ereignisse bei Borkum für die Elbemündung und Amrum jeweils unterschiedliche Auswirkungen, allerdings kam es auch dort bei HF_v jeweils zu einer Erhöhung des maximalen Sturmflutscheitelwasserstands, z.B. um 37 cm in der Elbemündung. Die Simulationen aus den Sensitivitätsuntersuchungen wurden derart ausgewählt, dass sich für Borkum jeweils die größte Verstärkung (HF_v) ergab. Daher sind für andere Simulationen aus diesen Untersuchungen größere Verstärkungen für andere Orte möglich: für die Elbemündung ergab beispielsweise eine der anderen Simulationen eine Erhöhung des maximalen Sturmflutscheitelwasserstands um 72 cm.

Hohe Flut und Sturmflutserie wurden zwei unterschiedlichen Klimaprojektionen entnommen. Wie eingangs erwähnt, enthalten die genutzten Klimaprojektionen keinen Anstieg des mittleren Meeresspiegels. Die Wasserstände schwanken auf multidekadischen Zeitskalen, aber die jährlichen maximalen Wasserstände zeigen in diesen beiden Klimaprojektionen keinen signifikanten langfristigen

EXTREMENESS-A

Trend (vgl. Gaslikova et al. 2013, Klimaprojektionen A1B_1 und B1_2). Daher kann angenommen werden, dass diese Ereignisse sowohl heute als auch in Zukunft vorkommen könnten, wobei für die Zukunft zusätzlich ein Meeresspiegelanstieg berücksichtigt werden müsste.

Für die weiteren Untersuchungen im Emsästuar in EXTREMENESS-C wurden die um 50 cm verstärkte Hohe Flut (HF_v) und die originale Sturmflutserie (SFS) einschließlich der Langen Flut (LF) genutzt. Die daraus in EXTREMENESS-D abgeleiteten Überflutungsszenarien bildeten die Grundlage für die Diskussionen und Workshops mit Akteuren und Stakeholdern in EXTREMENESS-E.

Bei den ausgewählten Extremereignissen wurden nicht nur die Auswirkungen der jeweiligen Höhe der Sturmflutscheitel, sondern auch die Auswirkungen der Dauer sehr hoher Wasserstände in Zusammenarbeit mit EXTREMENESS-C untersucht. Im Fall der Sturmflutserie zeigte sich beispielsweise, dass eine notwendige Entwässerung der niedrig liegenden Gebiete zwischen Emsästuar und Nordseeküste nördlich von Emden fast im gesamten Zeitraum von 176 Stunden nur noch mit Pumpen möglich wäre; dabei müsste in ca. 90 Stunden gegen einen Wasserstand über dem mittleren Tidehochwasser im Emsästuar gepumpt werden.

Eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse aus EXTREMENESS-A in Verbindung mit den Ergebnissen aus EXTREMENESS-B und EXTREMENESS-C sind in Grabemann et al. (2019) und Rudolph et al. (2020) zu finden.

Effektiver Wind und sein Potential zur Ermittlung extremer Sturmfluten

Während in EXTREMENESS-A die extremen Sturmfluten aus meteo-marinen Datensätzen direkt extrahiert werden konnten, wurden in EXTREMENESS-B auf der Basis atmosphärischer Datensätze über den effektiven Wind extreme Stürme herausgefiltert. Zur Abschätzung der Stärke der jeweiligen Sturmflut wurde der Windstau über eine empirische Beziehung aus dem effektiven Wind abgeleitet.

Um das Potential des effektiven Windes zur Ermittlung extremer Sturmfluten zu testen, wurden aus einem meteo-marinen Datensatz Sturmfluten aus Wasserstandszeitreihen für Borkum direkt in EXTREMENESS-A identifiziert und über Zeitreihen des extremen Windes für Borkum indirekt in EXTREMENESS-B detektiert. Dabei zeigte sich, dass über hohen effektiven Wind generell auf hohe Sturmfluten geschlossen werden kann, wobei jedoch auch die Andauer hohen effektiven Windes berücksichtigt werden sollte. Herrscht ein hoher effektiver Wind nur über eine kurze Dauer, kommt es in der Regel zu keiner hohen Sturmflut. Andererseits kann es Sturmfluten bei langanhaltendem mittelhohem effektiven Wind geben. Die diesbezüglichen Ergebnisse wurden in Ganske et al. (2018) zusammengefasst.

Historische Sturmflut 1906

Auf Anregung der Projektbegleitenden Gruppe wurde zusätzlich zum ursprünglichen Arbeitsplan die historische Sturmflut von 1906 untersucht, die zu den höchsten gemessenen Wasserständen bei Borkum und in der Emsmündung führte. Insbesondere wurden Aussagen gewünscht, inwieweit die Sturmflut vom 13.03.1906, die teilweise noch heute für beobachtete Höchstwerte an einigen Pegeln verantwortlich ist, zu extremeren Wasserständen hätte führen können.

Um diesem Wunsch zu entsprechen, wurden mit verschiedenen Methoden die Druck- und Windfelder für das Sturmflutereignis rekonstruiert. Dabei wurde zum einen auf eine von Rosenhagen und Bork (2009) entwickelte Methode zurückgegriffen, mit der erstmals Wind- und Luftdruckfelder für das historische

EXTREMENESS-A

Sturmflutereignis vom 13.11.1872 in der Ostsee rekonstruiert werden konnten. Dazu wurden durch den DWD historische, bis heute nicht digitalisierte Wetteraufzeichnungen digitalisiert und darauf aufbauend anschließend Wetterkarten von erfahrenen Meteorologen gezeichnet. Diese Wetterkarten wurden anschließend von HZG erneut digitalisiert und basierend auf den Druckgradienten geostrophische Windfelder berechnet. Mit Hilfe einer Parametrisierung von Hasse (1974) wurden anschließend bodennahe Windfelder berechnet, die wiederum zum Antrieb von TRIM-NP verwendet wurden. Es zeigte sich, dass mit den so ermittelten Windgeschwindigkeiten die beobachtenden Wasserstände reproduziert werden konnten. Parallel dazu wurden Druck- und Windfelder aus den Reanalyse Produkten des 20th Century Project (Compo et al. 2011) und aus den ERA-Clim 1 & 2 -Projekten (Laloyaux et al. 2018) extrahiert und die Wasserstände mit TRIM-NP nachgerechnet. Dabei konnten die Wasserstände der Sturmflut nur durch einzelne Ensemble Mitglieder reproduziert werden. Für die Wind- und Druckfelder, mit denen sich die beobachteten Sturmflutwasserstände rekonstruieren ließen, wurde anschließend untersucht, inwieweit sich weiteres Verstärkungspotential durch Verschiebung der Sturmmaxima relativ zur Tidephase ergibt. Da die Sturmflut 1906 jedoch bereits während einer Springtide aufgetreten war, konnte hier keine weitere wesentliche Verstärkung simuliert werden. Insbesondere lagen die Wasserstände nicht über denen der bereits ausgewählten Hohen Flut (HF).

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen die Kosten für eine Wissenschaftlerstelle für 1,5 Jahre sowie Reisekosten zu Projekttreffen. Einzelheiten sind im detaillierten Verwendungsnachweis dargestellt. Es haben sich gegenüber dem Antrag keine wesentlichen Änderungen ergeben.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie unter "Voraussetzungen, unter den das Vorhaben durchgeführt wurde" geschildert, besteht Bedarf an Untersuchungen zu extremen Stürmen insbesondere auch im Zuge möglicher Veränderungen als Folge eines Klimawandels zur Unterstützung des Küstenschutzes und seiner Aufgabe, die niedrig gelegenen Küstengebiete vor Sturmfluten heute und zukünftig zu schützen.

Innerhalb des Verbunds EXTREMENESS lieferte EXTREMENESS-A die Sturmflutereignisse als Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Die extremsten Fälle aus den numerischen Simulationen für die Nordsee (EXTREMENESS-A) und darauf aufbauend auf den Simulationen für das Emsästuar (EXTREMENESS-C) bildeten die Grundlage für die Analyse möglicher Auswirkungen und Maßnahmen im Umgang mit diesen (EXTREMENESS-D und EXTREMENESS-E). Unter anderem wurden die Schadenspotentiale dieser Ereignisse im Vergleich zur Allerheiligenflut 2006 als Referenzflut untersucht (EXTREMENESS-D).

Basierend auf den in EXTREMENESS-A ausgewählten und verstärkten Ereignissen mit bisher nicht gemessenen Wasserständen wurden hinsichtlich der Bedarfe des Küstenschutzes in einem iterativen Prozess in einer Serie transdisziplinärer Workshops (Leitung EXTREMENESS-E unter Beteiligung weiterer Projektpartner) narrative Szenarien entwickelt, mögliche Auswirkungen simuliert, neuralgische Punkte identifiziert und mögliche Maßnahmen zur Unterbrechung von Versagenskaskaden und zur Anpassung diskutiert.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Untersuchungen in EXTREMENESS-A verbessern das Verständnis extremer Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten, die aber potentiell mit erheblichen Auswirkungen verbunden sein können und liefern somit Informationen für Entscheidungsträger im Küsten- und Katastrophenschutz. EXTREMENESS-A verfolgt derzeit keine kommerziellen Interessen. Die Zielgruppe für die Ergebnisse aus dem Vorhaben sind u.a. Bundes- und Landesbehörden, zu denen gute Kontakte bestehen und von denen Vertreter an der Projektbegleitenden Gruppe teilnahmen. Die Ergebnisse wurden auf den Projekttreffen mit der Projektbegleitenden Gruppe diskutiert und des Weiteren auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert und werden durch begutachtete Publikationen (s. unten) dem Fachpublikum zur Verfügung gestellt.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten ergeben sich somit nicht aus einer direkten Vermarktung der Projektergebnisse, sondern aus dem indirekten volkswirtschaftlichen Nutzen eines verbesserten Verständnisses der Auswirkungen von Extremereignissen auch vor dem Hintergrund eines Klimawandels. Die Projektergebnisse, sowohl Erkenntnisse als auch analysierte Modellergebnisse, können ein Beitrag sein, um heutige Küstenschutzkonzepte vor dem Hintergrund der Veränderungen durch den Klimawandel zu überprüfen und gegebenenfalls frühzeitig neue Schutzkonzepte zu entwickeln.

Die Projekte MUSE (Jensen et al. 2006) und XtremRisk (Oumeraci et al. 2012) beschäftigten sich hauptsächlich mit dem Elbeästuar. Gegenüber diesen Studien wird durch die Betrachtung des Emsästuars der regionale Fokus erweitert. Zusätzlich wurden in EXTREMENESS die Untersuchungen in einen transdisziplinären Kontext gesetzt, der Stakeholder und Entscheidungsträger bereits in frühen Stadien des Projektes aktiv involvierte.

Die höchsten in EXTREMENESS-A und -C ermittelten Extremsturmfluten sind von ähnlicher Höhe wie die extremsten Ereignisse in MUSE (Jensen et al. 2006). Obwohl sich die zugrundeliegenden Datensätze und die verwendete Methodik in EXTREMENESS und MUSE unterscheiden, ist die ermittelte Größenordnung für extremste Sturmfluten sehr ähnlich. Daraus kann auf eine gewisse Robustheit der erzielten Ergebnisse geschlossen werden.

Fortschritt bei anderen Stellen

Die EXTREMENESS-Gruppe steht in Kontakt zu nationalen und internationalen Arbeitsgruppen, die sich mit relevanten Themen und mariner Klimastatistik im weiteren Sinn beschäftigen. Auf nationalen und internationalen Konferenzen und Workshops wurden entsprechende Erfahrungen ausgetauscht. Des Weiteren wurden relevante aktuelle Veröffentlichung verfolgt.

Es sind keine Hinweise/Arbeitsergebnisse bekannt, die eine Anpassung oder Änderung der Arbeitspakete und des Zeitplans erforderlich gemacht hätten.

Nach Beginn von EXTREMENESS wurde ein mit den hydrodynamischen Untersuchungen in EXTREMENESS vergleichbares englisches Projekt "SUCCESS" (Synthesising Unprecedented Coastal Conditions: Extreme Storm Surges, <https://ivanhaigh.com/research/>) ohne transdisziplinäres Konzept durchgeführt. Analog wurde in Dänemark beginnend in 2017 ein nationales Projekt COHERENT (Coastal Hazard Risk Reduction and Management, <https://www.coherent-project.dk/>) aufgesetzt, dass sich mit ähnlichen Fragestellung für Dänemark befasst und mit EXTREMENESS methodisch in engem Austausch stand. Dieses zeigt die Relevanz der in EXTREMENESS aufgestellten Fragen und Analysen.

EXTREMENESS-A

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Peer-reviewed

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

Grabemann, Iris; Gaslikova, Lidia; Brodhagen, Tabea; Rudolph, Elisabeth (2019): Very severe storm tides in the German Bight (North Sea) and their potential for enhancement. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, under review.

Rudolph Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Ganske, Anette; Grabemann, Iris; Meyer, Elke; Tinz, Birger; Möller, Thomas; Weisse, Ralf (2019): Analyse extremer Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste und ihre möglichen Verstärkungen. *Die Küste*, submitted.

Die 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) (2019): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. *Die Küste*, submitted.

Vorträge und Poster

Meyer, Elke, Weisse, Ralf, Tinz, Birger, Möller, Thomas (2020): Historical storm surges in the German Bight. *Ocean Sciences Meeting 2020, San Diego, USA*

EXTREMENESS Group (Ralf Weisse, Arne Arns, Tabea Brodhagen, Etor Emanuel Lucio Eceiza, Anette Ganske, Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Jürgen Jensen, Elke Meyer, Thomas Möller, Beate Ratter, Elisabeth Rudolph, Jürgen Schaper, Marius Ulm, Hans von Storch, Birger Tinz) (2019): Can we manage the unexpected? Constructing plausible storm tides with high impact potential and consequences for coastal protection and disaster risk management. *AGU Fall Meeting 9-13 Dezember 2019, San Francisco, USA*. Poster.

EXTREMENESS Group (Ralf Weisse, Arne Arns, Tabea Brodhagen, Etor Emanuel Lucio Eceiza, Anette Ganske, Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Jürgen Jensen, Elke Meyer, Thomas Möller, Beate Ratter, Elisabeth Rudolph, Jürgen Schaper, Marius Ulm, Hans von Storch, Birger Tinz) (2019): Can we manage the unexpected? Constructing plausible storm tides with high impact potential and consequences for coastal protection and disaster risk management. *2nd INTERNATIONAL WORKSHOP ON WAVES, STORM SURGES AND COASTAL HAZARDS 10-15 November 2019, Melbourne, Australia*. Poster.

Meyer, Elke; Weisse, Ralf; Tinz, Birger; Möller, Thomas (2019): Reconstruction of the record storm tide in March 1906 in the German Bight. *2nd INTERNATIONAL WORKSHOP ON WAVES, STORM SURGES AND COASTAL HAZARDS 10-15 November 2019, Melbourne, Australia*. Vortrag.

Grabemann, Iris für die EXTREMENESS Gruppe (2019): EXTREMENESS - Gesamtprojektübersicht. *24. KfKI Seminar zur Küstenforschung*. 21. November 2019, Hamburg, Deutschland. Vortrag.

Weisse, Ralf für die EXTREMENESS Gruppe (2019): Extreme Nordseesturmfluten und Konsequenzen für den Küsten- und Katastrophenschutz. *KüNO Abschlusstagung 2019*, 30. Oktober 2019, Hamburg, Deutschland. Vortrag.

EXTREMENESS-A

Gaslikova, Lidia for the EXTREMENESS Group (Ralf Weisse, Arne Arns, Tabea Brodhagen, Anette Ganske, Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Jürgen Jensen, Elke Meyer, Thomas Möller, Beate Ratter, Elisabeth Rudolph, Jürgen Schaper, Marius Ulm, Birger Tinz) (2019): Extreme storm tides in the North Sea and their consequences in the Ems estuary. EMS Annual Meeting 9-13 September 2019, Copenhagen, Denmark. Vortrag.

Weisse, Ralf (2019): Sturmfluten im Klimawandel: Mechanismen und Veränderungen. Energiewoche 5-9. August 2019, Pellworm, Deutschland. Vortrag.

Meyer, Elke; Weisse, Ralf; Tinz, Birger; Scholz, Robert (2019): Reconstruction of the storm tide 1906 in the German Bight. EGU 7-12 April 2019, Vienna, Austria. Poster.

Gaslikova Lidia, Grabemann Iris, Weisse Ralf (2019): Extreme storm tides in the German Bight and their possible amplifications. EGU 7-12 April 2019, Vienna, Austria. Poster.

Meyer, Elke; Möller, Thomas; Tinz, Birger; Scholz, Robert; Weisse, Ralf; Grabemann, Iris (2019): Rekonstruktionen der Sturmflut 12./13. März 1906. DACH2019, 18-22. März 2019, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland. Vortrag.

Gaslikova, Lidia, Grabemann, Iris, Meyer, Elke, Weisse, Ralf (2019): Extreme Sturmfluten in der Deutschen Bucht. DACH2019, 18-22. März 2019, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland. Vortrag.

Weisse, Ralf for the EXTREMENESS Group (2018): Identification of extreme storm tides with high impact potential for the German North Sea coast. 2nd Baltic Earth Conference, 11-15 June 018, Helsingoer, Denmark. Vortrag.

Weisse, Ralf für die EXTREMENESS Gruppe (2018): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. KüNO Jahrestagung 2018, Hannover, Deutschland. Vortrag.

Weisse, Ralf für die EXTREMENESS Gruppe (2018): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen Meeresspiegelworkshop 2018, 20. November 2018, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, Deutschland. Vortrag.

Weisse, Ralf (2017): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. 22. KfKI Seminar zur Küstenforschung. 22. November 2017, Bremerhaven, Deutschland. Vortrag.

Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Weisse, Ralf (2017): Contribution of external surges to the water levels in South-Eastern North Sea. 1st Workshop on Waves, Storm Surges and Coastal Hazards. 10-15 September 2017, Liverpool, UK. Vortrag.

Weisse, Ralf für die EXTREMENESS Gruppe (2017): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. KüNO Jahrestagung 2017, Rostock, Deutschland. Vortrag.

Brodhagen, Tabea.; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Rudolph, Elisabet; Tinz, Birger; Weisse, Ralf (2017): Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und möglicher Verstärkungen. KÜNO Jahrestagung, 11-12 Oktober 2017, Rostock. Poster.

LITERATURVERZEICHNIS

s. gemeinsames Literaturverzeichnis.

EXTREMENESS-B

Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können

ZE: Deutscher Wetterdienst	Förderkennzeichen: 03F0758E
Vorhabenbezeichnung: Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können	
Laufzeit des Vorhabens: 10/2016 – 09/2019	
Verfasser: Thomas Möller, Natacha Fery, Etor Emanuel Lucio Eceiza, Birger Tinz	

KURZDARSTELLUNG

Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten schwerer Sturmfluten in der Deutschen Bucht sowie möglicher Änderungen im Zuge des anthropogenen Klimawandels sind für den Küstenschutz von großer Bedeutung. Im Gegensatz zu bisher existierenden Untersuchungen, die sich typischerweise mit hohen Perzentilen oder Wiederkehrwerten und deren Änderungen beschäftigen, sind hier Ereignisse untersucht worden, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich, aber potentiell mit extremen Konsequenzen verbunden sind.

Dazu wurden durch den DWD die Windfelder verschiedener Datensätze Jahr (Beobachtungen, Reanalysen und Klimaszenarienrechnungen) analysiert. Mit Hilfe der Methoden „Windstau“ und „effektiver Wind“ sollten möglichst extreme Sturmflutereignisse identifiziert werden. Die beiden nur auf meteorologischen Daten basierenden Methoden ergänzen die durch das HZG in EXTREMENESS-A untersuchten Datensätze, die auch Wasserstände enthalten. Ziel ist es eine gemeinsame Datenbasis extremer Wasserstände zu identifizieren, die 1) einen möglichst hohen Wert, 2) eine lange Andauer und 3) eine Serie von Sturmfluten enthalten.

Die so gefundenen potentiellen Sturmflutwetterlagen wurden den Projektpartnern zur weiteren Bearbeitung übergeben.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am Verbundprojekt EXTREMENESS waren relevante Akteure von Universitäten, Großforschungseinrichtungen und Behörden beteiligt, die die aufeinander aufbauenden Arbeitspakete erfolgreich bewältigen konnten. Der Austausch mit Akteuren vor Ort wurde über ein Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum abgesichert. Mit der Projektbegleitenden Gruppe erfolgte ein regelmäßiger Austausch über den aktuellen Stand der Bearbeitung des Projektes.

Beim DWD erfolgte ein Austausch mit anderen, laufenden Forschungsprojekten, wie dem Expertennetzwerk des BMVI und dem Hamburger Exzellenzcluster CliSAP.

Für die Projektlaufzeit war die befristete Besetzung einer Stelle eines/r wissenschaftlichen Mitarbeiter/in vorgesehen.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Der DWD war für das Teilprojekt EXTREMENESS-B „Analyse von den Feldern, die extreme Sturmfluten verursachen können“ verantwortlich. Eine Mitarbeit erfolgte ebenfalls in den Arbeitspaketen AP 1 „Datenbasis extremer Sturmflutereignisse“, AP 2 „Analyse potentieller Verstärkungsmechanismen“ und AP 5 „Projektleitung und Ergebnisverwertung“. Eine Übersicht befindet sich in der Tabelle Anhang-1.

Im AP 1 stellten HZG und DWD gemeinsam eine Datenbasis extremer Sturmflutereignisse zusammen. Der DWD bearbeitete dabei die Datensätze, die nur atmosphärische Größen, insbesondere den Wind enthalten. Im Einzelnen handelte es sich dabei um Beobachtungen, globale und regionale Reanalysen sowie Klimamodelldaten. Mit den beiden Methoden „effektiver Wind“ und „Windstau“ wurden aus den Windfeldern Wasserstände an der deutschen Nordseeküste abgeleitet. Das Endergebnis war eine Auswahl und detaillierte Beschreibung von extremen Sturmereignissen an der deutschen Nordseeküste, die unter aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen physikalisch plausibel sind.

Im AP 2 sollte der DWD die Güte der beiden Verfahren „effektiver Wind“ und „Windstau“ verifizieren und falls notwendig eine BIAS-Korrektur der Winddaten durchführen.

Im Arbeitspaket 5 unterstützte der DWD die Projektleitung und nahm an Projekttreffen und Treffen mit der Projektbegleitenden Gruppe teil. Die Projektergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Konferenzen und durch Publikationen der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

Für die Berechnung des Wasserstandes an der deutschen Nordseeküste wurden die beiden Verfahren „effektiver Wind“ und „Windstau“ verwendet. Beide beruhen ausschließlich auf atmosphärischen Daten.

Der „effektive Wind“ (Koziar und Renner 2005) ist eine Projektion des horizontalen 10 m-Windes auf die Richtung, bei der der Effekt vom Wind auf den Wasserstand an der Küste am höchsten ist. Diese Richtung variiert zwischen 295° und 315° entlang der deutschen Nordseeküste.

Im Gegensatz zum effektiven Wind, beruht die Methode zur Berechnung des Windstaus (Müller-Navarra und Giese 1999; Jensen et al. 2013) auf einem statistischen Modell, in dem mit einer multiplen linearen Regression mit den Prädiktoren Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck in Aberdeen (UK) und an einem Punkt an der deutschen Nordseeküste (Cuxhaven oder Borkum/Emden) die Höhe des Windstaus berechnet wird.

Fachliteratur

Jensen, J., et al. (2013). Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht. KLIWAS Schriftenreihe, BSH: 62.

Koziar, C. and V. Renner (2005). MUSE Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Nordseeküste, Teilprojekt 1: Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen, Abschlussbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 03KIS039 (KFKI Fördernummer 78), Deutscher Wetterdienst (DWD) Offenbach: 304.

Müller-Navarra, S. H. and H. Giese (1999). "Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight." German Journal of Hydrology 51(4): 21.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es gab eine enge Zusammenarbeit mit dem „Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung“ des DWD. In ihm wurde zusammen mit der Universität Bonn die zeitlich und räumlich hoch aufgelöste regionale Reanalyse COSMO REA6 entwickelt, deren Daten bei den untersuchten historischen Stürmen in der Deutschen Bucht am besten mit den Messungen an den Forschungsplattformen in Nord und Ostsee (FINO1, FINO2 und FINO3) verifizierten.

Mit dem Expertennetzwerk des BMVI ergaben sich Kooperationsmöglichkeiten bei der Anwendung der beiden Methoden „effektiver Wind“ und „Windstau“ auf unterschiedliche Datensätze.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Daten

Für die Berechnung des effektiven Windes und des Windstaus wurden umfangreiche atmosphärische Datensätze herangezogen. Diese umfassen zusammen mehr als 12.000 Jahre. Untersucht wurden Reanalysen wie COSMO-REA6 (Bollmeyer et al. 2015), NOAA-20CRv2c (Compo et al. 2011), ERA-40 (Uppala et al. 2005), ERA-Interim (Dee et al. 2011), ERA5 (Copernicus Climate Change Service (CS3) 2017), COSMO_CLM/NCEP (Rockel et al. 2008) und NCEP/SN_REMO (Feser et al. 2001; Kalnay et al. 1996) sowie Daten aus dem Projekt OptempS-MohoWif (Brecht und Frank 2014). Des Weiteren wurde ein Ensemble von 24 Klimamodellläufen ausgewertet. Dazu gehören Daten der globalen Klimamodelle ECHAM5 (Röckner et al. 2003), ECHAM6 (Stevens et al. 2013), HadGEM2 (Collins et al. 2011), GFDL (The GFDL Global Atmospheric Model Development Team 2004) und EC-Earth (Hazeleger et al. 2010), jeweils gemäß verschiedener, repräsentativer Szenarien der weiteren Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Representative Concentration Pathways RCP 2.6, 4.5 und 8.5, van Vuuren et al. 2011). Eine Zusammenstellung der verwendeten Daten befindet sich in der Tabelle B-1. Dazu gehören Messdaten, Reanalysen und Hindcasts der Atmosphäre und Klimamodelldaten. Es handelt sich insgesamt um 12.530 Jahre atmosphärischer Daten.

EXTREMENESS-B

Table B-1: Übersicht der verwendeten Daten für die Berechnung des effektiven Windes und des Windstaus.

Datenart	Name des Datensatzes	Urheber	Zeitraum	Umfang in Jahren
Messdaten	FINO123	BSH	2004-2015	25
	Küstenstationen	DWD	1959-2017	180
	Signalstationen	DWD	1877-1999	350
	Gezeiten ¹	BSH	1900-2099	200
				<u>755</u>
Reanalysen/ Hindcasts	COSMO-REA6	DWD	1995-2018	23
	NOAA 20CR	NOAA	1851-2014	56 x 164
	ERA40	ECMWF	1957-2010	54
	ERA-Interim	ECMWF	1979-2017	39
	ERA5	ECMWF	2000-2018	10 x 19
	COSMO_CLM/NCEP	HZG/PIK/BTU	1948-2014	66
	NCEP/SN_REMO	HZG	1958-2007	60
	OptempS	OptempS	1960-2011	52
			<u>9668</u>	
Klima- modelle	MPIOM-REMO (ERA40)	MPI	1990-2001	2 x 20
	MPIOM-REMO – ECHAM6r1(c20, RCP 8.5)		1920-2005	86
		MPI	2006-2100	95
	MPIOM-REMO – ECHAM6r2,r3 (c20, RCP 8.5)		1950-2005	2 x 56
		MPI	2006-2100	2 x 95
	ECHAM5/MPIOM-CCLM	MPI	1960-2100	2 x 141
	RCA4-NEMO:			
	MPI-ESM-LR (RCP 2.6,4.5, 8.5)	SMHI/MPI	2006-2098	3 x 93
	IPSL-CM5A-MR (RCP 4.5, 8.5)	SMHI/IPSL	2006-2098	2 x 93
	HadGEM2-ES (RCP 2.6,4.5, 8.5)	Met-Office	2006-2098	3 x 93
	GFDL-ESM2M (RCP 2.6,4.5, 8.5)	NOAA	2006-2098	3 x 93
EC-EARTH (RCP 2.6,4.5, 8.5)	SMHI	2006-2098	3 x 93	
			<u>2107</u>	
Insgesamt				<u>12530</u>

¹ Vom BSH berechnete historische und berechnete astronomische Gezeiten

EXTREMENESS-B

Methoden effektiver Wind und Windstau

Für die Berechnung des Wasserstandes an der deutschen Nordseeküste wurden zwei statistische Verfahren mit Reanalysen optimiert. Beide beruhen ausschließlich auf atmosphärischen Daten.

Der effektive Wind (Koziar und Renner 2005) ist eine Projektion des 10m horizontalen Windes auf die Richtung, bei der der Effekt vom Wind auf den Wasserstand an der Küste am höchsten ist. Diese Richtung variiert zwischen 295° und 315° entlang der deutschen Nordseeküste.

Die Methode des Windstaus beruht auf einem statistischen Modell, welches eine multiple lineare Regression mit folgenden Prädiktoren berechnet: Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck in Aberdeen (UK) und an einem Punkt an der deutschen Nordseeküste (Cuxhaven oder Borkum/Emden) (Müller-Navarra und Giese 1999; Jensen et al. 2013). Der Prädiktand ist die Höhe des Windstaus. Dieses Verfahren ist aufwendiger als die Berechnung des effektiven Windes, da es zum einen zusätzlich den Luftdruck an zwei Stationen benötigt und zweitens, weil die Berechnung mehr Schritte beinhaltet. Die Methode erwies sich als erfolgreich für mittleren Wasserstände und Windfelder, bei denen eine gute Übereinstimmung zwischen Beobachtungen und modellierten Windstauhöhen zu erkennen ist. Bei den höchsten Windstauhöhen und Windfeldern unterschätzt das Verfahren zur Berechnung des Windstaus allerdings die modellierten Werte. Eine Verbesserung der Ergebnisse wurde erzielt, indem die Windgeschwindigkeiten im Vorfeld kategorisiert wurden und für jede Klasse neue Koeffizienten für die Regression berechnet wurden.

Im nächsten Schritt wurden die beiden Verfahren ebenfalls auf die Daten von Klimamodellen angewendet. Dies geschah in der Annahme, dass der statistische Zusammenhang für die Klimamodelle ebenso gilt wie für die Reanalysen.

Effektiver Wind in der regionalen Reanalyse COSMO-REA6

Die 7 höchsten Werte (99.99 Perzentil) des effektiven Windes nach COSMO REA6 für die Station Emden zwischen 1995 und 2014 sind in der Abbildung B-1 dargestellt. Die Hauptwindrichtung bei jedem Ereignis ist NW.

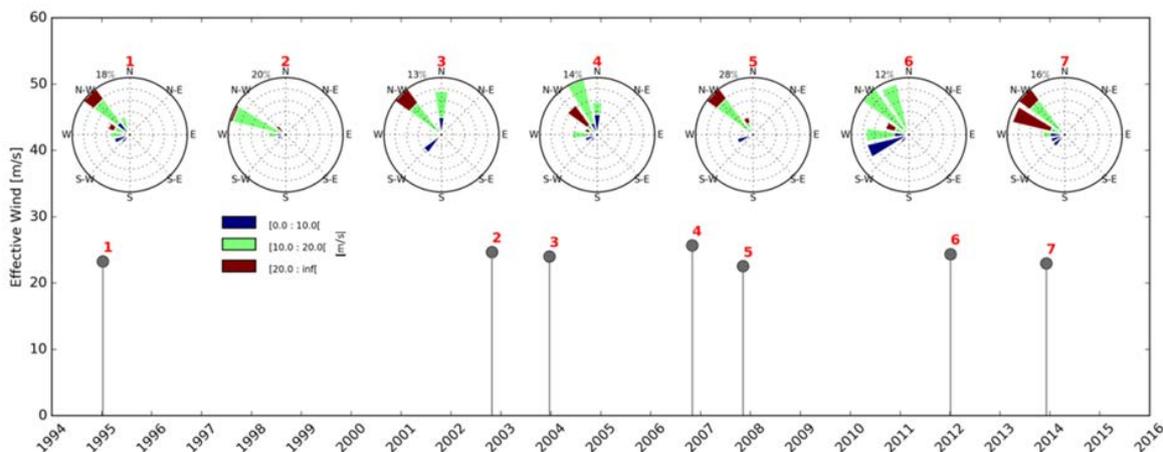


Abbildung B-1: Die stärksten 7 Ereignisse in Emden mit einem effektiven Wind >22.22m/s (1995-2014), basierend auf der regionalen Reanalyse COSMO REA6.

EXTREMENESS-B

Effektiver Wind in der globalen Reanalyse 20CRv2c

Die Methode des effektiven Windes wurde ebenfalls für die 56 Ensemble Member von 20CRv2c zwischen 1851 und 2014 angewandt. In der Abbildung B-2 werden die Ereignisse mit den höchsten effektiven Windgeschwindigkeiten dargestellt. Zu beachten ist die Nachbildung der Stürme bei allen Ensembles ab 1950, die Variabilität des höchsten Wertes zu diesen Zeitpunkten ist niedrig im Vergleich zu den Ereignissen von vor 1950. Zu der hohen Variabilität des Wertes des effektiven Windes sind auch zusätzliche Zeitpunkte zu erkennen.

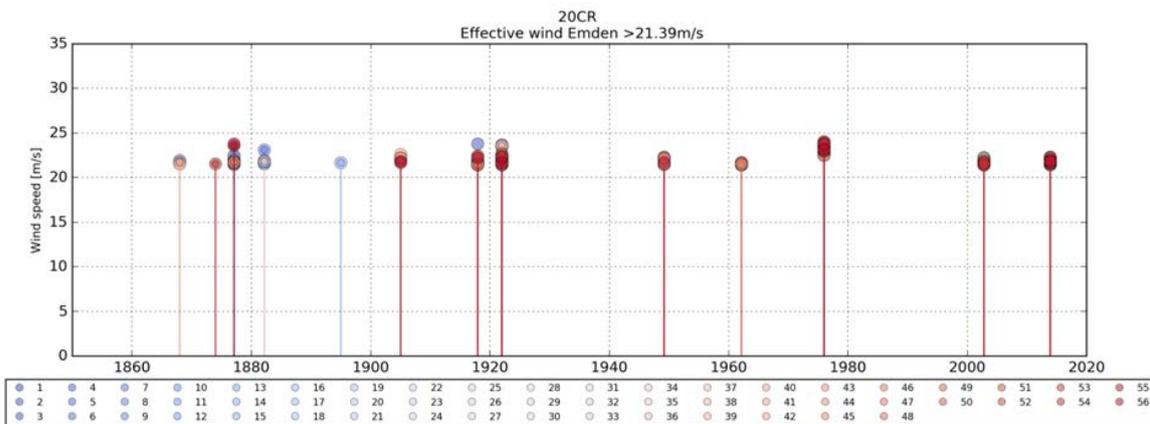


Abbildung B-2: Stärkste Ereignisse in Emden mit einem effektiven Wind > 21.39m/s (1851-2014), basierend auf der globalen Reanalyse 20CRv2c.

Windstau in der regionalen Reanalyse COSMO-REA6

Aufgrund der Datenverfügbarkeit (stündliche Werte des Wasserstandes) wurde der Windstau für den Pegel Cuxhaven bestimmt. Eine Optimierung der Regression war erforderlich, um extreme Ereignisse zu reproduzieren. Die Anwendung der Windstauformel auf die Daten der Reanalyse COSMO REA6 ergibt im Zeitraum 1995-2018 insgesamt einen maximalen Windstau von 2,46 m bei einem Effektivwind von 16,35 m/s. Dies zeigt unter anderem, dass nicht die höchsten effektiven Winde wie eingangs beschrieben den höchsten Windstau produzieren. Zum Vergleich ist bei dem höchsten effektiven Wind von 25,94 m/s der Windstau mit 2,13 m deutliche niedriger als der Maximalwert.

Windstau in der globalen Reanalyse 20CRv2c

Für die Berechnung des Windstaus für die Reanalyse 20CR Version 2c wurde die gleiche Methode wie bei COSMO-REA6 angewandt. In der Auswertung wurden dann aber in den einzelnen Ensemblemitgliedern unterschieden. So zeigt sich im Zeitraum von 1851-2014 der höchste Wert im Windstau von 2,9 m bei einem effektiven Wind von 21,05 m/s.

Effektiver Wind und Windstau in den Klimaprojektionen

Die Modellergebnisse aus ECHAM5_MPIOM_CCLM wurden in einer ersten Phase verwendet. Zwei Läufe für die Szenarien A1B1 und B1 und ihre Kontrollläufe c20 (6 Datensätze) wurden zur Verfügung gestellt. Der effektive Wind und die höchsten Ereignisse (99. Perzentil) wurden für die Stadt Emden bzw. Borkum

EXTREMENESS-B

berechnet und für erste Vergleiche mit dem HZG mit den höchsten Ereignissen, welche auf den höchsten Stau identifiziert wurden.

Die Ereignisse konnten in drei Gruppen klassifiziert werden. Eine erste Gruppe enthält die gemeinsamen Ereignisse mit dem stärksten effektiven Wind. Eine zweite Gruppe enthält die Ereignisse, welche nur mit der Methode des höchsten Windstaus identifiziert wurden und die letzte Gruppe enthält die Ereignisse, welche nur mit dem effektiven Wind gefunden worden sind. Nach detaillierten Untersuchungen jeder Gruppe zeigt sich, dass hohe Werte des effektiven Windes nicht automatisch eine Sturmflut induzieren (Ganske et al. 2018). Die Zugbahn der einzelnen Ereignisse wurde mit den Luftdruckfeldern berechnet, beziehungsweise wurde das Minimum des Luftdrucks an jedem Zeitschritt gesucht und abgebildet. Ereignisse die Sturmfluten erzeugen, sind auf stark langanhaltenden Effektiven Winden zurückzuführen. Die Zugbahn solcher Ereignisse ist in Gerber et al. (2016) beschrieben. Ereignisse, welche hauptsächlich mit der Methode des hohen Staus gefunden worden sind, sind ebenfalls charakteristisch mit einem langhaltenden effektiven Wind verknüpft. Allerdings liegen die Werte des effektiven Windes unter 20 m/s und gehören damit nicht zu den höchsten effektiven Winden. Hier bewegen sich die Ereignisse etwas nördlicher als im ersten Fall. In dem letzten Fall sind die identifizierten Ereignisse zu kurzlebig und zeigen eine zu hohe Zuggeschwindigkeit, um eine Sturmflut zu verursachen. In der Abbildung B-3 ist beispielhaft eine dargestellt, wie die Auswertung in den Klimaprojektionen durchgeführt wurde.

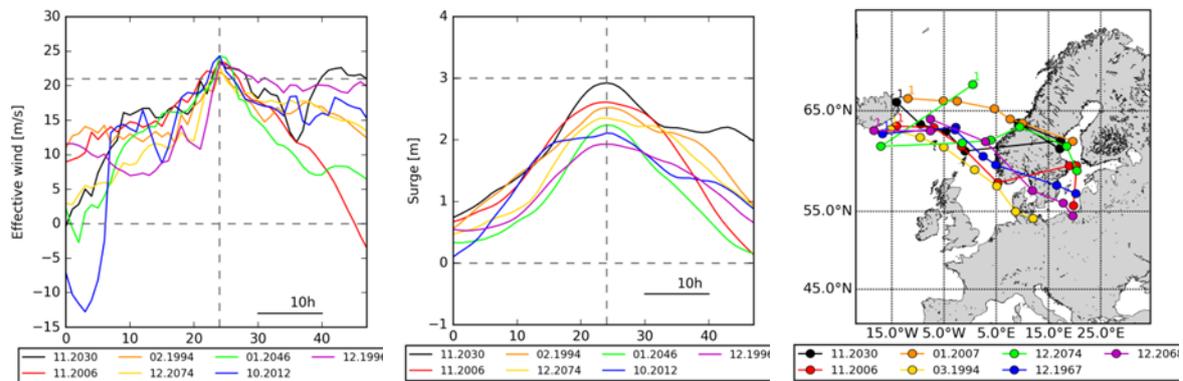


Abbildung B-3: Die 7 stärksten Ereignisse mit beiden Methoden identifiziert, hoher Windstau und effektiver Wind. (a) Effektiver Wind, (b) Zugehörigen Stau, zentriert auf das Maximum für einen Zeitraum von 48 Stunden und (c) Zugbahn für jedes Ereignis über die Nordsee.

Zusammenfassung

Ein Vergleich der gefundenen Ereignisse mit denen des HZG ergab, dass mit den Verfahren effektiver Wind und Windstau keine Sturmfluten mit höheren Wasserständen gefunden werden konnten, als von HZG in den dynamisch modellierten Daten (ca. 3.000 Jahre). Als Datenbasis wurden deshalb vom HZG die in EXTREMENESS-A erzeugten Ereignisse Hohe Flut, Sturmflutserie und Lange Flut an EXTREMENESS-C übergeben.

Damit wurden die Grenzbedingungen für die Anwendung des effektiven Windes für die Identifizierung von extremen Sturmfluten bestimmt. Es konnte festgestellt werden, dass hohe effektive Winde nicht automatisch auf eine Sturmflut verweisen. Zusätzlich zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit ist die Andauer des effektiven Windes von Bedeutung. Starke effektive Winde, die mit niedrigen Wasserständen

in Zusammenhang stehen, werden durch Randtiefs erzeugt, die sich an der Küste bilden und sich schnell bewegen.

Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Antragsgemäß wurde ein großes Ensemble verschiedener meteorologischer Datensätze untersucht, um die beiden Größen Effektiver Wind und Windstau zu berechnen. Dabei zeigte sich, dass die Reanalysen/Klimamodelle in unterschiedlicher Güte in der Lage sind, hohe Werte des effektiven Windes und des Windstaus wiederzugeben. Bei den Reanalysen zeigte COSMO RE6 die beste Performance, bei den Klimamodellen ergaben sich bei ECHAM6_MPIOM die höchsten Werte der beiden Sturmflutparameter. Auf eine BIAS-Korrektur der Winddaten konnte aus diesem Grund verzichtet werden.

Zusätzlich zu den im Projektantrag geplanten Untersuchungen wurde die historische Sturmflut März 1906 gemeinsam mit HZG untersucht. Dazu wurden vom DWD historische Luftdruckdaten digitalisiert und Wetterkarten gezeichnet, aus denen HZG die Wasserstände berechnet hat.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises besteht in der Finanzierung einer Projektstelle für 33 Monate. Weiterhin relevant sind die Kosten für Dienstreisen zu wissenschaftlichen Konferenzen sowie zu den Projektpartnern. Einzelheiten können dem detaillierten Verwendungsnachweis entnommen werden. Es haben sich gegenüber dem Antrag keine wesentlichen Änderungen ergeben.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Generell besteht ein Bedarf an Untersuchungen zu extremen Stürmen sowie den damit potenziell verbundenen Sturmfluten. In EXTREMENESS-B wurde ein sehr großes Ensemble verschiedener Datensätze bezüglich solcher Sturmereignisse untersucht. Ein wichtiger Aspekt dabei war die Analyse der Fähigkeit der verschiedenen Datensätze, solche Sturmereignisse zu reproduzieren.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Untersuchungen in EXTREMENESS-B zeigen, dass in den Klimamodellprojektionen stärkere Stürme auftreten können, als in der Vergangenheit beobachtet. Allerdings wurden in den meteo-marinen Datensätzen, die in EXTREMENESS-A analysiert wurden, höhere Ereignisse gefunden. Letztere wurden im weiteren Projektverlauf ausgewertet.

Der Vergleich mit den Messungen an den Forschungsplattformen und in der Nord- und Ostsee zeigte, dass globale und regionale Reanalysen der Atmosphäre in unterschiedlicher Güte Sturmereignisse reproduzieren können. Während großräumige und langsam ziehende Sturmtiefs von globalen und regionalen Reanalysen hinreichend gut beschrieben werden können, ist dies bei kleinräumigen und schnell ziehenden Tiefs nicht der Fall. Diese können nur von den regionalen Reanalysen gut simuliert werden. Dies ist ein wichtiger Hinweis für die Anwendbarkeit solcher Reanalysen zum Beispiel für die Offshore-Windindustrie.

Die erzielten Ergebnisse wurden in verschiedenen Veröffentlichungen, Vorträgen und Postern der Öffentlichkeit vorgestellt. Ausgewählte Ergebnisse sind auch über die Homepage des DWD verfügbar: <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaueberwachung/extremeness/extremenesshome.html>.

Fortschritt bei anderen Stellen

EXTREMENESS-B stand in enger Kooperation mit dem Projekt KLIWAS und dem Expertennetzwerk des BMVI Projektpartner (BSH und DWD Hamburg). Hier wurden gemeinsam die beiden Methoden effektiver Wind und Windstau weiterentwickelt. Gemeinsam mit dem DWD erfolgte eine Analyse der Güte der Reanalyse COSMO-REA6 bezüglich der Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Stürmen.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Peer Review

Die 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) (2019): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. Die Küste, submitted.

Fery, N., B. Tinz, T. Leiding, F. Kaspar, A. Ganske, L. Gates, and, T. Möller 2020: Offshore wind conditions during extratropical cyclones in global and regional reanalyses in the German North and Baltic Seas. In prep.

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

Rudolph Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Ganske, Anette; Grabemann, Iris; Meyer, Elke; Tinz, Birger; Möller, Thomas; Weisse, Ralf (2019): Analyse extremer Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste und ihre möglichen Verstärkungen. Die Küste, submitted.

Sadikni, R., Schade, N., Andersson, A., Jahnke-Bornemann, A., Hinrichs, I., Fery, N., Tinz, B., Gates, L., and D. Stammer 2018: The KLIWAS North Sea Climatology. Part I: Processing of the Atmospheric Data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 35, 111-126, DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0044.1

Vorträge

Fery, N.; Tinz, B. 2017: Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können. 22. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 22. November 2017, Bremerhaven

Fery, N., A. Ganske, B. Tinz and L. Gates. Reproduction of 10m-wind and sea level pressure fields during extreme storms with regional and global atmospheric reanalyses in the North Sea and the Baltic, 2nd Baltic Earth Conference, 11.06-15.06, Helsingør, Dänemark

Fery, N., B. Tinz, and, L. Gates 2018: Reproduction of storms over the North Sea and the Baltic with the regional reanalysis COSMO-REA6. International Symposium on Regional Reanalysis, 17-19 July 2018, Bonn

Fery, N., B. Tinz and L. Gates 2018: Extreme surge level identification and evaluation along the German North Sea coast based on atmospheric components, EMS 2018, 03.09-07.09, Budapest, Ungarn

Weisse, R. und die EXTREMENESS Projektgruppe 2017: Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. 1. Workshop des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums, 23. November 2017, Emden

EXTREMENESS-B

Weisse, R. und die EXTREMENESS Projektgruppe 2017: Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. KÜNO-Jahrestagung, 11-12 Oktober 2017, Rostock

Möller, T., E. Meyer, B. Tinz, R. Scholz, R. Weisse, I. Grabemann 2019: Rekonstruktion der Sturmflut 12./13. März 1906, DACH 2019, 22. März 2019, Garmisch-Partenkirchen

Möller, T., Tinz, Birger; Fery, Natacha; Ganske, Anette; Bégué, Friederike; Kaspar, Frank; Leiding, Tina; Gates, Lydia 2019: Storms in the German Bight and Western Baltic in global and regional reanalyses, 10. Mai 2019, CLIMAR-5, Hamburg

Poster

Brodhagen, T.; Fery, N.; Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Rudolph, E.; Tinz, B.; Weisse, R. 2017: Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und möglicher Verstärkungen. KÜNOJahrestagung, 11-12 Oktober 2017, Rostock

Fery, N.; Tinz, B.; Ganske, A.; Andersson, A.; Gates, L., 2017: High resolution regional reanalysis: a tool for the identification of extreme wind surges in the German Bight, 13-17. November 2017, Rom, Italien

Ganske, A., N. Fery, B. Tinz 2018: Werden sich die meteorologischen Bedingungen für Sturmfluten in der Deutschen Bucht möglicherweise ändern? Poster auf dem Plenum des BMVI-Expertenetzwerkes, 14.11.2018, Bonn

Tinz, Birger; Fery, Natacha; Ganske, Anette; Bégué, Friederike; Kaspar, Frank; Leiding, Tina; Gates, Lydia; Möller, Thomas 2019: Stürme in der Deutschen Bucht und der Westlichen Ostsee in globalen und regionalen Reanalysen der Atmosphäre, DACH 2019, 19. März 2019, Garmisch-Partenkirchen

LITERATURVERZEICHNIS

s. gemeinsames Literaturverzeichnis.

EXTREMENESS-C

Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkung

ZE: Bundesanstalt für Wasserbau	Förderkennzeichen: 03F0758D
Vorhabenbezeichnung: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkung	
Laufzeit des Vorhabens: 10/2016 – 09/2019	
Verfasserinnen: Elisabeth Rudolph, Tabea Brodhagen	

KURZDARSTELLUNG

Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten schwerer Sturmfluten sowie möglicher Änderungen im Zuge des anthropogenen Klimawandels sind für den Küstenschutz in der Deutschen Bucht sowie in den angrenzenden Ästuaren von z. B. Elbe und Ems mit den Hafenstädten Hamburg und Emden von großer Bedeutung. Im Gegensatz zu bisher existierenden Untersuchungen, die sich typischerweise mit hohen Perzentilen oder Wiederkehrwerten und deren Änderungen beschäftigen, sollen im Projekt EXTREMENESS Ereignisse untersucht werden, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich, aber potentiell mit extremen Konsequenzen verbunden sind. Zu diesem Zweck werden zunächst verschiedene Methoden genutzt, um aus einer Vielzahl existierender Beobachtungsdaten, Reanalysen und Klimaszenarienrechnungen extreme Sturmflutereignisse und die zugehörigen meteorologischen Bedingungen zu identifizieren (EXTREMENESS-A und EXTREMENESS-B). Anschließend wird in EXTREMENESS-C mithilfe von Modellstudien für die Deutsche Bucht und die Ästuarregion von Ems (Fokusregion) und Elbe (Vergleichsregion) untersucht, inwieweit diese Ereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch extremeren Sturmfluten führen können. Als mögliche Verstärkung der extremen Sturmfluten werden der Einfluss einer Erhöhung des Abflusses aus dem Binnenbereich sowie die Bedeutung eines Meeresspiegelanstieges von 50 cm bzw. 100 cm in der Nordsee untersucht. Die Analyse des Sturmflutscheitelwasserstandes in der Deutschen Bucht und entlang der Ästuarregion von Ems und Elbe erlaubt die Abgrenzung der Einflussbereiche von Meeresspiegelanstieg und Abfluss für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen dienen in

EXTREMENESS-D und EXTREMENESS-E für die Region Emden zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Küstenschutz und das Küstenschutzmanagement.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die BAW hat als zentraler Dienstleister für Beratung und Unterstützung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) im Rahmen ihrer verkehrswasserbaulichen Aufgaben umfangreiche Erfahrungen in der numerischen Modellierung und in der Analyse von Veränderungen in den abiotischen Parametern von Ästuaren (Tide- und Sturmflutwasserstände, Strömungen, suspendiertes Material und Salzkonzentrationen, etc.). Als Folge des Klimawandels werden beispielsweise sowohl ein globaler als auch ein lokaler Meeresspiegelanstieg in der Nordsee, eine Zunahme winterlicher Niederschläge in Europa (die wiederum höhere Abflüsse der Flüsse verursachen können) und eine Abnahme der sommerlichen Niederschläge (die niedrigere Abflüsse zur Folge haben) erwartet. Um mögliche mit einer Klimaänderung verbundene Betroffenheiten für die Bundeswasserstraßen identifizieren und Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können, ist es wichtig, die zukünftigen Bedingungen unter dem Einfluss eines sich ändernden Klimas zu verstehen und zu analysieren. Die BAW nutzt hydrodynamische numerische Ästuarmodelle, um die Auswirkungen von z. B. Strombaumaßnahmen wie Buhnen und Leitdämmen, aber auch von neuen Hafenbecken, Überflutungsflächen oder von Vertiefungen der Fahrrinnen zu untersuchen. Diese numerischen Modelle wurden in EXTREMENESS-C genutzt, um die Auswirkungen der durch einen Klimawandel bedingten Änderungen der seeseitigen Randbedingungen auf die Ästuare von Elbe und Ems zu untersuchen.

In den letzten Jahrzehnten waren auch Fragestellungen, die sich mit Küstenschutz und Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems beschäftigen, Gegenstand intensiver Forschungen der BAW. Um ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse zu erhalten, wurden sehr hohe historische Sturmfluten in der Deutschen Bucht und entlang der Ästuare untersucht. Die Bedeutung der Windentwicklung über dem Ästuar und des Oberwasserzuflusses in das Ästuar für die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Ästuare wurde anhand von Ergebnissen hydrodynamisch-numerischer Ästuarmodelle untersucht (KFKI Projekt "Sturmfluten"). Darauf aufbauend wurden Gebiete im Ästuar identifiziert, in denen die Wasserstände signifikant durch den Wasserstand in der Nordsee, den lokalen Wind oder den Oberwasserzufluss ins Ästuar beeinflusst sind (Plüß et al. 2001).

Das Forschungsprogramm KLIWAS war an den durch Klimaänderungen hervorgerufenen Auswirkungen auf die deutschen Wasserstraßen und die Schifffahrt interessiert. Dabei wurden u. a. Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems untersucht. Basierend auf sehr hohen historischen Sturmfluten (3. Januar 1976 und 1. November 2006) wurden in einer Sensitivitätsstudie der Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs in der Nordsee, von Windänderungen über dem Ästuar und des Abflusses aus dem Binnenbereich auf die höchsten Wasserstände während einer Sturmflut untersucht. Die betreffenden Parameter wurden basierend auf dem heutigen Wissen über Änderungen des Meeresspiegels, der Windfelder und des Abflusses variiert. Die Auswirkungen auf die Sturmflutscheitelwasserstände, deren Eintrittszeiten sowie die Dauer hoher Wasserstände wurden entlang der Ästuare analysiert (Rudolph 2014).

Im KFKI-Projekt MUSE wurden die Ergebnisse aus dem Ensemble-Vorhersagesystem des ECMWF genutzt, um zusätzliche Sturmfluten hervorrufende Wettersituationen zu finden, die physikalisch konsistent sind und die eine für das heutige Klima bekannte Eintrittswahrscheinlichkeit haben. Mehrere sehr hohe

EXTREMENESS-C

Ereignisse wurden gefunden und im Detail für die Deutsche Bucht analysiert. In XtremRisK wurden Wasserstandsrandwerte und Windfelder aus MUSE genutzt, um zwei extreme Sturmfluten im Elbeästuar zu modellieren und ihre Auswirkungen zu analysieren.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Bereits bei der Planung vor Projektbeginn wurde das Forschungsvorhaben EXTREMENESS in vier technisch unabhängige Arbeitspakete gegliedert sowie die Verantwortlichkeiten für die Arbeitspakete und Unterpakete festgelegt (siehe den Arbeits- und Zeitplan im Anhang). Die ebenfalls vor Projektbeginn für die einzelnen Arbeitspakete als Meilensteine definierten Zwischenergebnisse unterstützten eine fristgerechte Bearbeitung der Arbeitspakete. EXTREMENESS-C bearbeitete in AP 2 „Analyse potentieller Verstärkungsmechanismen“ AP 2.3 „Ästuarmodellierung“ und AP 2.6 „Mögliche Verstärkung im Ästuar“ und arbeitete mit im AP 2.7 „Zusammenstellung potentiell verstärkter Sturmflutereignisse“.

Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

In den Forschungsvorhaben MUSE, XtremRisK und KLIWAS wurden mit hydrodynamisch numerischen Modellen der Ästuarare von Elbe, Weser und Ems Sensitivitätsuntersuchungen zur Bedeutung von Auswirkungen des Windes über dem Ästuar, dem Abfluss aus dem Binnenland in das Ästuar sowie zu einem Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht auf die Wasserstände bei Sturmfluten im heutigen Klima durchgeführt. In EXTREMENESS konnten extreme Sturmfluten in Klimaszenarien identifiziert werden und die Bedeutung von Abfluss und Meeresspiegelanstieg für die Höhe und Dauer der Sturmfluten analysiert werden.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die erfolgreiche Arbeit in EXTREMENESS war der ständige Austausch mit den für Küstenschutz zuständigen Landesbehörden der Länder Schleswig-Holstein, Hamburg und Niedersachsen wichtig und konnte durch die regelmäßigen Treffen mit der Projektbegleitenden Gruppe gewährleistet werden.

Zusätzlich gab es einen intensiven Austausch mit dem BMVI Expertennetzwerk Wissen Können Handeln (ExpN), das sich u. a. damit befasst Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anzupassen. Für den Betrieb der Bundeswasserstraßen in den Ästuaren von Elbe, Weser und Ems sind Kenntnisse über die Auswirkungen eines Klimawandels sowohl bei mittleren Verhältnissen als auch bei extremen Ereignissen von großer Bedeutung.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Untersuchungskonzept EXTREMENESS-C

Das Projekt EXTREMENESS 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 dennoch physikalisch plausibel und möglich sind und die mit extremen Schäden oder Auswirkungen verbunden sein könnten.

In den Teilprojekten EXTREMENESS-A und EXTREMENESS-B werden extreme Sturmtiden mit den zugehörigen meteorologischen Bedingungen aus existierenden Datensätzen heutiger und möglicher zukünftiger Klimabedingungen herausgefiltert. Die Auswirkungen der ausgewählten extremen

Sturmfluten sowie ihr Potential für eine mögliche Verstärkung durch einen Meeresspiegelanstieg (SLR) und eine Erhöhung des Abflusses (Q) werden im Teilprojekt EXTREMENESS-C mit einem Modell der Deutschen Bucht einschließlich der Ästuarare Ems, Weser und Elbe auf der Grundlage des numerischen Modellverfahrens UnTRIM2 untersucht. Die Bedeutung dieser möglichen Verstärkung extremer Sturmfluten für die Sturmflutscheitelwasserstände HW, die Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände THW sowie die Dauer hoher Wasserstände DHW wird analysiert.

Da in den Teilprojekten EXTREMENESS-D und EXTREMENESS-E die Auswirkungen extremer Sturmfluten in der Region um Emden betrachtet werden, liegt auch der Fokus der Untersuchung in EXTREMENESS-C auf dem Ems-Ästuar. Die Wahl des Modellgebietes erlaubt jedoch die vergleichende Analyse und Darstellung der Auswirkungen des gleichen Sturmflutereignisses in den Ästuaren von Ems und Elbe.

Auswahl der Sturmflutszenarien und mögliche Verstärkung in Ems und Elbe

Basierend auf den Ergebnissen von Gesprächen mit den Stakeholdern in der Region Emden wird in EXTREMENESS-E herausgearbeitet, welche Größen eine extreme Sturmflut charakterisieren. Diese Kriterien werden von EXTREMENESS-A und EXTREMENESS-B für die Auswahl der extremen Sturmflutereignisse bei Borkum in der Emsmündung zugrunde gelegt:

1. die Sturmflut mit dem absolut höchsten Wasserstand (Hohe Flut, HF)
2. die Sturmflutserie (SFS) mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche
3. die Sturmflut mit der längsten Dauer von Wasserständen über dem mittleren Tidehochwasser (Lange Flut, LF).

Die Hohe Flut mit einem maximalen Wasserstand von NHN + 4,73 m wird in einer Klimaprojektion basierend auf dem Emissionsszenario B1 (Februar 2030) gefunden. Dieses Sturmflutereignis HF kann in EXTREMENESS-A durch eine geeignete Verschiebung von astronomischer Tide zur Windentwicklung zusätzlich verstärkt (HF_v) werden. Die Sturmflutserie, die gleichzeitig als Lange Flut auch das zweithöchste Ereignis mit einem maximalen Wasserstand von NHN + 4,66 m enthält, wird aus einer Klimaprojektion basierend auf dem Szenario A1B (November 2030) herausgefiltert. Die Lange Flut stellt zufällig gleichzeitig das erste Ereignis der Sturmflutserie dar und wird im Folgenden als Teil dieser Serie behandelt. Als Referenzflut (REF) wird die historische Sturmflut vom 1. November 2006 (5. Allerheiligenflut) gewählt, die in der Emsmündung die höchsten beobachteten Wasserstände seit dem 13. März 1906 erreichte.

Für die Untersuchung einer potentiellen Verstärkung der Extremereignisse in den Ästuaren von Ems und Elbe wird eine Erhöhung des Abflusses (Q) aus dem Binnenbereich sowie ein Meeresspiegelanstieg (SLR) in der Nordsee angenommen. Hierfür werden die extremen Sturmflutereignisse mit einem mittleren Abfluss MQ (Ems: 80 m³/s, Elbe: 714 m³/s; DGJ 2018; DGJ 2015) sowie dem höchsten beobachteten Abfluss HHQ (Ems: 1200 m³/s im Februar 1946, DGJ 2018, Elbe: 4080 m³/s im Juni 2013, DGJ 2015) kombiniert. Für den Meeresspiegel werden zwei Anstiegsszenarien untersucht: 50 cm und 100 cm. Diese Werte decken die wahrscheinliche Spanne der Medianwerte für den globalen Meeresspiegelanstieg ab und liegen innerhalb der Bandbreite des möglichen Meeresspiegelanstiegs in der Nordsee bis 2100 (Stocker 2014).

Das Deutsche Bucht Modell

Die ausgewählten Sturmflutereignisse werden mit einem hydrodynamisch numerischen Modell der Deutschen Bucht und der Ästuar von Elbe, Jade-Weser und Ems untersucht. Das drei-dimensionale mathematische Verfahren UnTRIM2 (Casulli 2009; Casulli und Stelling 2011) basiert auf der Methode der finiten Differenzen/ finiten Volumen und löst die Flachwassergleichungen und die Transportgleichungen 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 Ästuar 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 C-1) umfasst das Gebiet der inneren Deutschen Bucht von Terschelling in den Niederlanden bis Hvide Sande in Dänemark sowie die Ästuar der Ems bis zum Küstenkanal, der Weser bis Intschede und der Elbe bis Bleckede. Für die Sturmflutuntersuchungen 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 die geschlossenen Sturmflutsperrwerke geschützt. Die Wahl dieses Modellgebietes ermöglicht es, die Auswirkungen der 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, dem Wind über dem Modellgebiet und den Abflüssen aus dem Binnenbereich in die Ästuar. Für die Untersuchung in EXTREMENESS-C werden von EXTREMENESS-A bereitgestellte Windfelder verwendet, die auch für die Nordseemodellierung eingesetzt werden. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird mit dem von Smith und Banke (1975) vorgeschlagenen Koeffizienten parametrisiert. Am binnenseitigen Ende der Ästuar wird der Abfluss vorgegeben. Für die Referenzflut REF wird der im Sturmflutzeitraum gemessene Abfluss vorgegeben, Ems: 32 m³/s, Weser: 150 m³/s und Elbe: 300 m³/s, DGJ 2010b und DGJ 2010a) Für die untersuchten extremen Sturmflutereignisse HF_v, SFS und LF wird für Ems, Weser und Elbe ein konstanter mittlerer Abfluss MQ (Ems: 80 m³/s, Weser: 324 m³/s und Elbe: 714 m³/s, DGJ 2018 und DGJ 2015) gewählt. Auf dem offenen Rand zur Nordsee wird die Wasserstandsentwicklung von EXTREMENESS-A aus den Modellergebnissen des Nordsee-Modells bereitgestellt. 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 und kann während der Simulation der Sturmflutereignisse gesteuert werden. In Abwägung der Belange des Küstenschutzes und des Naturschutzes soll das Emssperrwerk 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

EXTREMENESS-C

gleich sind. Um die Schutzfunktion des Sperrwerkes auch bei einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 100 cm zu gewährleisten, wird die Höhe der Sperrwerkstore von NHN + 7 m bzw. NHN + 8 m in der Natur auf NHN + 9 m im Deutsche Bucht Modell angehoben.

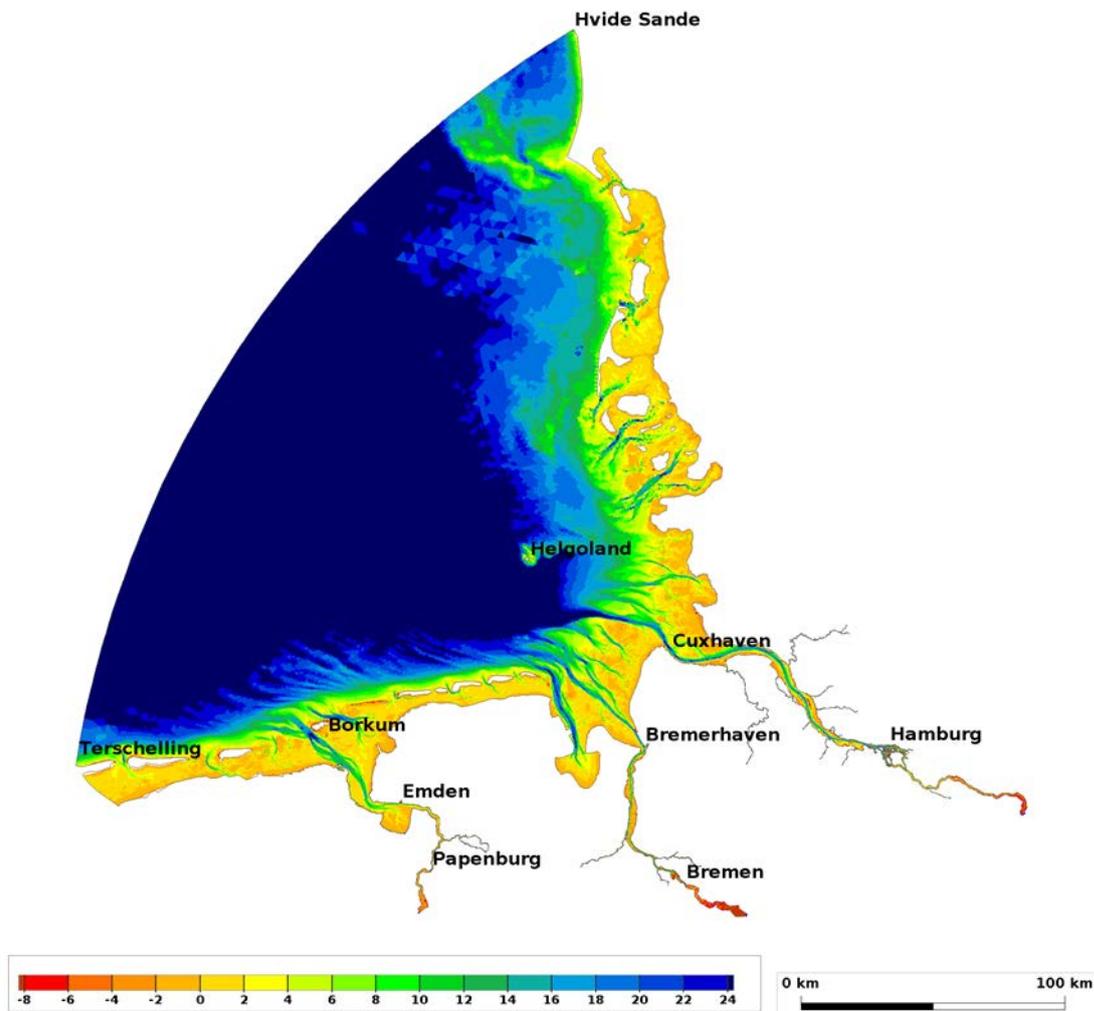


Abbildung C-1: Topographie des Modells der Deutschen Bucht mit den Ästuaren von Ems, Jade-Weser und Elbe mit ausgewählten Pegelorten. Das Modellgebiet umfasst die innere Deutsche Bucht von Terschelling in den Niederlanden bis Hvide Sande in Dänemark sowie die angrenzenden Ästuare von Ems, Jade-Weser und Elbe.

EXTREMENESS-C

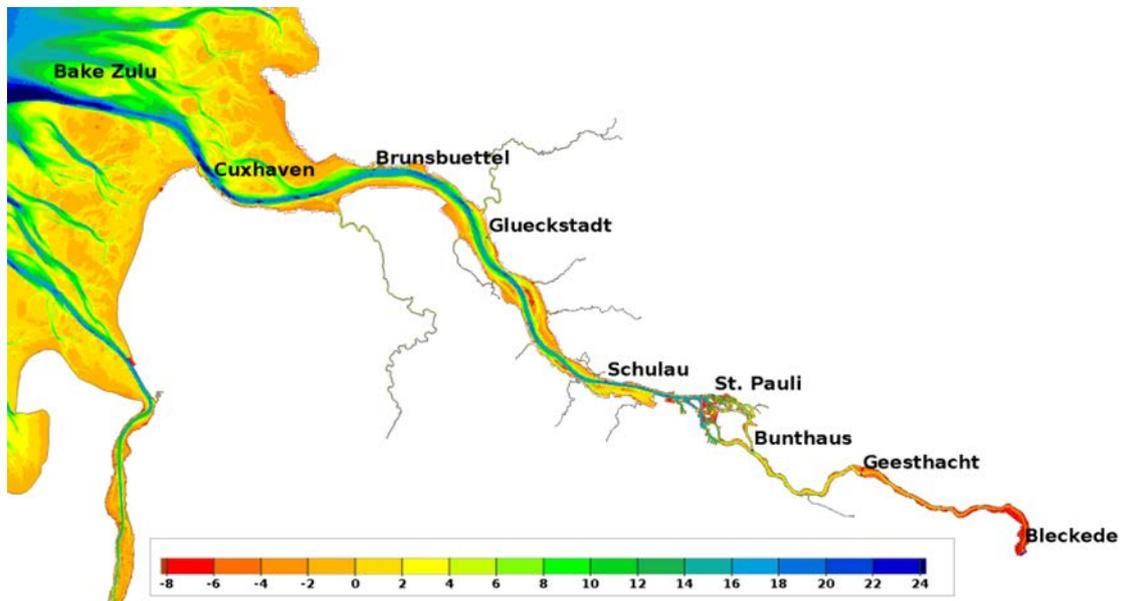


Abbildung C-2: Ausschnitt aus der Topographie des Deutsche Bucht Modells, hier die Elbe von Bake Z bis Bleckede mit ausgewählten Pegelorten.

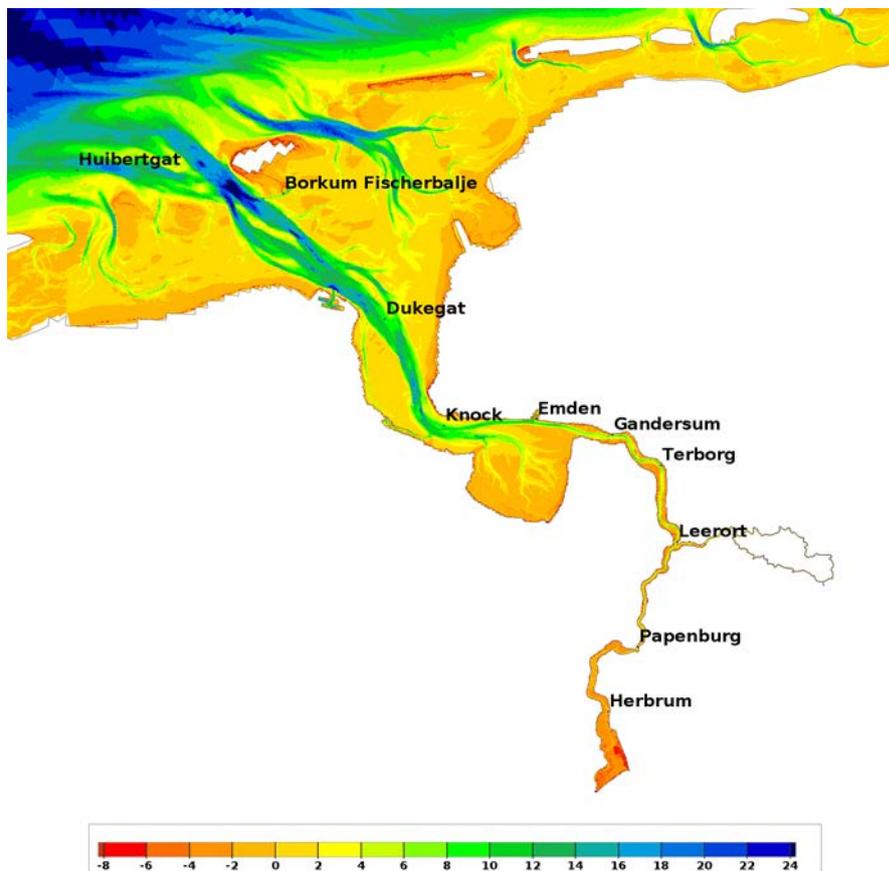


Abbildung C-3: Ausschnitt aus der Topographie des Deutsche Bucht Modells, hier die Ems von Huibertgat bis zum Küstenkanal mit ausgewählten Pegelorten.

Ergebnisse

Wasserstandsentwicklung

Mit dem räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modell der Deutschen Bucht werden die vier genannten extremen Sturmflutereignisse REF, HF_v, SFS und LF mit offenem und mit gesteuertem Emssperrwerk modelliert. Die genannten Sturmflutereignisse werden verstärkt durch einen auf HHQ erhöhten Abfluss aus dem Binnenbereich sowie durch einen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee von 50 cm und 100 cm. Die Wahl des Modellgebietes erlaubt es, das gleiche Sturmflutereignis für Ems und Elbe gleichzeitig zu betrachten und die Auswirkungen des gewählten Sturmflutereignisses zu vergleichen. Für die Referenzflut REF (mit offenem Emssperrwerk) ist der Wasserstandsverlauf für zwei Hafenstädte, Emden im Emsästuar und Hamburg im Elbeästuar (für die Lage der Orte siehe Abbildung C-1) in Abbildung C-4 dargestellt. Die der Referenzflut zugrundeliegende Sturmflut vom 1. November 2006 erreichte in der Ems bei Emden mit NHN + 5,17 m die höchsten Wasserstände seit dem 13. März 1906 (NHN + 5,18 m). Sie wird nach der Klassifikation des BSH als sehr schwere Sturmflut eingeordnet, da der Sturmflutscheitelwasserstand (höchster Wasserstand im Sturmflutzeitraum) mehr als 3,50 m über dem mittleren Tidehochwasser (Emden MThw: NHN + 1,48 m) liegt. Die gleiche meteorologische Situation erzeugt in der Elbe auf Grund der anderen Überlagerung von astronomischer Tide und Windentwicklung lediglich eine schwere Sturmflut mit Wasserständen höher als 2,50 m über MThw (Hamburg St.Pauli MThw: NHN + 2,12 m). Zusätzlich zeigt Abbildung C-4 den Wasserstandsverlauf der Sturmflut REF mit Meeresspiegelanstieg sowie für einen auf HHQ erhöhten Abfluss.

Für das Sturmflutereignis HF_v mit offenem Emssperrwerk ist ebenfalls der Wasserstandsverlauf für Emden im Emsästuar und Hamburg im Elbeästuar in Abbildung C-5 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 deutlich höher als bei mittleren Tiden. HF_v erreicht einen Sturmflutscheitelwasserstand von NHN + 6,36 m in Emden und von NHN + 6,89 m in Hamburg. In beiden Ästuaren 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. Auf Grund der unterschiedlichen Überlagerung von astronomischer Tide und Windentwicklung in Ems und Elbe, erzeugt die gleiche meteorologische Situation in der Ems zwei Sturmflutscheitel mit deutlich unterschiedlicher Höhe und in der Elbe zwei Sturmflutscheitel mit nahezu gleicher Höhe.

Für beide Sturmflutereignisse erkennt man, dass eine Erhöhung des Abflusses auf HHQ die Wasserstände im gesamten dargestellten Zeitraum anhebt. 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 C-3 bzw. Tabelle C-1).

EXTREMENESS-C

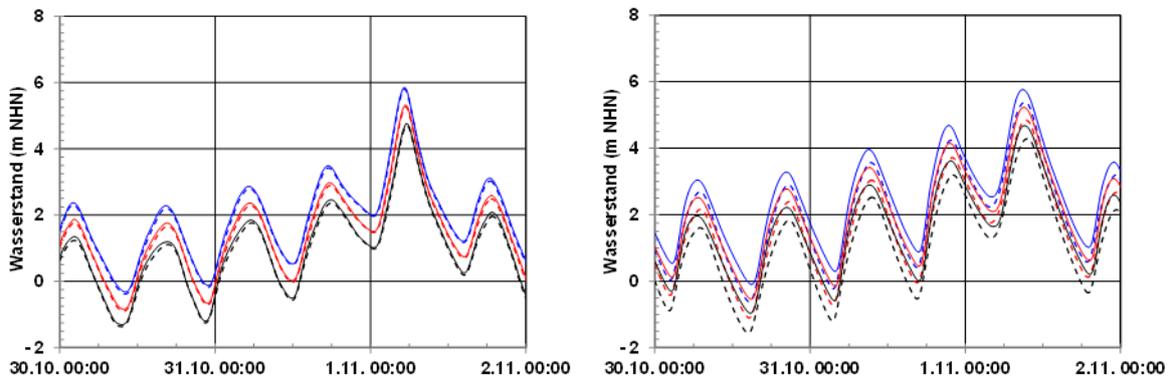


Abbildung C-4: Referenzflut REF: Wasserstandsverlauf bei Emden (Emsästuar, links) und Hamburg St. Pauli (Elbeästuar, rechts) ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (rot) und von 100 cm (blau). Die gestrichelte Linie kennzeichnet gemessenen Abfluss Q, die durchgezogene Linie HHQ.

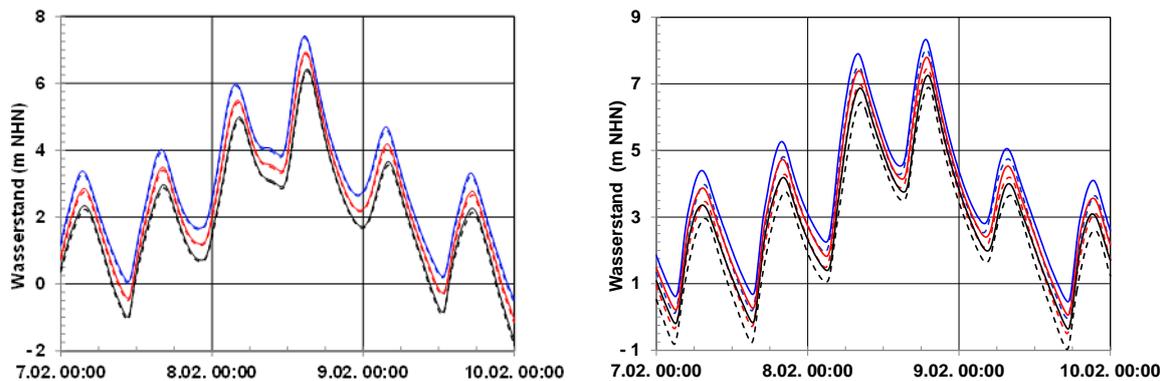


Abbildung C-5: Hohe Flut HF_v: Wasserstandsverlauf bei Emden (Emsästuar, links) und Hamburg St. Pauli (Elbeästuar, rechts) ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (rot) und von 100 cm (blau). Die gestrichelte Linie kennzeichnet mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

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 C-1). Eine Zunahme des Abflusses erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände zusätzlich (Tabelle C-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.

Durch das Steuern, d.h. Schließen des Emssperrwerkes wird die Unterems stromauf von Gandersum vor Sturmfluten mit Wasserständen höher als NHN + 3,70 m geschützt. Abbildung C-6 zeigt den Wasserstandsverlauf zum einen im geschützten Bereich der Unterems bei Leerort zum anderen stromab des Emssperrwerkes im ungeschützten Bereich bei Emden. Zusätzlich ist der Wasserstandsverlauf für einen Meeresspiegelanstieg sowie für einen erhöhten Abfluss abgebildet. Zum Vergleich ist der Wasserstandsverlauf in Grau für geöffnetes Sturmflutsperrwerk ohne Meeresspiegelanstieg eingezeichnet.

EXTREMENESS-C

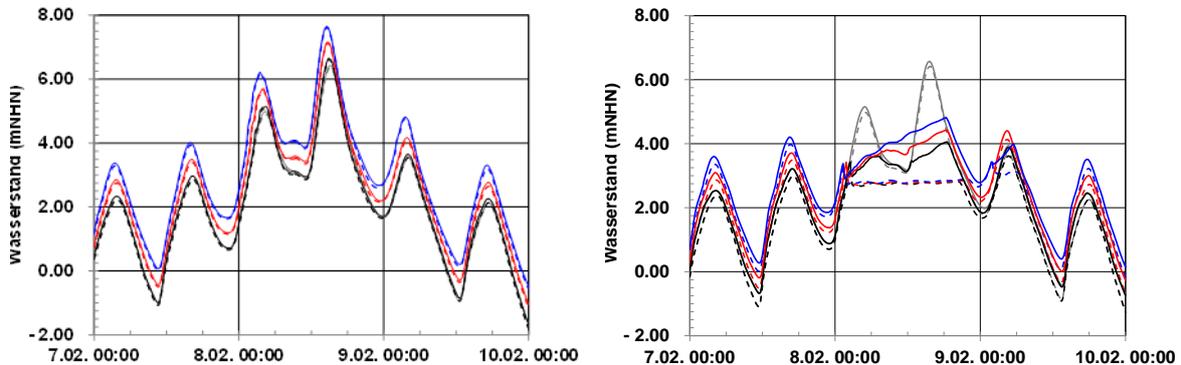


Abbildung C-6: Hohe Flut HF_v mit gesteuertem Emssperrwerk: Wasserstandsverlauf bei Emden (Emsästuar, links) und Leerort (Emsästuar, rechts) ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (rot) und von 100 cm (blau). In Grau ist zum Vergleich der Wasserstandsverlauf bei offenem Emssperrwerk ohne Meeresspiegelanstieg dargestellt. Die gestrichelte Linie kennzeichnet mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

Bei Leerort erkennt man, dass das Schließen des Sperrwerkes im Sturmflutzeitraum zu deutlich niedrigeren Wasserständen in der Unterems führt. Der Wasserstand hängt nun von der Schließdauer und dem Oberwasserzufluss ab. Eine Erhöhung des Abflusses von MQ auf HHQ erhöht die höchsten Wasserstände in der Unterems. Sowohl eine Zunahme des Abflusses als auch der Meeresspiegelanstieg verkürzt die Schließdauer des Sperrwerkes. Die Außenwasserstände werden schneller erreicht.

Der Schließvorgang des Sperrwerkes bei Flutstrom erzeugt eine Sunk- und Schwallwelle. Die Sunkwelle ist im Wasserstandsverlauf bei Leerort zu erkennen. Die Schwallwelle sowie die durch sie ausgelöste Eigenschwingung des Dollarts sind in den Wasserstandszeitreihen bei Emden zu erkennen. Das geschlossene Sperrwerk verkürzt das Emsästuar. Die dadurch veränderte Dissipation und das Reflektionsverhalten des Ästuares bewirkt eine Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände bei Emden um ca. 25 cm (siehe Tabelle C-1).

Tabelle C-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 (Huibertgat) in der Emsmündung und für Hamburg auf Elbe km 758 (Bake Z) in der Elbemündung. Zusätzlich ist das HHThw (höchster beobachteter Wasserstand) für Emden (13. März 1906, DGJ 2018) und Hamburg (3. Januar 1976, DGJ 2015) eingetragen.

	Emden (Ems km 40)		Emden (Ems km 40)		Hamburg (Elbe km 623N)	
	Emssperrwerk offen		Emssperrwerk gesteuert			
	HW	THW	HW	THW	HW	THW
	m NHN	Minuten	m NHN	Minuten	m NHN	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	-

EXTREMENESS-C

Eine Erhöhung des Abflusses führt in Emden und Hamburg zu einer geringfügigen Veränderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes THW (Tabelle C-1). 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 C-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.

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 dieser Orte siehe Abbildungen C-2 und C-3), in Abbildung C-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 dieses Sturmflutereignis nach der Klassifikation des BSH eine sehr schwere Sturmflut, da die Sturmflutscheitelwasserstände mehr als 3,50 m über dem MThw (z. B. MThw Knock NHN + 1,39 m, MThw 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.

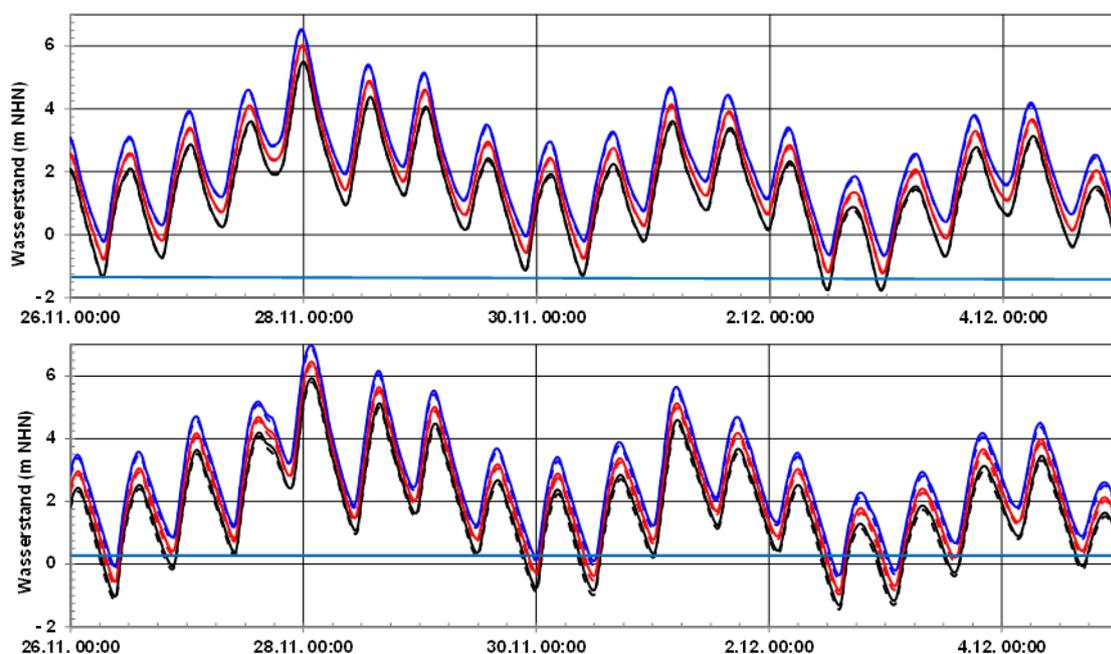


Abbildung C-7: Lange Flut/Sturmflutserie LF/SFS: Wasserstandsverlauf bei Knock (Emsästuar, oben) und Brunsbüttel (Elbeästuar, unten) ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm (rot) und 100 cm (blau). Die gestrichelte Linie kennzeichnet MQ, die durchgezogene Linie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

Anhand der Sturmflutserie kann auch auf mögliche Veränderungen bei der Entwässerung der eingedeichten Niederungsgebiete entlang der Nordseeküste hingewiesen werden. Die tiefliegenden Gebiete im Bereich von Elbe und Ems werden über Siele und Pumpwerke entwässert.

Das Knockster Siele entwässert das vor allem landwirtschaftlich genutzte Hinterland und hält den Binnenwasserstand bei Knock auf NHN – 1,40 m. Mit einem MTnw 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. Während der Sturmflutserie SFS (Abbildung C-7 oben) muss auch ohne Verstärkung durch einen Meeresspiegelanstieg fast im gesamten Zeitraum von 176 Stunden 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 dieser Zeitraum mit Wasserständen höher als NHN – 1,40 m um 20 Stunden, bei einem Meeresspiegelanstieg von 100 cm um 40 Stunden (siehe Tabelle C-2).

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 (Ganske et al. 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 C-7 unten) liegt der Wasserstand in der Elbe bei Brunsbüttel ca. 24 Stunden unter NHN + 0,25 m. In diesem Zeitraum ist 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.

Tabelle C-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	≥ NHN + 0,25 m
	Stunden	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

Bedeutung von Abfluss und Meeresspiegelanstieg für den Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Ästuarie von Ems und Elbe

Die Bedeutung einer Abflusserhöhung sowie eines Meeresspiegelanstieges für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände HW im Ems- und Elbeästuar wird auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte von Ems und Elbe analysiert. Abbildung C-8 zeigt für die Sturmflutereignisse REF, HF_v und LF/SFS den Sturmflutscheitelwasserstand bei heutigem Meeresspiegel sowie bei einem

EXTREMENESS-C

Meeresspiegelanstieg von 50 cm bzw. 100 cm jeweils in Kombination mit dem gemessenen Abfluss (REF) bzw. MQ (LF/SFS und HF_v) und HHQ.

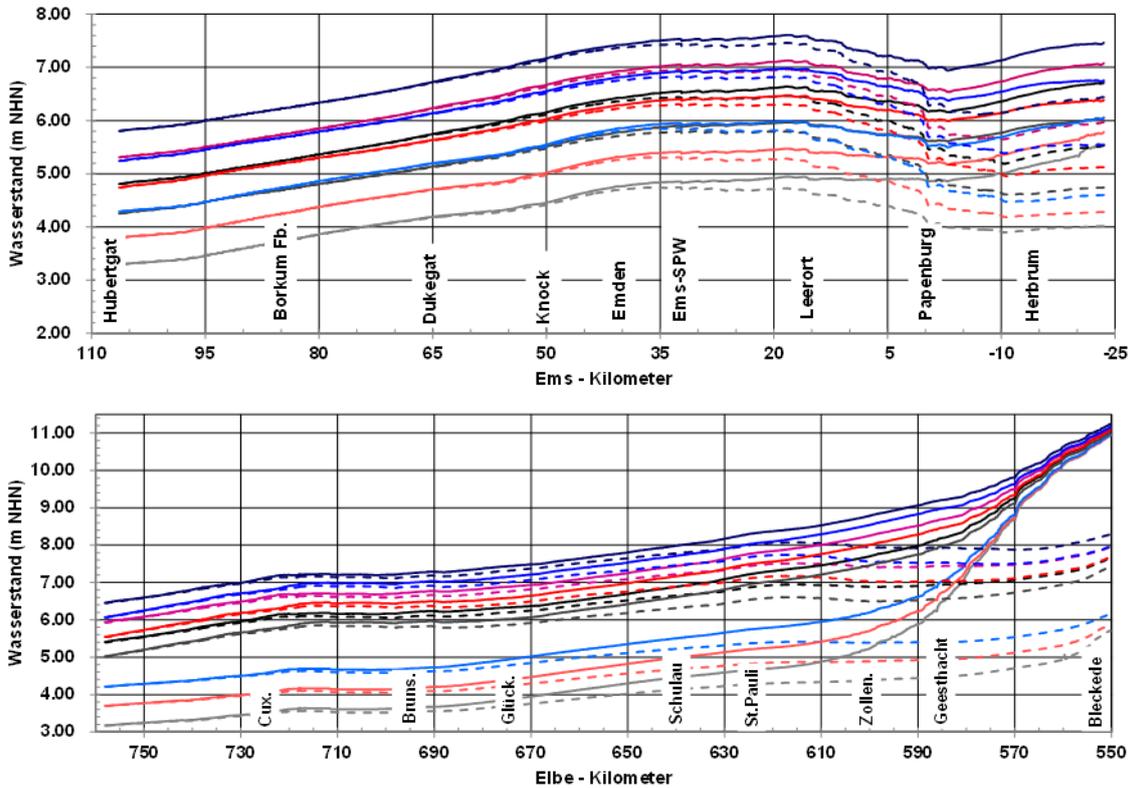


Abbildung C-8: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Emsästuares (oben) und des Elbeästuares (unten) für die Sturmflutereignisse REF (hellgrau), LF/SFS (rosa) und HF_v (hellblau). Ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm ist in grau (REF), rot (LF/SFS) bzw. blau (HF_v) gekennzeichnet. Ein Meeresspiegelanstieg von 100 cm ist in schwarz (REF), violett (LF/SFS) bzw. dunkelblau (HF_v) gekennzeichnet. Die gestrichelte Linie kennzeichnet gemessenen Abfluss (REF) bzw. MQ (LF/SFS und HF_v), die durchgezogene Linie HHQ.

Sowohl in der Ems als auch in der Elbe erhöht ein Meeresspiegelanstieg die Sturmflutscheitelwasserstände bis tief in das Ästuar hinein. Die Sturmflutscheitelwasserstände erhöhen sich um einen Betrag in der Größenordnung des Meeresspiegelanstieges. Abbildung C-9 zeigt die Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes aufgrund eines Meeresspiegelanstieges entlang der Ästuar von Ems und Elbe für die Sturmflutereignisse REF, HF_v und LF/SFS. Zwischen der Ästuarmündung und Leerort in der Ems bzw. 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 Ästuar von Ems (stromauf von Papenburg) und Elbe (stromauf von Zollenspieker) bei den betrachteten Sturmflutereignissen zu einer Erhöhung von HW um mehrere Dezimeter (Abbildung C-8). In beiden Ästuaren 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.

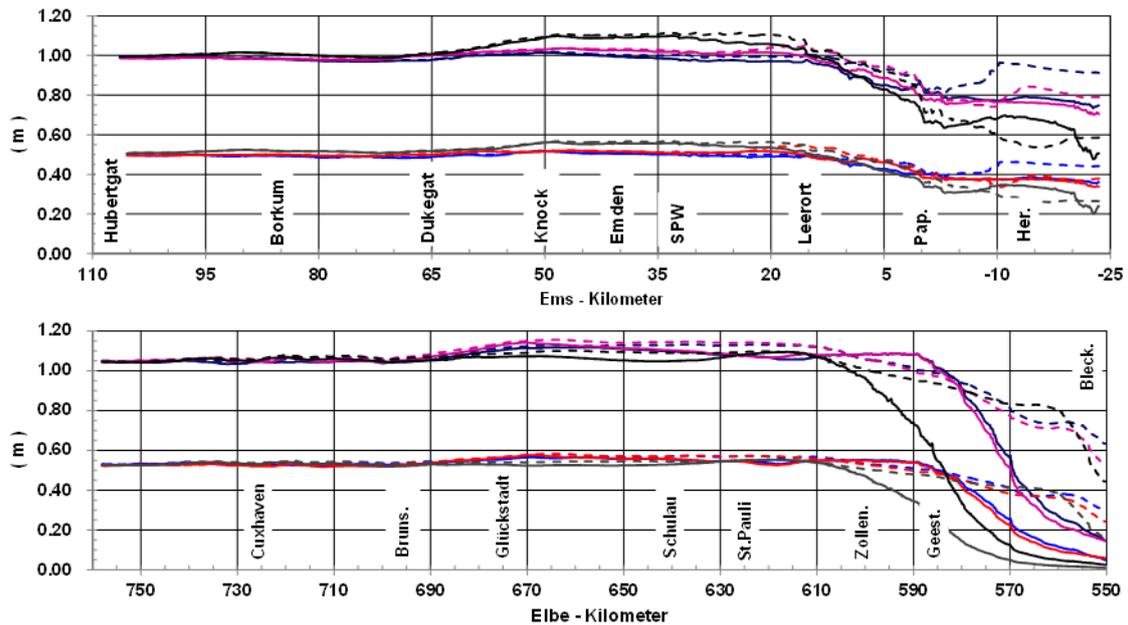


Abbildung C-9: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes REF, HF_v und LF/SFS entlang des Emsästuares (oben) und des Elbeästuares (unten) auf Grund eines Meeresspiegelanstieges von 100 cm (REF in Schwarz, LF/SFS in Dunkelblau, LF/SFS in Violett) und 50 cm (REF in grau, LF/SFS in Blau, LF/SFS in Rot). Die gestrichelte Linie kennzeichnet gemessenen (REF) bzw. mittleren Abfluss MQ, die durchgezogene Linie HHQ.

Der Vergleich der Sturmflutscheitelwasserstände der Hohen Flut HF_v mit den höchsten beobachteten Wasserständen HHThw (siehe Tabelle C-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 darunterbleibt (NHN + 8,10 m, FHH 2013).

Das Emsästuar ist bereits heute durch ein Sturmflutsperrwerk bei Gandersum vor Sturmfluten geschützt. Das geschlossene Sperrwerk trennt die Unterems von der Außenems, sodass der Einfluss der Sturmfluten nur bis zum Sperrwerk reicht. Abbildung C-10 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Emsästuares für 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.

Im Emdener Fahrwasser sind für die Sturmfluten REF, HF_v und LF/SFS die Sturmflutscheitelwasserstände bei gesteuertem Sperrwerk ca. 20 cm höher als bei offenem Sperrwerk (vergleiche HW in Abbildung C-8 oben mit HW in Abbildung C-10, bzw. siehe Tabelle C-1). Das geschlossene Sperrwerk verkürzt bei Sturmflut das Emsästuar und verändert somit die Dissipation und auch das Reflektionsverhalten des Ästuares. Eine zusätzliche Erhöhung der HW kann durch die beim Schließen bei Flutstrom entstehende Sunk- und Schwallwelle entstehen. Die Schwallwelle kann den Dollart zu einer Eigenschwingung anregen,

die eine zusätzliche kurzzeitige Erhöhung der Wasserstände erzeugt. Eine detaillierte Beschreibung der Wasserstandsentwicklung beim Steuern des Emssperrwerkes gibt BAW (2007).

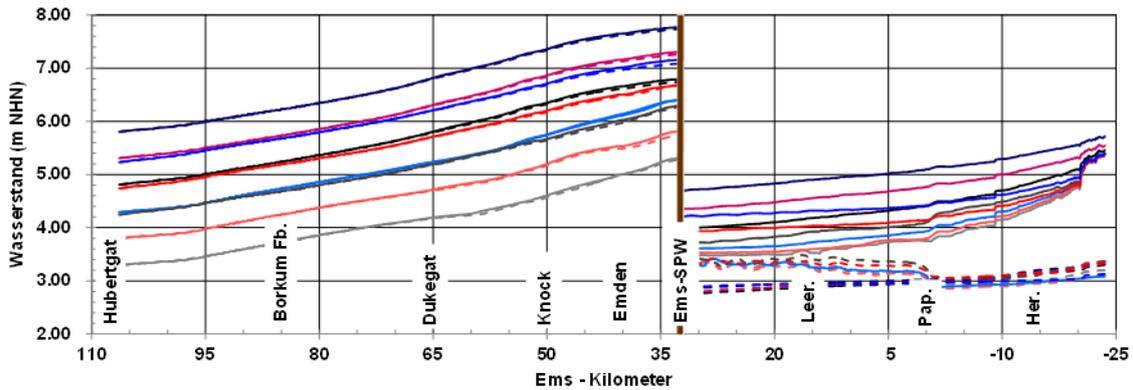


Abbildung C-10: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Emsästuares für die Sturmflutereignisse REF (hellgrau), LF/SFS (rosa) und HF_v (hellblau). Ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm ist in grau (REF), rot (LF/SFS) bzw. blau (HF_v) gekennzeichnet. Ein Meeresspiegelanstieg von 100 cm ist in schwarz (REF), violett (LF/SFS) bzw. dunkelblau (HF_v) gekennzeichnet. Die gestrichelte Linie kennzeichnet gemessenen Abfluss (REF) bzw. MQ (LF/SFS und HF_v), die durchgezogene Linie HHQ. Die Lage des Emssperrwerkes ist durch die braune Linie markiert.

Zusammenfassung

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 verbunden sein könnten. Für die Sturmflutereignisse Referenzflut REF, Hohe Flut HF_v mit dem höchsten Wasserstand, Sturmflutserie SFS mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche und Lange Flut LF mit der längsten Dauer von Wasserständen über dem mittleren Tidehochwasser bei Borkum werden weitere mögliche Verstärkungen untersucht. Hierfür wird eine Erhöhung des Abflusses aus dem Binnenbereich von MQ auf HHQ sowie ein Meeresspiegelanstieg von 50 cm und 100 cm in der Nordsee betrachtet.

Eine Erhöhung des Abflusses aus dem Binnenbereich von MQ auf HHQ erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände im mittleren Bereich der Ästuares um einige Zentimeter und im oberen Bereich der Ästuares um einige Dezimeter. Ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee erhöht dagegen die Sturmflutscheitelwasserstände bis tief in die Ästuares von Ems (bei offenem Emssperrwerk) und Elbe hinein um den Wert des angenommenen Meeresspiegelanstieges, d. h. hier um 50 cm bzw. 100 cm. Im oberen Teil der Ästuares nimmt der Einfluss des Meeresspiegelanstieges 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 Wasserstandsentwicklung während der Sturmflutserie SFS bei Knock im Emsästuar und Brunsbüttel im Elbeästuar zeigt zusätzlich, 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. Eine Sturmflutserie in Kombination mit einem Meeresspiegelanstieg führt zu einer weiteren Verschärfung der bereits heute bestehenden Entwässerungsproblematik der eingedeichten tiefliegenden norddeutschen Niederungsgebiete.

Die Ergebnisse aus den betrachteten Sturmflutereignissen REF, HF_v und LF/SFS sowie aus den untersuchten Verstärkungen durch eine Erhöhung des Abflusses und einen Meeresspiegelanstieg wurden in Form von Wasserstandszeitreihen entlang des Küstenabschnittes zwischen Dukegat und dem Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum an den Projektpartner EXTREMENESS-D weitergegeben. Diese Wasserstandsverläufe aus Extremereignissen dienen in EXTREMENESS-D und EXTREMENESS-E zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Küstenschutz und das Küstenschutzmanagement in der Region Emden.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen die Kosten für das wissenschaftliche Personal sowie Reisekosten zu Projekttreffen. Einzelheiten sind im detaillierten Verwendungsnachweis dargestellt. Es haben sich gegenüber dem Antrag keine wesentlichen Änderungen ergeben.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In EXTREMENESS-C wurden die Arbeitsschritte Aufbereitung der aus EXTREMENESS-A und EXTREMENESS-B bereitgestellten Randwerte, Modellierung der ausgewählten extremen Sturmflutereignisse in der Deutschen Bucht und den Ästuaren von Ems und Elbe sowie zusätzliche Verstärkungen durch Abfluss und Meeresspiegelanstieg, die Analyse der Modellergebnisse, die Weitergabe der Ergebnisse an EXTREMENESS-D wie beantragt durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf Konferenzen und in wissenschaftlichen Veröffentlichungen (eingereicht) präsentiert.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Um mögliche mit einer Klimaänderung verbundene Betroffenheiten für die Ästuare von Ems und Elbe zu identifizieren und Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können, ist es wichtig, die zukünftigen Bedingungen unter dem Einfluss eines sich ändernden Klimas zu verstehen und zu analysieren. Die Projektergebnisse, sowohl zusammengefasste Erkenntnisse als auch analysierte Modellergebnisse, werden ein Beitrag sein, heutige Küstenschutzkonzepte in den Ästuaren vor dem Hintergrund der Veränderungen durch den Klimawandel zu überprüfen und gegebenenfalls frühzeitig neue Schutzkonzepte zu entwickeln.

Die Ergebnisse aus EXTREMENESS werden durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und auf Tagungen dem Fachpublikum zu Verfügung gestellt.

Fortschritt bei anderen Stellen

Es sind derzeit keine FE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind. Neue Erkenntnisse zur Veränderungen in der Entwicklung des Meeresspiegelanstieges oder des Niederschlages in den Einzugsgebieten von Elbe, Weser oder Ems auf Grund des Klimawandels können dazu führen, die Bandbreite möglicher Verstärkungen neu zu bestimmen und z. B. die Auswirkungen weiter Meeresspiegelanstiegsszenarien zu betrachten.

EXTREMENESS-C

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Rudolph; E., Brodhagen, T., 2017: EXTREMENESS-C - First steps towards a UnTRIM2 model of the German Bight for storm surge investigations. 14th International UnTRIM Users Workshop. 15.-17. Mai 2017. Trento, Italien. Vortrag.

Rudolph; E., Brodhagen, T., 2019: EXTREMENESS-C - Extreme North Sea storm surges and their impact on the Ems estuary. 16th International UnTRIM Users Workshop. 13.-15. Mai 2019. Trento, Italien. Vortrag.

Rudolph, E., Brodhagen, T., 2019: EXTREMENESS-C: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Ems und Elbe und mögliche Verstärkung. 24. KFKI Seminar. 21. November 2019. Hamburg

Brodhagen, T., 2018: Influence of sea level rise on highest water levels during storm surges in the Ems estuary. Sea Level Futures Conference. 2. - 4. Juli 2018 University of Liverpool, Liverpool, UK, Poster. (https://conference.noc.ac.uk/sites/conference.noc.ac.uk/files/documents/Poster_Sea_Level_Futures_Conference_Brodhagen.pdf)

Grabemann, I., Gaslikova, L., Brodhagen, T., Rudolph, E., 2020: Very severe storm tides in the German Bight (North Sea) and their potential for enhancement. Natural Hazards and Earth System Sciences. Eingereicht Dezember 2019.

Rudolph, E., Brodhagen, T., Fery, N., Gaslikova, L., Grabemann, I., Meyer, E., Möller, T., Tinz, B., Weisse, R., 2020: Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung. Die Küste. Eingereicht Dezember 2019.

LITERATURVERZEICHNIS

s. gemeinsames Literaturverzeichnis.

EXTREMENESS-D

Analyse möglicher Auswirkungen extremer Sturmfluten

ZE: Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (FWU) der Universität Siegen	Förderkennzeichen: 03F0758B
Vorhabenbezeichnung: Analyse möglicher Auswirkungen extremer Sturmfluten	
Laufzeit des Vorhabens: 10/2016 - 09/2019	
Verfasser: Marius Ulm M.SC., Dr.-Ing. Arne Arns, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen	

KURZDARSTELLUNG

Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten schwerer Sturmfluten sowie möglicher Änderungen im Zuge des anthropogenen Klimawandels sind für den Küstenschutz von großer Bedeutung. Im Gegensatz zu bisher existierenden Untersuchungen, die sich typischerweise mit hohen Perzentilen oder Wiederkehrwerten und deren Änderungen beschäftigen, sollen im Projekt EXTREMENESS Ereignisse untersucht werden, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich, aber potentiell mit extremen Konsequenzen verbunden sind. Dazu werden zunächst mit verschiedenen Methoden aus einer Vielzahl existierender Beobachtungsdaten, Reanalysen und Klimaszenarienrechnungen extreme Sturmflutereignisse und zugehörige meteorologische Bedingungen identifiziert/selektiert. Anschließend wird mit Hilfe von Modellstudien untersucht, inwieweit diese Ereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch extremeren Sturmfluten hätten führen können. Dabei werden z. B. Effekte des Meeresspiegelanstiegs oder der Tatsache, dass der zeitliche Ablauf eines Sturms unabhängig von der Tidephase ist, berücksichtigt. Mit regionalen Stakeholdern der Stadt Emden wird anschließend eine transdisziplinäre reflexive Bewertung für die extremsten Fälle durchgeführt, wobei Konsequenzen bei unterstelltem Versagen von Schutzanlagen beispielhaft untersucht und in einem sozialwissenschaftlich begleiteten Diskussionsprozess mit Entscheidungsträgern hinsichtlich ihrer regionalen Auswirkungen und möglicher Anpassungsmaßnahmen bewertet werden.

Im Teilprojekt EXTREMENESS-D wurde das Arbeitspaket 3 (AP 3) des Verbundprojekts EXTREMENESS bearbeitet. Übergeordnetes Ziel des Arbeitspaketes ist die Analyse möglicher Auswirkungen extremer Nordseesturmfluten. Als Untersuchungsgebiet wurde während der Projektbeantragung die

niedersächsische, kreisfreie Stadt Emden und die angrenzende Region Krummhörn (westlicher Landkreis Aurich) ausgewählt und als Projektpartner gewonnen.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Eine generelle Herausforderung bei hydrodynamisch-numerischen Simulationen und darauf aufbauenden Schadensbetrachtungen ist der Umgang mit Unsicherheiten. Jeder einzelne Schritt dieser Modellkette, von der zur Verfügung stehenden Geländegeometrie, über die Berechnung der Wassertiefen, bis hin zur Schadensberechnung, enthält Unsicherheiten aufgrund von Annahmen und Vereinfachungen. Deutlich robuster sind hingegen relative Betrachtungen, bei denen nur der Unterschied der Schäden zwischen zwei Szenarien betrachtet werden. Da die Unsicherheiten der grundlegenden Annahmen gleichbleiben, heben sich deren Auswirkungen auf das Ergebnis in der Vergleichsbetrachtung auf. Für die Abschätzung der Konsequenzen wurden deshalb relative Betrachtungen der Schadenspotenziale vorgenommen.

Die vorangegangenen Analysen der Teilprojekte (TP) A und B liefern für die Überflutungssimulationen und die darauf aufbauenden Schadenspotenzialanalysen der einzelnen Vergleichsszenarien die benötigten meteorologischen Randbedingungen im Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee. In TP C wurden mithilfe dieser Randbedingungen die zu erwartenden Sturmflutwasserstände entlang der deutschen Nordseeküste und in den Ästuaren simuliert. Die Wasserstände im Emsästuar wurden schließlich als Ausgangssituation für detaillierte Überflutungssimulationen verwendet. Bei den ersten Auswertungen zeigt sich, dass die höchsten zu erwartenden Wasserstände noch unterhalb der Deichkronenhöhe bleiben und dementsprechend ein großflächiges Überströmen der Deiche nicht zu erwarten ist (vgl. TP C). Aufgrund dessen wurde eine Herangehensweise gewählt, die es dennoch erlaubt, potenzielle Überflutungsflächen zu ermitteln und die zugehörigen Konsequenzen abzuschätzen.

In Anlehnung an die niederländische Vorgehensweise zur Ermittlung des Überflutungsrisikos (vgl. z. B. Jongejan und Maaskant 2015) wird die Deichlinie des Untersuchungsgebiets zunächst in Abschnitte gegliedert, für die jeweils separat ein Versagen des Bauwerkes (hier Bruch) angenommen werden kann. Hierdurch lässt sich der Einfluss der Bruchstelle auf das Schadenspotenzial quantifizieren. Für die Modellregion wurden insgesamt 20 Abschnitte mit einer mittleren Länge von 2 km differenziert. Für jeden dieser Abschnitte wird somit eine Simulation der sich einstellenden Überflutungsflächen durchgeführt, wobei für alle Abschnitte die gleiche Breschen-Geometrie gewählt wurde. Für diese „Einheitsbresche“ wurden Annahmen auf Basis von Beobachtungen während und nach der Sturmflut im Jahr 1962 getroffen (Kramer et al. 1962). Die Einheitsbresche öffnet die Deichlinie trapezförmig. Am Deichfuß beträgt die Öffnungsweite 90 m, an der Deichkrone 150 m. Eine Entwicklung der Bresche über die Zeit wurde vernachlässigt, sodass die Öffnung der Deichlinie im Modell plötzlich und vollständig erfolgt. Die Ergebnisse der anschließenden Überflutungssimulationen liegen dadurch auf der sicheren Seite und die Unsicherheiten werden nicht durch weitere Annahmen (Erosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Parametern wie Bodenart, -schichtung, -feuchte usw.) vergrößert. Die Überflutungsflächen wurden schließlich für jede Bruchstelle mit Hilfe eines zweidimensional hydrodynamisch-numerischen Modells berechnet und zur weiteren Analyse in ein Geoinformationssystem übertragen. Anschließend wurden Schadenspotenzialanalysen durchgeführt, bei denen aus den Überflutungsflächen und der Landnutzung die durch das einströmende Wasser entstehenden Schäden abgeschätzt wurden. Diese Schadenspotenzialanalysen führen schließlich zur

Bewertung der einzelnen Deichabschnitte hinsichtlich der jeweils geschützten Werte und zur Abschätzung zur Schwere der extremen Sturmflutszenarien.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Teilprojekt EXTREMENESS-D wurde das Arbeitspaket 3 (AP 3) des Verbundprojekts EXTREMENESS bearbeitet (s. Anhang). AP 3 "Analyse möglicher Auswirkungen" (High Impact Events) hatte zum Ziel, aus den bisher analysierten extremen Sturmtiden jene zu selektieren, die zwar extrem unwahrscheinlich aber dafür potentiell mit extremen Auswirkungen und Konsequenzen verbunden sind („schwarze Schwäne“). Die Methoden wurden exemplarisch für den Raum Emden und das Emsästuar entwickelt und getestet. Im Einzelnen hat das FWU dazu eine Analyse der potentiellen Auswirkungen vorgenommen, die sich infolge des Versagens einzelner Küstenschutzanlagen in der Region und den daraus resultierenden Überflutungen ergeben würden. Zur Bewertung der Auswirkungen hat das FWU ein entsprechendes hydrodynamisches Modell aufgesetzt, getestet und validiert (Aufgabe 3.1). Die Auswahl der zu betrachtenden Versagensfälle erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Kooperationsforum, der wissenschaftlichen Projektberatungsgruppe sowie den Projektpartnern (Aufgabe 3.2). Anschließend wurden für die von AP 2 bereitgestellten Fälle einzelne Hydrographen extrahiert und verwendet, um mit dem hydrodynamischen Modell die entsprechenden Überflutungsrechnungen bei unterstelltem Versagen durchzuführen (Aufgabe 3.3). Basierend auf verschiedenen Versagensmechanismen wurden danach unter Annahme stationärer Bedingungen Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt. Für die Fälle mit den potentiell größten Auswirkungen wurden abschließend Wiederkehrintervalle unter gegenwärtigen klimatischen Bedingungen sowie unter Berücksichtigung möglicher Veränderungen im Zuge des anthropogenen Klimawandels betrachtet (Aufgabe 3.4). Das Endergebnis von AP 3 ist damit eine Auswahl von potentiell möglichen, physikalisch plausiblen Sturmflutverläufen in der Region Emden, die extrem unwahrscheinlich sind aber mit extremen Konsequenzen verbunden wären. Für diese Fälle und in Iteration mit AP 4 und dem Kooperationsforum wurden die für AP 4 relevanten Informationen letztlich in Form leicht zugänglicher und verständlicher Karten aufbereitet. Diese enthalten von einer Überflutung aufgrund unterschiedlicher Deichbruchszenarien betroffene Flächen und Schäden oder Dauern über spezifizierte Zeiträume enthalten (Aufgabe 3.5).

Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen in der Modellregion ist die Abschätzung und Auswertung potenzieller Konsequenzen extremer Nordseesturmfluten im Rahmen einer Risikoanalyse. Aufgrund der Multi-Risiko-Situation in der Region Emden-Krummhörn sind detaillierte Untersuchungen erforderlich, um das Schadenspotenzial zu erfassen und mögliche Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Im Rahmen anderer Forschungsprojekte wurden in der Modellregion bereits Untersuchungen zum Entwässerungsmanagement (Projekt KLEVER; Bormann et al. 2018), zur drohenden Grundwasserversalzung (Projekt SALTSA; Karrasch und Schaper 2016) und zur nachhaltigen Landnutzung (Projekt COMTESS; Förster et al. 2015) durchgeführt. Die Betrachtung extremer Sturmfluten als weiterer Gefahrenquelle rundet diese bereits durchgeführten Untersuchungen mit Blick auf die seeseitige Belastung der Region ab.

Besonders für den Küsten- und den Katastrophenschutz sind Informationen über potenzielle Auswirkungen von Sturmfluten wichtig, um auch auf unwahrscheinliche, aber mögliche Ereignisse vorbereitet zu sein. Darüber hinaus bieten die Auswertungen eine Grundlage für die Risikobewertung im Rahmen der Workshops und die Diskussion über den Umgang mit den Risiken.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Über die entsprechend im Zeitplan vorgesehenen Arbeiten hinaus wurden zudem die aus dem Projekt heraus entstandenen Kontakte zum Katastrophenschutz der Stadt Emden genutzt und eine Katastrophenschutzübung vor Ort wissenschaftlich begleitet und unterstützt.

Am 05. Dezember 2018 fand eine Übung der Stadt Emden statt. Die eintägige Übung erfolgte im Lagezentrum der Feuerwehrtechnischen Zentrale der Stadt Emden. Im Vorfeld dieser Übung wurden Wissenschaftler der Universitäten Hamburg und Siegen eingeladen, beobachtend und unterstützend daran teilzunehmen. Ziel der Übung war, die Stabsarbeit im Katastrophenschutz zu trainieren und dabei Erfahrungen zu sammeln, wie diese Arbeit zukünftig noch verbessert werden kann.

Das Übungsszenario war ein realistisches Versagensszenario, bei dem mehrere Gebiete in Emden und Umgebung infolge einer schweren Sturmflut, einer ungünstigen Westwind-Wetterlage und mehrerer verketteter Versagensereignisse (z.B. die Öffnung eines Deichscharts mit einer Reihe von nachfolgenden und miteinander wechselwirkenden Katastrophen- und Überflutungsereignissen) zur Überflutungen in der Stadt und Region Emden führte. Den Rahmen bildete eine fiktive Sturmflutsituation mit einem Scheitelwasserstand von 6,50 m ü. NHN, der sich am HIGH-Szenario des Projekts orientierte. Auf Anfrage der Stadt Emden wurden am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen für das Übungsszenario ergänzende Simulationen durchgeführt. Dabei wurde ein (im Vergleich zu den angenommenen Deichbrüchen im Projekt) Schaden an einem Hochwasserschutzelement angenommen und die daraus resultierende Überflutung simuliert. Die Überflutungssimulationen und Versagenskarten standen der Übungsleitung während der Übung zur Verfügung. In enger Abstimmung wurde das Szenario so aufbereitet, dass der übende Krisenstab nach und nach mit neuen Informationen zur Schadenslage versorgt werden konnte. Auch noch im Laufe der Übung wurde der Ablauf so angepasst, dass der Krisenstab immer aufgefordert war auf neue Situationen zu reagieren. Wissenschaftler der Uni Hamburg konnten die Übung als „Realexperiment“ für weitere sozialwissenschaftliche Forschungen nutzen: die Übung wurden offen teilnehmend beobachtet und Mitglieder wurden in einer qualitativen Kurzbefragung zum Thema „Sturmfluten bei Nacht“ befragt. Die Kurzinterviews wurden aufgezeichnet, analysiert und für nachfolgende Publikationen ausgewertet.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Nachfolgend sind nur die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Eine eingehende Darstellung der Ergebnisse findet sich in dem Fachbeitrag für „Die Küste“.

Die in Vorhaben EXTREMENESS-D gemeinsam mit den Projekt- und Praxispartnern durchgeführten Untersuchungen zu bislang unbeobachteten aber physikalisch möglichen Sturmfluten ergaben wichtige Erkenntnisse für den Deichbau und Katastrophenschutz in der Modellregion Emden-Krummhörn.

Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die Deiche in der Modellregion bereits ein sehr hohes Schutzniveau bereitstellen. Die extremen Sturmfluten, auch das höchste betrachtete Szenario, führen zu Wasserständen am Deich, die noch unterhalb der Deichkronenhöhe liegen. Lediglich ein weniger hoch ausgebauter Bereich am Emdener Außenhafen wird beim höchsten Szenario überströmt, was jedoch nur zu lokal

begrenzten Überflutungen führen würde. Die Region ist deshalb insgesamt sehr gut gegen Sturmfluten geschützt.

Für die weitere Betrachtung im Projekt wurden deshalb Deichbruchszenarien angenommen, um der Frage „Was passiert, wenn?“ nachzugehen. Dabei zeigt sich, dass die schwerste, beobachtete Sturmflut der vergangenen Jahrzehnte (Referenz-Szenario) im Falle eines Deichbruchs zu nicht unerheblichen Schäden geführt hätte. Im Vergleich der möglichen Schäden wird deutlich, dass die zwei extremsten Sturmflutszenarien zu einer Verdreifachung respektive Verdopplung der Schäden, bezogen auf das Referenz-Szenario, führen würden. Eine Vergrößerung der Sturmflutwasserstände um einige Dezimeter führt somit zu einem deutlich vergrößerten Schadenspotenzial. Hinsichtlich des Klimawandels und des damit einhergehenden Meeresspiegelanstiegs bedeutet dies, dass Sturmfluten, die in der Schwere vergleichbar mit dem Referenz-Szenario sind, bei einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Zukunft ein größeres Schadenspotenzial aufweisen als heutzutage. Für das Referenz-Szenario an zeigt sich beispielsweise an einer im Projektverlauf intensiv untersuchten Deichbruchstelle, dass die gleiche Sturmflut bei einem angenommenen Anstieg des mittleren Meeresspiegels um 100 cm ca. 1,7-fach größere Fläche überfluten würde und zu einer Verdopplung der Schäden führen würde. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch an den weiteren untersuchten Deichbruchstellen. Zu berücksichtigen ist dabei insgesamt jedoch, dass sämtliche Schadensabschätzungen auf der heutigen Landnutzung basieren. Zukünftig entstehende Wohn- oder Industriegebiete vergrößern das Schadenspotenzial, konnten jedoch in der aktuellen Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Eine regelmäßige Abschätzung der Schadenspotenziale mit aktualisierten Landnutzungs- und Schadensdaten kann helfen, diese zeitlichen Veränderungen zu beobachten und den Küsten- bzw. Katastrophenschutz an diese neuen Anforderungen anzupassen.

Aus Diskussionen im Rahmen der Workshops und dem dabei eingebrachten lokalen Fachwissen der Interessensvertreter aus der Region Emden-Krummhörn konnten neuralgische Punkte im Emdener Hafengebiet identifiziert werden, die im Falle einer Überflutung zu regionalen und zum Teil überregionalen Beeinträchtigungen des alltäglichen Lebens führen. Für den Katastrophenschutz bieten diese Erkenntnisse wichtige Anhaltspunkte für zukünftige Managementstrategien. Die zuständigen Verbände und Behörden haben darüber hinaus auf Basis der Untersuchungen die Möglichkeit einzelne Deichabschnitte bei Unterhaltung und Erneuerung besonders zu berücksichtigen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen die Kosten für das wissenschaftliche Personal sowie Reisekosten zu den Projekttreffen. Einzelheiten sind im detaillierten Verwendungsnachweis dargestellt. Es haben sich gegenüber dem Antrag keine wesentlichen Änderungen ergeben.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Sturmfluthöhen und -häufigkeiten sowie Versagenszustände werden benötigt, um das daraus resultierende Risiko berechnen zu können. Hiermit lassen sich erhöhte Risikobereiche identifizieren und Küstenschutzsysteme wirtschaftlich und effizient planen. Die Ergebnisse des Vorhabens sind daher von hohem Interesse für die Verwendung im Rahmen der mittel- bis langfristigen Küstenschutzplanung und dem zielgerichteten Einsatz von Ressourcen. Die Ergebnisse des Vorhabens EXTREMENESS-D liefern zudem einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag zur Abschätzung potentiell möglicher

Sturmfluthöhen und Verläufe. Die Untersuchungen werden an einem lokalen Fallbeispiel durchgeführt, jedoch vergleichend in einen überregionalen und globalen Kontext gestellt. Hierdurch lassen sich regionale Unterschiede und zugrundeliegende Prozesse identifizieren. Die Erkenntnisse des Vorhabens leisten weiterhin einen Beitrag zum besseren Prozessverständnis des Gesamtsystems Nordsee und dienen gleichzeitig zur Abschätzung potentiell zukünftiger Zustände und Ereignisse.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt ermittelten Extremwasserstände sowie einige der Überflutungssimulationen wurden bereits vom Katastrophenschutz der Stadt Emden aus Ausgangspunkt für eine Übung genutzt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse den Interessensvertretern der Region Emden-Krummhörn zugänglich gemacht, sodass eine weitere Einbindung in örtliche und regionale Entscheidungen (politisch und/oder gesellschaftlich) möglich ist.

Es wird angestrebt, das Projektergebnis durch Veröffentlichungen (auch nach der Projektlaufzeit hinaus) der Fachwelt zugänglich zu machen.

Eine Fortführung der Untersuchungen ist aus Sicht von EXTREMENESS-D dringend zu empfehlen. Im Zuge der Bearbeitung hat sich herausgestellt, dass eine Vielzahl an Forschungsfragen in weiteren Studien näher beleuchtet werden sollten um die bereits durchgeführten Untersuchungen sinnvoll zu ergänzen. Insbesondere die Problematik der Binnenentwässerung bei (Stark-) Regen konnte aufgrund der Komplexität des Systems nicht quantitativ berücksichtigt werden. Beispielsweise bieten gekoppelte Simulationen (Sturmfluten, Oberflächenabfluss und Kanalisation) die Möglichkeit, mögliche Konsequenzen detaillierter zu ermitteln und weitere Maßnahmen für das Entwässerungswesen und den Katastrophenschutz abzuleiten. Außerdem sollte das im Projektverlauf entwickelte Konzept der Versagenskaskaden fortgeführt, präzisiert und um über das Modellgebiet hinausgehende Auswirkungen erweitert werden, sodass eine überregionale Betrachtung der Konsequenzen extremer Sturmfluten erfolgen kann.

Fortschritt bei anderen Stellen

Zu dem untersuchten Thema wurden im Rahmen der Bearbeitung sowie des wissenschaftlichen Austausches mit nationalen und internationalen Forschern sowohl im Bereich Küsteningenieurwesen als auch zutreffender weiterer Forschungsgebiete wie Ozeanographie bzw. der Geowissenschaften allgemein aktuelle Veröffentlichungen verfolgt, Konferenzen besucht sowie weitere Informationsrecherchen durchgeführt.

Es sind keine Hinweise bekannt, die einzelne Bearbeitungsschritte und Ziele des Forschungsprojektes obsolet machen. Darüber hinaus sind von dritter Seite keine FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

Erfolge oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Ergebnisse aus dem EXTREMENESS-Projekt wurden auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen und Workshops präsentiert und mit Fachkollegen diskutiert (u. a. KüNO-Jahrestagung 2017, ICCE 2018, EGU 2019, HTG-Kongress 2019). Hieraus ergaben sich neue Kontakte zu Wissenschaftlern aus diversen Ländern. Neben den planmäßigen projektinternen Treffen aller Verbundpartner, fanden in der Projektlaufzeit drei von den Projektpartnern der Universität

Hamburg geplante Workshops mit Interessensvertretern der Region Emden-Krummhörn statt, bei denen die Praxispartner unmittelbar in den Bearbeitungsprozess einbezogen wurden.

Über die geplanten Treffen und Arbeiten hinaus wurde der Zuwendungsempfänger von der Stadt Emden aktiv in die Planung und Durchführung einer Katastrophenschutzübung eingebunden, bei der ergänzend durchgeführten Forschungsarbeiten direkt in die Praxis des Katastrophenschutzes eingingen. Die Zusammenarbeit wurde in einem Blog-Artikel auf der Homepage des Koordinators veröffentlicht.

Der Abschlussbericht des Projektes soll in einem Sonderband der Schriftenreihe „Die Küste“ (herausgegeben durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, KfKI) veröffentlicht und somit der Fachwelt und potentiellen Anwendern (z. B. Landes- oder Bundesbehörden) zugänglich gemacht werden.

Nachfolgend findet sich eine genaue Auflistung der erfolgten Veröffentlichungen:

ULM, M., ARNS, A., JENSEN, J., SCHAPER, J., RATTER, B.: Mögliche Auswirkungen extremer Nordseesturmfluten und Anpassungsmaßnahmen. KüNO Jahrestagung 2017. Rostock, 11.10.2017.

JENSEN, J., ARNS, A., ULM, M.: Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen extremer Sturmfluten am Beispiel der Region Emden/Krummhörn. 22. KFKI-Seminar 2017. Bremerhaven, 22.11.2017.

ULM, M., ARNS, A., JENSEN, J. (2018): Black Swans and Risk – Assessing Consequences of Extreme Events for the German Bight. 36th International Conference on Coastal Engineering. Baltimore (MD, USA), 03.08.2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.23126.75848, 2018. (Posterpräsentation)

ULM, M., ARNS, A., JENSEN, J. (2018): Black Swans and Risk – Assessing Consequences of Extreme Events for the German Bight. KüNO-Jahrestagung, Hannover (Deutschland), 28.08.2018. (Posterpräsentation)

ULM, M., SCHAPER, J., BÖNEWITZ, M. (2018): „Forschung trifft Praxis – Was passiert bei einer Katastrophensturmflut?“ Blog-Beitrag vom 19.12.2018 zur Katastrophenübung der Stadt Emden. Online verfügbar unter: blogs.helmholtz.de/kuestenforschung.

ULM, M., ARNS, A., JENSEN, J.: Estimating the consequences of a high impact event at the Ems estuary. EGU General Assembly 2019, 07.04.-12.04.2019, Wien (Österreich). Postervortrag.

JENSEN, J., ULM, M., ARNS, A.: Bewertung möglicher Auswirkungen von extremen Sturmfluten auf Gesellschaft und Infrastruktur am Beispiel des Emdener Hafens. HTG-Kongress 2019, 12.09.2019, Lübeck. Vortrag.

LITERATURVERZEICHNIS

s. gemeinsames Literaturverzeichnis.

EXTREMENESS-E

Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen

ZE: Universität Hamburg (UniHH), Institut für Geographie, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg	Förderkennzeichen: 03F0758C
Vorhabenbezeichnung: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen	
Laufzeit des Vorhabens: 10/2016 – 09/2019	
Verfasser: Dr. Jürgen Schaper, Prof. Dr. Beate M.W. Ratter	

KURZDARSTELLUNG

Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Vorhaben EXTREMENESS-E umfasst die transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Sturmflut-Risikomanagementoptionen im Küstenschutz der Region Emden - Krümmhörn in Zusammenarbeit mit regionalen Stakeholdern und beteiligten Wissenschaftlern der Universität Hamburg (UniHH), der Universität Siegen (FWU) und dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG). In einem partizipativen Ansatz wurde dazu von der UniHH gemeinsam mit relevanten Praxisakteuren (institutionelle Fachleute und Entscheider aus dem Küsten- und Katastrophenschutz der Region Emden - Krümmhörn) ein Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (*engl. Science Stakeholder Collaboration Forum, SSCF*) in Emden gegründet. Das Ziel des Arbeitspakets AP 4 ist die transdisziplinäre Kooperation und Bewertung von extremen Sturmflutrisiken und möglichen Handlungsoptionen im Küsten- und Katastrophenschutz im SSCF: In einer Reihe von drei moderierten Workshops wurden dazu mit den Mitgliedern des SSCF

1. Risikovorstellungen und seltene Extremereignisse (Schwarze Schwäne) mit partizipativen Methoden identifiziert,
2. Auswirkungen dieser Ereignisse auf neuralgische Punkte (kritische Infrastrukturen) mit Hilfe von Szenario-Modellierungen der High-Impact-Events der FWU anhand von Versagenskaskaden (dynamischer Ereignisketten) im Kooperationsforum untersucht und
3. mögliche Anpassungsmaßnahmen und Konsequenzen für den regionalen Küsten- und Katastrophenschutz abgeleitet und evaluiert.

EXTREMENESS-E

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben EXTREMENESS-E erfolgte im Arbeitspaket 4 „Risiken und Optionen: Transdisziplinäre Kooperation und Evaluation“ unter Voraussetzungen transdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen den wissenschaftlichen Partnern (insbesondere der FWU Siegen im Vorhaben EXTREMENESS-D) und den regionalen Praxisakteuren in einem Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (*engl. Science Stakeholder Collaboration Forum, SSCF*). Das AP 4 wurde unter den Voraussetzungen des Förderantrags (s. Anhang) in das Gesamtvorhaben eingebettet und von der Universität Hamburg (UniHH) durchgeführt:

Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf im transdisziplinären Arbeitsprozess des SSCF sowie die Zusammenarbeit zwischen den Wissenschaftlern der Universität Hamburg (Institut für Geographie, Teilprojekt EXTREMENESS-E) und Universität Siegen (Forschungsinstitut Wasser und Umwelt - FWU, Teilprojekt EXTREMENESS-D) sind in Abbildung E-1 dargestellt.

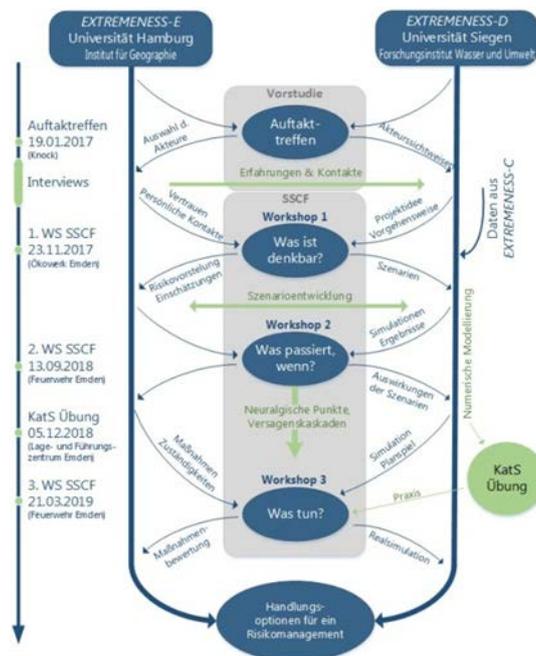


Abbildung E-1: Der transdisziplinäre Arbeitsprozess im SSCF Emden. (Quelle: veränderte Darstellung nach FWU Siegen)

Das Vorhaben EXTREMENESS-E war in zwei Teile gegliedert: In einer Vorstudie wurden von der Universität Hamburg vorab qualitative persönliche Interviews mit den zukünftigen Mitgliedern im Forum durchgeführt, um die individuellen Sichtweisen der Akteure im Küsten- und Katastrophenschutz kennenzulernen. Die Hauptarbeit des SSCF umfasste drei Workshops: Im ersten Workshop wurden gemeinsam extreme Sturmflutereignisse und Risiken identifiziert (Frage: Was ist denkbar?), im zweiten Workshop wurden mögliche Auswirkungen extremer Nordseesturmfluten untersucht (Frage: Was passiert, wenn?), im dritten Workshop (Frage: Was tun?) wurden gemeinsam Anpassungsmaßnahmen im Sturmflutrisikomanagement und mögliche Handlungsoptionen für die Praxis diskutiert.

Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

Der folgende Abschnitt beschreibt den heutigen Küstenschutz und die zukünftigen Herausforderungen im regionalen Sturmflutrisikomanagement: Die Region Ostfriesland an der nordwestlichen Küste Niedersachsens liegt in großen Teilen unterhalb des Meeresspiegels. Man kann sich diese Landschaft bildlich als ‚Badewanne‘ vorstellen (Ratter und Schaper 2019). Meterhohe Deiche schützen die niedersächsische Nordseeküste sowie das dahinterliegende Land und ihre Bewohner vor dem Meer (vgl. dazu Behre 2014). Um diesen Schutz dauerhaft zu gewährleisten, werden die Deiche ständig gepflegt, repariert, bemessen und auf Bestick (behördlich festgelegte Deichabmessungen) erhöht. Die Erhaltung der Deichsicherheit Niedersachsens ist eine Daueraufgabe unterschiedlicher Institutionen (regionale Deichverbände, das Land Niedersachsen und die Bundesrepublik Deutschland) im Küstenschutz, die im Generalplan Küstenschutz (NLWKN 2007) sowie im Niedersächsischen Deichgesetz (NDG 1963) geregelt ist, und als „Gemeinschaftsaufgabe von Bund und Ländern“ (vgl. BMEL 2019) finanziert wird. Die bauliche Erhöhung und Instandhaltung der Deiche ist eine kostspielige Angelegenheit und im Kontext des klimabedingten Meeresspiegelanstiegs technisch ggf. nicht mehr unendlich fortführbar. Bereits in der jüngeren Vergangenheit kam es zu besonderen Gefährdungslagen: die schwere Allerheiligenflut 2006 überraschte die Region Ostfriesland und führte zu sehr hohen Wasserständen an der Küste (BAW 2007). Glücklicherweise hielten die Deiche dem Wasser stand. Neben dieser meeresseitigen Bedrohung gibt es jedoch zusätzlich eine landseitige: Wasser, das durch Regen und Flüsse aufläuft und ins Meer abgeführt werden muss. Deiche und Entwässerung, gehören technisch betrachtet in Ostfriesland immer zusammen, denn sie schützen das Land vor einströmendem Salzwasser aus der Nordsee, während über Siele (Gewässerdurchlässe im Deich), Schleusen und Schöpfwerke (mithilfe von Pumpen) überflüssiges Süßwasser aus dem Binnenland ständig in die Nordsee zurückbefördert wird. Mit dem Fortschreiten des Klimawandels wird dieses Wechselspiel von Deichsicherheit und Entwässerung durch den antizipierten Meeresspiegelanstieg und die jüngste Zunahme von Extremereignissen in seiner Funktionalität vor Grenzen gestellt. Klimaszenarien des Norddeutschen Klimabüros zeigen, dass die möglichen Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in der Region Ostfriesland im Extremfall bis zu 24% zunehmen können (Norddeutsches Klimabüro 2018). Das bedeutet, dass die Kombination von möglichen häufigeren und extremen Sturmfluten, Niederschlägen und der Meeresspiegelanstieg zu einer Verschärfung der bestehenden Problemlage führen kann. Es ist damit zu rechnen, dass die bisher erprobten Strategien des Risiko-Managements der beteiligten Institutionen für Deichsicherheit, Küsten- und Katastrophenschutz im Umgang mit Nordseesturmfluten unter sehr extremen Rahmenbedingungen zukünftig in Frage gestellt werden. Das Projekt EXTREMENESS befasste sich daher mit Entstehungsbedingungen und Auswirkungen extremer, aber sehr unwahrscheinlicher Sturmfluten (schwarze Schwäne) an der deutschen Nordseeküste. Im Kontext eines szenariobasierten und transdisziplinären Ansatzes wurden im Teilprojekt EXTREMENESS-E mögliche Anpassungsmaßnahmen im Sturmflutrisikomanagement in einem geschlossenen Expertenkreis (Science Stakeholder Cooperation Forum) erarbeitet und praktisch durchgespielt. In dem Forum arbeiteten Fachleute aus dem Küsten- und Katastrophenschutz, von Behörden und Unternehmen sowie aus der Wissenschaft zusammen. Das Projekt hat eine neue Form der Zusammenarbeit von Küsten- und Katastrophenschutz mit der Wissenschaft getestet, damit ein effektives und vernetztes Agieren im Risiko-Management bei potentiellen extremen Gefährdungslagen möglich ist.

Verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Behre, K. (2014): Ostfriesland. Die Geschichte seiner Landschaft und ihrer Besiedlung. Brune-Mettcker Druck- und Verlagsgesellschaft.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2007): Endbericht zur Durchführung einer wasserbaulichen Systemanalyse der Sturmflut „5. Allerheiligenflut“ vom 1.11.2016. BAW-Nr. A3955 03 10161.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019): Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes (GAK).

EXTREMENESS – Extreme North Sea Storm Surges and their Consequences. Gemeinsamer Förderantrag Vorhabenbeschreibung.

González-Riancho, P., Gerkenmeier, B. und Ratter, B.: Storm surge resilience and the Sendai Framework. Risk perception, intention to prepare and enhanced collaboration along the German North Sea coast. *Ocean & Coastal Management*, Jg. 141, 118–131, 2017.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz - NLWKN (2007 und 2010): Generalplan Küstenschutz Band 1 Festland, Band 2 Ostfriesische Inseln Niedersachsen/Bremen.

Niedersächsisches Deichgesetz (NDG) in der Fassung vom 23. Februar 2004.

Norddeutsches Klimabüro (2018): Norddeutscher Klimaatlas, <https://www.norddeutscher-klimaatlas.de>.

Ratter, B.; Schaper, J. 2019: Risikomanagement in der „Badewanne“ – wenn in Ostfriesland bei Sturmflut Wasser von allen Seiten kommt. *Geographische Rundschau* 9/2019, 28-33.

Schaper, J.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Ratter, B.; Weisse, R. (2019): Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten: Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation. Die Küste. Submitted.

Schaper, J; Ratter, B. (2019): EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen. 24. KfKI Seminar zur Küstenforschung, 21. November 2019, Hamburg. Abstract zum Vortrag.

Ulm, M., Schaper, J. und Bönewitz, M.: „Forschung trifft Praxis – Was passiert bei einer Katastrophensturmflut?“ Blog-Beitrag vom 19.12.2018 zur Katastrophenübung der Stadt Emden [<https://blogs.helmholtz.de/kuestenforschung/2018/12/19/forschung-trifft-praxis-was-passiert-bei-einer-katastrophensturmflut/>, zuletzt geprüft 11.11.2019].

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Partnern im Gesamtprojekt erfolgte entsprechend des Ablaufdiagramms in Abbildung Anhang-1. Der mehrjährige transdisziplinäre Arbeitsprozess im SSCF Emden mit der FWU Siegen ist in Abbildung E-1 dargestellt. Die folgenden regionalen Institutionen und Fachleute waren als Praxisakteure (engl. Stakeholder) im SCCF Emden beteiligt: Stadt Emden (Fachdienst Umwelt, Fachdienst Brand-, Zivil- und Katastrophenschutz), Deichacht Krummhörn, Moormerländer Deichacht Oldersum, I. Entwässerungsverband Emden, Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW)

Ortsverband Emden, Niedersachsen Ports Emden, Wasserstraßen und Schifffahrtsamt (WSA) Emden, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz (NLWKN) Betriebsstelle Aurich, Forschungsstelle Küste (FSK) Norderney des NLWKN, Landkreis Aurich (Amt für Kreisstraßen, Wasserwirtschaft und Deiche; Abt. f. Zivil- und Feuerschutz, Rettungsdienst), Landwirtschaftlichen Hauptverein für Ostfriesland, Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) Regionalverband Ostfriesland, Gassco AS German Branch Emden, Volkswagen Emden. Die Katastrophenübung der Stadt Emden im Dezember 2018 fand mit Unterstützung der FWU und UniHH statt. Überdies erfolgte im dänischen Forschungsprojekt COHERENT² (Coastal Hazard Risk Reduction and Management) eine transnationale Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Dänemark.

EINGEHENDE DARSTELLUNG

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung in EXTREMENESS-E wurde für Personalaufwendungen zur Finanzierung der Stelle von Jürgen Schaper (10/2016 bis 09/2019) insbesondere für die transdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Praxisakteuren in dem Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (Science Stakeholder Collaboration Forum, SSCF) in Emden verwendet. Die Sachaufwendungen wurden für Dienstreisen, Raummieten und Catering im Rahmen der Treffen und Workshops im SSCF in Emden sowie für qualitative Face-to-face Interviews zur Akteursauswahl und Erhebung von Akteurssichtweisen in Emden und der Krummhörn im Rahmen der Vorstudie verausgabt. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse der Vor- und Hauptstudie (vgl. Schaper et al. 2020; Schaper und Ratter 2019) dargestellt.

Die **Vorstudie** umfasst Ergebnisse qualitativer Leitfadeninterviews: Die folgenden Akteurssichtweisen sind ausgewählte Einschätzungen, die in 15 persönlichen Einzelgesprächen mit potenziellen Mitgliedern des SSCF im Rahmen qualitativer Leitfadeninterviews von der Universität Hamburg vorab erhoben wurden. Die Sichtweisen der Interviewpartner der Vorstudie lieferten tiefgehendes Wissen und ein grundlegendes Verständnis der Akteure auf die gegenwärtigen und zukünftigen Risiken und Herausforderungen im Küstenschutz Ostfrieslands. Sie erzeugten auf beiden Seiten, Wissenschaft und Küstenschutz, eine gemeinsame Wissensbasis und den Aufbau einer wechselseitigen Vertrauensbasis. Beides war unabdingbare Voraussetzung für den geplanten Workshop-Prozess der Hauptstudie. Die Akteure signalisierten alle ihre Bereitschaft, im Forum mitzumachen und das Projekt als freiwillige Mitglieder im SSCF zu begleiten und zu unterstützen.

Die **Hauptstudie** umfasst Ergebnisse des Multi-Stakeholder-Workshop-Prozesses im SCCF: Im ersten Workshop wurden die denkbaren Risiken und mögliche Extremereignisse identifiziert und narrative Szenarien für die drei wichtigsten priorisierten Extremereignisse entwickelt:

1. Narratives Szenario „**Ketten-Sturmfluten**“: Es treten extreme aufeinanderfolgende Sturmflutereignisse in einer Sturmflutserie auf. Dabei werden die Auswirkungen auf das Binnenland betrachtet, unter der Voraussetzung, dass der Deich „wehrhaft bleibt“ und nicht bricht. Der Küstenschutz bleibt dabei funktionsfähig, ein Versagen der Deiche und Küstenschutzsysteme war für die Beteiligten nicht denkbar.

² URL: <https://www.coherent-project.dk/>

2. Narratives Szenario „**Schiffshavarie**“: Ein manövrierunfähiges Schiff treibt in der Nordsee infolge einer Sturmflut in den Deich und verliert dabei Ladung (z. B. Container), die den Deich schädigen kann. Das Schiff kann dabei selber in den Deich geraten. Die Kleischicht wird zerstört, der Sandkern ist offengelegt. Wasser strömt durch den Deich ins Binnenland und Öl kann zudem aus dem Schiff austreten. Für die weitere Szenario-Entwicklung im SSCF sollte die Schiffshavarie mit Deichbruch am Schardeich der Krummhörner Westküste am Campener Leuchtturm stattfinden.
3. Narratives Szenario „**Technisches Versagen**“: Das Szenario betrachtet ein Versagen der Öffnungs- und Schließmechanismen von technischen Küstenschutzbauwerken (Schleusen, Sperrwerke, Deichscharte). Im SSCF wird das Versagen der Großen Seeschleuse untersucht. Das Szenario ereignet sich zwei Stunden vor Tidehochwasser, Wasser fließt durch die Schleuse aus der Ems in den Emdener Hafen und verteilt sich weiter in der Stadt.

Im zweiten Workshop im SSCF wurden die drei ausgewählten Extremszenarien aus dem ersten Workshop anhand ihrer Auswirkungen, denkbarer Ereignisabfolgen und kaskadischer Verkettungen auf neuralgische Punkte in der Region weiterentwickelt. Ziele dabei waren

1. in drei transdisziplinär zusammengesetzten Arbeitsgruppen, für jedes einzelne Katastrophenszenario die Identifizierung der neuralgischen Punkte³, die betroffen wären, wenn das jeweilige Extremereignis auftritt und
2. die Erarbeitung von Versagenskaskaden⁴ für das Szenario in jeder Arbeitsgruppe.

Die Szenario-Entwicklung wurde begleitet von gemeinsamen Diskussionen zwischen den verschiedenen Fachleuten und den beteiligten Wissenschaftlern. Diese zeigten sich als besonders hilfreich, weil aufkommende Fragen mit Blick auf ein konkretes Extremereignis in einem moderierten Dialog unmittelbar von den anwesenden Experten beantwortet werden konnten. Sehr gewinnbringend waren die Schadensmodellierungen der Szenarien der Universität Siegen. Szenarien und Modellierungen fanden überdies Verwendung in der Katastrophenübung der Stadt Emden im Dezember 2018 (siehe Abbildung C-1) und ermöglichten wechselseitigen Wissenstransfer zwischen EXTREMENESS und der Stadt Emden mit Erkenntnisgewinn für beide Seiten (vgl. Ulm et al. 2018). Der kooperative, dialogbasierte Wissensaustausch im Rahmen des gewählten Szenario-Ansatzes in einem geschlossenen, vertrauensvollen Raum war dabei ein wichtiger Faktor für den Erfolg des Arbeitsprozesses im SSCF, der einen langfristigen sozialen Lernprozess darstellte und für alle Beteiligten Nutzen schaffte. Für alle drei Szenarien wurden neuralgische Punkte identifiziert, die betroffen wären, wenn das entsprechende Extremereignis eintritt. Diese waren kritische Infrastrukturen und Versorgungseinrichtungen (zur Entwässerung, Strom-, Wasser- und Gasversorgung), deren Ausfall weitreichende Folgen und einen hohen Impact für die gesamte Region Emden und Krummhörn bedeuten würde. Außerdem wurden die betroffenen Orte (Menschen, Tiere, Umwelt) in direkter Nähe zum jeweiligen Ereignis als besonders gefährdet betrachtet. Anschließend wurde für jedes der drei Szenarien im SSCF eine Versagenskaskade

³ Ein neuralgischer Punkt ist eine kritische Stelle oder Infrastruktur in der Region, die besonders vulnerabel ist oder deren Ausfall besonders weitreichende Folgen haben. Versagenskaskaden sind verkettete Ereignisabfolgen (Ereignisketten), bei denen das primäre Ereignis (das Katastropheneignis) weitere sekundäre Ereignisse auslösen kann (Dominoeffekt) oder sich zunehmend selbst verstärkt (Lawineneffekt).

⁴ Kaskadierende Katastrophen sind Extremereignisse, in denen Kaskadeneffekte im Laufe der Zeit zunehmen und unerwartete sekundäre Ereignisse von starker Wirkung erzeugen (als Beispiel hierfür sei die in Folge eines Tsunami entstandene Nuklearkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 genannt).

entwickelt, die insbesondere die gesellschaftlichen Auswirkungen der Extremereignisse anhand von Ereignisabfolgen und Verkettungen abbilden sollte (siehe auch Schaper et al. 2020).

Der dritte Workshop diente der Erprobung des Umgangs mit kaskadischen Extremereignissen im Katastrophenmanagement. Übergeordnetes Ziel war es, ausgehend von einem Katastrophenereignis die vier Schritte im Katastrophenmanagement (vgl. González-Riancho et al. 2017): Notfallmaßnahmen (Emergency response), Wiederherstellung (Recovery), Anpassung (Longterm adaptation) und Vorsorge (Preparedness) bei dynamischen Versagenskaskaden in einem Realexperiment zu üben und nachfolgend zu bewerten: In einem gemeinsam von der UniHH und FWU Siegen entwickelten und ausgestalteten Planspiel, dem ein in den Teilprojekten A-C identifiziertes und modelliertes Extremereignis zugrunde liegt, haben die Akteure im dritten Workshop deshalb in einer Realitätssimulation das Katastrophenmanagement und den Maßnahmeneinsatz während eines Extremereignisses geübt. Ziele des Workshops waren

1. die Identifizierung erfolgreicher Maßnahmen zur Unterbrechung der Versagenskaskaden insbesondere an neuralgischen Punkten und
2. Schlussfolgerungen für Prävention und Notfallplanung. Impulsgeber für das Planspiel war auch die teilnehmend beobachtete Katastrophenübung der Stadt Emden, die im Vorfeld des Workshops stattfand und in der der Umgang mit einem abgewandelten Szenario geübt wurde (siehe Abbildung E-1).

Ergebnisse und Schlussfolgerungen im SSCF

Aus den Diskussionen im SSCF wurde gefolgert, dass sich die Auswirkungen der Versagenskaskaden im Zeitverlauf und in der Wirkung für die Gesellschaft annähern. Die einzelnen Extremereignisse sind nicht das primäre Problem, sondern die Verwundbarkeit von Mensch, Tier, Umwelt und Infrastruktur. Die Verwundbarkeiten entscheiden über die Dauer und das Ausmaß einer Katastrophe und bilden damit wichtige Ansatzpunkte für den Umgang mit dynamischen Katastrophen und Kaskaden im Sturmflutrisikomanagement. Der Umgang mit dynamischen Extremereignissen wurde im dritten Workshop im Rahmen des Planspiels im Forum simuliert. Dabei wurde eine dynamische Katastrophenkette schrittweise in mehreren Runden weiterentwickelt und von den Mitgliedern im Forum in Arbeitsgruppen jeweils Maßnahmen zur Unterbrechung der Kaskade und zum Schutz der neuralgischen Punkte entwickelt. Die anschließende Reflexion und Diskussion verdeutlichte, dass die Versagenskaskade nur sehr schwer unterbrochen werden kann. Die Diskussion im SSCF zeigte Handlungsoptionen (wie Redundanzen bei Pumpen und Notstrom, mehr Schöpfleistung und autarke, dezentrale Stromsysteme) auf und verdeutlichte, dass Küstenschutz und Entwässerung in Ostfriesland zusammen gedacht werden müssen. Sie zeigte überdies, dass der Küstenschutz aktuell in der Region funktionsfähig und gut aufgestellt ist. Die Deiche sind sicher und alle beteiligten Akteure im Küstenschutz arbeiten gut miteinander zusammen. Zukünftig werden aber weitere Anpassungen nötig sein und daher ist eine gute, transdisziplinäre Kooperation zwischen Wissenschaft und Praxis auch weiterhin sinnvoll. Die Zusammenarbeit im SSCF kostete alle Beteiligten Zeit, Arbeit und Engagement. Aber die transdisziplinäre Wissenschafts-Praxis-Kooperation bringt den Beteiligten Nutzen (Win-Win) in einem wechselseitigen Lernprozess. Wichtig für die gute Zusammenarbeit war gegenseitiges Vertrauen und Offenheit in einem geschlossenen Raum. Solche Räume können neue Orte für einen zukünftigen Umgang

mit Extremen im Risikomanagement sein. Das SSCF in Emden kann dafür als ein gelungenes Best-Practice-Beispiel stehen.

Die Gegenüberstellung der im Förderantrag vorgegebenen Ziele („In Zusammenarbeit mit einem Wissenschaft-Praxis Kooperationsforum, das innerhalb des Projekts etabliert wird, sollen mögliche Überflutungspfade untersucht werden, entlang derer Schäden, beispielsweise im Gelände und an Küstenschutzanlagen entstehen können. Darüber hinaus trägt das Kooperationsforum durch seine Zusammensetzung aus relevanten Akteuren des regionalen Küsten- und Katastrophenschutzes dazu bei, die Bedürfnisse der Kommunen und der Bürger für ein Anpassungsmanagement zu vermitteln und in Form eines authentischen und umfassenden Kriterienkatalogs in die Bewertung von Maßnahmen einfließen zu lassen.“ Förderantrag, S. 4) mit den Ergebnissen aus EXTREMENESS-E im SSCF Emden zeigt auf, dass die folgenden Ziele erreicht worden: „die Anbahnung einer strategischen Diskussion zu neuartigen oder alternativen Konzepten im Küstenschutz durch die Bereitstellung detaillierter Informationen zu potentiell sehr extremen Sturmflutereignissen („schwarze Schwäne“) als Grundlage verbesserter Vorsorge und Gefahrenabwehr, die Bereitstellung umfassender Kenntnisse und von Wissen zur Bewertung von Risiken und Chancen im Kontext gesellschaftlicher Aktivitäten durch die Bewertung extremer Sturmflutgefahren im Zusammenhang mit der Untersuchung und Analyse möglicher Überflutungspfade und adaptiven Managements, die Integration und Verwertung existierenden Wissens und Know-hows durch das Zusammenbringen komplementärer Expertise sowohl aus Forschung und Verwaltung als auch von Natur-, Ingenieurs- und Sozialwissenschaften sowie die Unterstützung des wechselseitigen Wissenstransfers aus der Wissenschaft in die Anwendung und umgekehrt durch die aktive Einbindung von Behörden und lokalen Interessensvertretern (Stakeholdern) in den Forschungsprozess“ (vgl. Förderantrag, S. 4) hat im dem mehrjährigen transdisziplinären Arbeits- und Lernprozess im Wissenschaft-Praxis Kooperationsforum (siehe Abbildung E-1) im Rahmen der Auftaktveranstaltung, der Interviews, der drei Workshops im SSCF und darüber hinaus bei der Katastrophenstabsrahmenübung der Stadt Emden erfolgreich stattgefunden.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen die Kosten für das wissenschaftliche Personal, Kosten für die Durchführung der Workshops sowie Reisekosten zu Projekttreffen. Einzelheiten sind im detaillierten Verwendungsnachweis dargestellt. Es haben sich gegenüber dem Antrag keine wesentlichen Änderungen ergeben.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit in EXTREMENESS-E war angemessen und notwendig, um den transdisziplinären Arbeitsprozess im SSCF Emden über einen Zeitraum von drei Jahren zu ermöglichen, d.h. zu eröffnen und über die gesamte Projektlaufzeit zu verstetigen. Entscheidend war der Aufbau von gegenseitigem Vertrauen zwischen den beteiligten Wissenschaftlern und Praxisfachleuten im SSCF, um im Rahmen der drei Workshops den transdisziplinären Umgang mit undenkbar, sehr extremen Nordseesturmfluten im Kooperationsforum zu ermöglichen. Während bei der Auftaktveranstaltung noch Skepsis bei den Akteuren vorherrschte, nahm diese im fortschreitenden Prozess ab und ermöglichte einen offenen Arbeits-, Diskussions- und sozialen Lernprozess bei allen Beteiligten im Forum auf Basis von wechselseitigem Vertrauen, Interesse und Wertschätzung. Wichtig war, dass die Beteiligten in einem regelmäßigen Kontakt und Austausch blieben. Die qualitativen Interviews in der Vorstudie waren notwendig und der Schlüssel für alle weiteren Arbeiten, um die Akteure und ihre Sichtweisen im Umgang

EXTREMENESS-E

mit Extremereignissen im Sturmflutrisikomanagement kennenzulernen und die Mitglieder für das SSCF auszuwählen. Die drei Workshops stellten eine geschlossene Einheit der vertrauensvollen Stakeholder-Kooperation dar, um 1) die Risikovorstellungen und Extremereignisse zu identifizieren, 2) Auswirkungen solcher Ereignisse auf neuralgische Punkte und Versagenskaskaden zu analysieren und 3) mögliche Anpassungsmaßnahmen zu diskutieren und zu bewerten. Der transdisziplinäre Arbeits- und Forschungsprozess im SSCF und der Umgang mit undenkbaaren Extremereignissen waren für alle Beteiligten eine Herausforderung und ein neuartiges Gedankenexperiment in einem geschlossenen, vertrauensvollen Raum. Die gegenseitige Offenheit, Motivation und Ausdauer bei den Beteiligten war entscheidend für den Erfolg des SSCF und dafür waren die geleisteten Arbeiten entsprechend Abbildung E-1 uneingeschränkt notwendig und angemessen.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der anwendungsorientierte Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans umfasst transdisziplinäre Wissensgenerierung, -transfer und Vernetzung zwischen Wissenschaft und Praxis (und vice versa) im Umgang mit seltenen, sehr unwahrscheinlichen Extremereignissen (Schwarzen Schwänen) im Sturmflutrisikomanagement mit hoher Praxisrelevanz: Es ging es darum, kritische Punkte und Schwachstellen im System Küstenschutz und Deichsicherheit zu identifizieren. Dabei konnte der Umgang mit sehr unwahrscheinlichen, aber möglichen Extremereignissen anhand von neuralgischen Punkten und dynamischen Versagenskaskaden in einem geschlossenen, vertrauensvollen Raum ohne Öffentlichkeit und Medien zwischen Wissenschaftlern und regionalen Fachleuten erprobt werden.

Es zeigte sich dabei, dass die Deiche momentan in Ostfriesland sicher sind, aber zukünftig in einem fortschreitenden Klimawandel und bei einer möglichen Zunahme von Extremereignissen, mit multiplen Risiken im Umgang mit Wasser von mehreren Seiten zu rechnen ist. Die Risiken bei Entwässerung (vgl. Spiekermann et al. 2018), Deichsicherheit und Binnenhochwassergefährdung drohen sich zukünftig im Klimawandel stärker dynamisch zu beeinflussen. Daher ist die transdisziplinäre Vernetzung zwischen den Akteuren im SSCF und deren Verstetigung der Wissenschafts-Praxis-Kooperation in anschließenden anwendungsorientierten Forschungsprojekten zum Umgang mit den wasserbedingten multiplen Risikolagen in der Region Ostfriesland entscheidend, für die weitere Nutzung und für die Anschlussfähigkeit der Verwertbarkeit der bisher erzielten Ergebnisse. Die Ergebnisse aus EXTREMENESS-E werden zudem grenzübergreifend zwischen Dänemark und Deutschland im Rahmen von COHERENT verwertet und stiften damit auch einen transnationalen Nutzen.

Fortschritt bei anderen Stellen

Fortschritt bei anderen Stellen zeigte insbesondere die Katastrophenstabsrahmenübung der Stadt Emden im Dezember 2018 (siehe Abbildung E-1). In das Übungsszenario flossen Ergebnisse der Szenarioentwicklung aus dem SSCF ein. Die FWU führte zudem im Vorfeld der Übung Impactmodellierungen zu den Versagensszenarien durch, die in der Übung nutzbar waren. Der Fortschritt in der transdisziplinären Zusammenarbeit zwischen den Sozialwissenschaftlern der UniHH (EXTREMENESS-E), den Küstenbauingenieuren der FWU Siegen (EXTREMENESS-D) und der Stadt Emden im Wissenstransfer und der praktischen Anwendung in der Katastrophenstabsrahmenübung der Stadt Emden wurde deutlich. Solche Beispiele können sinnvoll für zünftige Wissenschafts-Praxis-Kooperationen mit Fortschritt bei anderen Stellen im Küsten- und Katastrophenmanagement sein. Darüber hinaus entsteht Fortschritt bei der Ergebnisverwertung in einer internationalen, länderübergreifenden Zusammenarbeit zwischen Dänemark und Deutschland: Im Rahmen des dänischen

Forschungsprojekts COHERENT findet ein grenzüberschreitender Wissensaustausch und Erfahrungstransfer der transdisziplinären Zusammenarbeit aus dem SSCF in Emden nach Dänemark statt und ermöglicht Fortschritt im Risiko- und Katastrophenmanagement insbesondere in der Kommune Aabenraa sowie wechselseitiges Lernen zwischen beiden Ländern im Rahmen der transnationalen Forschungszusammenarbeit.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse in EXTREMENESS-E und im Rahmen der Zusammenarbeit mit den weiteren Teilprojekten im EXTREMENESS-Gesamtprojekt sind:

Publikationen (Peer-reviewed)

Die 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) (2019): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. Die Küste. Submitted.

Ratter, B.; Schaper, J. (2019): Risikomanagement in der „Badewanne“ – wenn in Ostfriesland bei Sturmflut Wasser von allen Seiten kommt. Geographische Rundschau 9/2019, 28-33.

Schaper, J.; Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.; Ratter, B.; Weisse, R. (2020): Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten: Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation. Die Küste. Submitted.

Vorträge und Poster

Die EXTREMENESS Gruppe (2017): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. KüNO Jahrestagung 2017, Rostock, Deutschland. **Vortrag.**

Die EXTREMENESS Gruppe (2018): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. KüNO Jahrestagung 2018, Hannover, Deutschland. **Vortrag.**

Die EXTREMENESS Gruppe (2018): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen Meeresspiegelworkshop 2018, 20. November 2018, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, Deutschland. **Vortrag.**

Die EXTREMENESS Gruppe (2019): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. KüNO Abschlussstagung 2019, Hamburg, Deutschland. **Vortrag.**

Ratter, B.; Schaper, J. (2017): Identifikation extremer Sturmflutereignisse und Risiken – was ist denkbar? 1. Workshop des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums, 23. November 2017, Emden, **Vortrag**, Moderation und Methoden.

Ratter, B.; Schaper, J. (2018): Kooperative Lernprozesse – Herausforderungen an Küstenschutz-Akteure im Umgang mit Extremen. 10. Hydrologisches Gespräch im Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN), 25. Mail 2018, Husum, **Vortrag.**

EXTREMENESS-E

Ratter, B.; Schaper, J. (2018): Mögliche Auswirkungen extremer Sturmflutereignisse – was passiert, wenn...? 2. Workshop des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums, 13. September 2018, Emden, **Vortrag**, Moderation und Methoden.

Ratter, B.; Schaper, J. (2019): Anpassungsmaßnahmen im Sturmflutrisikomanagement – was tun? 3. Workshop des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums, 21. März 2019, Emden, **Vortrag**, Moderation und Methoden.

Schaper, J.; Ratter, B. (2019): Coastal Risk Management in a participatory transdisciplinary Science-Stakeholder-Cooperation-Forum in EXTREMENESS. COHERENT 4th Project Meeting, 21.-22.5.2019, Skive. **Presentation**.

Schaper, J.; Ratter, B. (2019): Coastal Risk Management in WP3: Emergency Management and Capacity Building in Aabenraa and Emden. COHERENT 5th Project Meeting, 04.-05.12.2019, Aabenraa. **Presentation**.

Schaper, J.; Ratter, B. (2019): EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen. 24. KfKI Seminar zur Küstenforschung, 21. November 2019, Hamburg. **Vortrag**.

Schaper, J.; Ratter, B. (2018): EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen (Uni HH). Stand der Arbeiten. 2. Sitzung der projektbegleitenden Gruppe im DWD, 16. Januar 2018, Hamburg, **Vortrag**.

Schaper, J.; Ratter, B. (2018): EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen (Uni HH). Stand der Arbeiten am 18.09.2018. 3. Sitzung der projektbegleitenden Gruppe im DWD, 18. September 2018, Hamburg, **Vortrag**.

The EXTREMENESS Group (2018): Identification of extreme storm tides with high impact potential for the German North Sea coast. 2nd Baltic Earth Conference, 11-15 June 018, Helsingoer, Denmark. **Vortrag**.

The EXTREMENESS Group (Ralf Weisse, Arne Arns, Tabea Brodhagen, Anette Ganske, Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Jürgen Jensen, Elke Meyer, Thomas Möller, Beate Ratter, Elisabeth Rudolph, Jürgen Schaper, Marius Ulm, Birger Tinz) (2019): Extreme storm tides in the North Sea and their consequences in the Ems estuary. EMS Annual Meeting 9-13 September 2019, Copenhagen, Denmark. **Vortrag**.

The EXTREMENESS Group (Ralf Weisse, Arne Arns, Tabea Brodhagen, Etor Emanuel Lucio Eceiza, Anette Ganske, Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Jürgen Jensen, Elke Meyer, Thomas Möller, Beate Ratter, Elisabeth Rudolph, Jürgen Schaper, Marius Ulm, Hans von Storch, Birger Tinz) (2019): Can we manage the unexpected? Constructing plausible storm tides with high impact potential and consequences for coastal protection and disaster risk management. AGU Fall Meeting 9-13 Dezember 2019, San Francisco, USA. **Poster**.

The EXTREMENESS Group (Ralf Weisse, Arne Arns, Tabea Brodhagen, Etor Emanuel Lucio Eceiza, Anette Ganske, Lidia Gaslikova, Iris Grabemann, Jürgen Jensen, Elke Meyer, Thomas Möller, Beate Ratter, Elisabeth Rudolph, Jürgen Schaper, Marius Ulm, Hans von Storch, Birger Tinz) (2019): Can we manage the unexpected? Constructing plausible storm tides with high impact potential and consequences for

EXTREMENESS-E

coastal protection and disaster risk management. 2nd INTERNATIONAL WORKSHOP ON WAVES, STORM SURGES AND COASTAL HAZARDS 10-15 November 2019, Melbourne, Australia. **Poster**.

Ulm, M., Arns, A., Jensen, J., Schaper, J., Ratter, B. (2017): Mögliche Auswirkungen extremer Nordseesturmfluten und Anpassungsmaßnahmen. KÜNO Jahrestagung, 11./12. Oktober, Rostock, **Poster**.

Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J. (2018): EXTREMENESS Schadensmodellierung. 2. Workshop des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums, 13. September 2018, Emden, **Vortrag**.

Weisse, R. und die EXTREMENESS Projektgruppe (2018): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen. 2. Workshop des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums, 13. September 2018, Emden, **Vortrag**.

Sonstige Produkte

Schaper, J.; Ratter, B. (2019): EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen. 24. KfKI Seminar zur Küstenforschung, 21. November 2019, Hamburg. **Abstract** zum Vortrag.

Ulm, M.; Schaper, J.; Bönewitz, M. (2018): Forschung trifft Praxis – Was passiert bei einer Katastrophensturmflut? **Online-Beitrag** auf Helmholtz Blogs, HZG Geesthacht am 19.12.2018. URL: <https://blogs.helmholtz.de/kuestenforschung/2018/12/19/forschung-trifft-praxis-was-passiert-bei-einer-katastrophensturmflut/>

Karrasch, L., Schaper, J. (2017): Forschungsregion Ostfriesland. Oldenburg. **Broschüre** zur Vernetzung der Forschungsprojekte EXTREMENESS, KLEVER, SALTSA und COMTESS.

LITERATURVERZEICHNIS

s. gemeinsames Literaturverzeichnis.

Anhang

ABHÄNGIGKEITEN ZWISCHEN DEN ARBEITSPAKETEN UND TEILPROJEKTEN

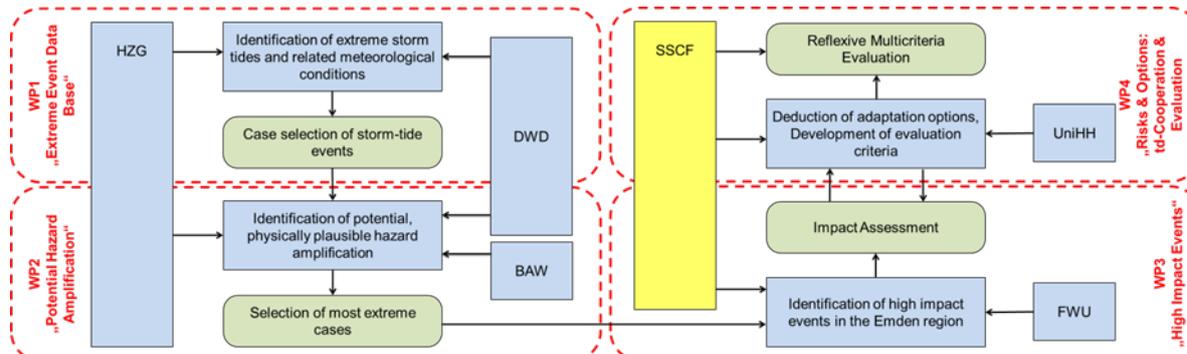


Abb. Anhang-1: Ablaufdiagramm zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Arbeitspaketen (WPs), den Beiträgen der einzelnen Projektpartner und den Hauptergebnissen. (Quelle: EXTREMENESS Förderantrag)

Tabelle Anhang-1: Bezüge zwischen Teilprojekten der Partner und Arbeitspaketen (Quelle: EXTREMENESS Förderantrag)

Vorhaben der Partner	Arbeitspakete				
	Datenbasis extremer Sturmflutereignisse (WP1)	Analyse potentieller Verstärkungsmechanismen (WP2)	Analyse möglicher Auswirkungen (WP 3)	Risiken und Optionen: Transdisziplinäre Kooperation und Bewertung (WP 4)	Projektleitung und Ergebnisverwertung(WP 5)
EXTREMENESS-A: Analyse extremer Sturmfluten und möglicher Verstärkungen (HZG)	X	X			X
EXTREMENESS-B: Analyse von Windfeldern, die extreme Sturmfluten verursachen können (DWD)	X	X			X
EXTREMENESS-C: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkungen (BAW)		X			X
EXTREMENESS-D: Analyse möglicher Auswirkungen extremer Sturmfluten (FWU)			X		X
EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen (Uni HH)				X	X

ZEITPLANUNG DES PROJEKTS

Tabelle Anhang-2: Ablaufdiagramm (Quelle: EXTREMENESS Förderantrag)

Arbeits- und Zeitplan für EXTREMENESS	2016 (9 M)			2017 (12 M)			2018 (12 M)			2019 (9 M)													
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
AP	Aufgaben																						
1	Datenbasis extremer Sturmflutereignisse																						
1.1	Identifikation und Gruppierung von Sturmfluten und Wetterbedingungen (HZG)																						
1.2	Analyse von Starkwindergebnissen (DWD)																						
1.3	Zusammenstellung extremer Sturmflutereignisse (HZG, DWD)																						
2	Analyse potentieller Verstärkungsmechanismen																						
2.1	Modell set-up und hochaufgelöste Atmosphären- und Wasserstandsmodellierung (HZG)																						
2.2	Bias Korrektur für Windefelder Ästuarmodellierung (DWD)																						
2.3	Ästuarmodellierung (BAW)																						
2.4	Mögliche Verstärkung durch interne atmosphärische Variabilität (HZG)																						
2.5	Mögliche Verstärkung durch veränderte Randbedingungen Wasserstandsmodell (HZG)																						
2.6	Mögliche Verstärkung im Ästuar (BAW)																						
2.7	Zusammenstellung potentiell verstärkter Sturmflutereignisse (HZG, DWD, BAW)																						
3	Analyse möglicher Auswirkungen																						
3.1	Aufbau des numerischen Modells (FWU)																						
3.2	Definition relevanter Versagenszustände (FWU)																						
3.3	Simulation von Auswirkungen für die von WP2 bereitgestellten Fälle (FWU)																						
3.4	Versagens- und Eintrittswahrscheinlichkeiten (FWU)																						
3.5	Entwicklung vereinfachter und übersichtlicher Risikokarten																						
4	Risiken & Optionen: Transdisziplinäre Kooperation & Bewertung																						
4.1	Akteurslandschaft Küstenschutz: Beziehungsgeflecht und Wahrnehmungen (Uni HH, SSCF)																						
4.2	Verstehen & Vermitteln: Risiken durch sehr schwere Sturmfluten (UniHH, FWU)																						
4.3	Entwicklung von Handlungsempfehlungen (UniHH, SSCF)																						
4.4	Bewertung von Handlungsoptionen (UniHH, SSCF)																						
4.5	Empfehlungen zur Weiterentwicklung transdisziplinärer Methoden (Uni HH)																						
5	Management, Dissemination and Exploitation																						
Projekttreffen (alle Partner)																							
Publikationen (alpine Partner)																							
Zusammenstellung der Ergebnisse und Abschlussbericht (alle Partner)																							

Gemeinsames Literaturverzeichnis

- Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Jensen, J. (2015): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. In: *Coastal Engineering* 96, S. 118–131. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.12.002.
- BAW (2007): Endbericht zur Durchführung einer wasserbaulichen Systemanalyse der Sturmflut 5. Allerheiligenflut vom 1.11.2006. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (Bericht BAW, A3955 03 10161).
- Behre, Karl-Ernst (2014): Ostfriesland. Die Geschichte seiner Landschaft und ihrer Besiedlung. Wilhelmshaven: Brune-Mettcker.
- BMEL (2019): Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Foerderung-Agrarsozialpolitik/GAK/gak_node.html.
- Bollmeyer, C.; Keller, J. D.; Ohlwein, C.; Wahl, S.; Crewell, S.; Friederichs, P. et al. (2015): Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 141 (686), S. 1–15. DOI: 10.1002/qj.2486.
- Bormann, Helge; Kebschull, Jenny; Ahlhorn, Frank; Spiekermann, Jan; Schaal, Peter (2018): Modellbasierte Szenarioanalyse zur Anpassung des Entwässerungsmanagements im nordwestdeutschen Küstenraum. In: *Wasser Abfall* 20 (7-8), S. 60–66. DOI: 10.1007/s35152-018-0083-7.
- Brecht, B.; Frank, H. (2014): High resolution modelling of wind fields for optimization of empirical storm flood predictions. In: *Adv. Sci. Res.* 11 (1), S. 1–6. DOI: 10.5194/asr-11-1-2014.
- BSH (2016): Nordseezustand 2008-2011. Hg. v. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 54/2016, 54/2016). Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/_Anlagen/Downloads/Meer_und_Umwelt/Berichte-des-BSH/Berichte-des-BSH_54.html, zuletzt geprüft am 23.03.2020.
- Butler, Adam; Heffernan, Janet E.; Tawn, Jonathan A.; Flather, Roger A. (2007): Trend estimation in extremes of synthetic North Sea surges. In: *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 56 (4), S. 395–414. DOI: 10.1111/j.1467-9876.2007.00583.x.
- Casulli, Vincenzo (2009): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. In: *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 60 (4), S. 391–408. DOI: 10.1002/flid.1896.
- Casulli, Vincenzo; Stelling, Guus S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. In: *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 67 (4), S. 441–449. DOI: 10.1002/flid.2361.
- Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T. et al. (2011): Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. In: *Geosci. Model Dev.* 4 (4), S. 1051–1075. DOI: 10.5194/gmd-4-1051-2011.
- Compo, G. P.; Whitaker, J. S.; Sardeshmukh, P. D.; Matsui, N.; Allan, R. J.; Yin, X. et al. (2011): The Twentieth Century Reanalysis Project. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137 (654), S. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.

Copernicus Climate Change Service (CS3) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Online verfügbar unter <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.

Dangendorf, Sönke; Müller-Navarra, Sylvain; Jensen, Jürgen; Schenk, Frederik; Wahl, Thomas; Weisse, Ralf (2014): North Sea Storminess from a Novel Storm Surge Record since AD 1843*. In: *J. Climate* 27 (10), S. 3582–3595. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00427.1.

Debernard, J.; Røed, L. (2008): Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas. A revisit. In: *Tellus A* 60 (3), S. 427–438. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2008.00312.x.

Dee, D. P.; Uppala, S. M.; Simmons, A. J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S. et al. (2011): The ERA-Interim reanalysis. Configuration and performance of the data assimilation system. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137 (656), S. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.

DGJ (2010a): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Elbegebiet. Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung 2006. Hg. v. Hamburg Port Authority.

DGJ (2010b): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet 2006. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.

DGJ (2015): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Elbegebiet. Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung 2014. Hg. v. Hamburg Port Authority.

DGJ (2018): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet 2015. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.

Feser, F.; Weisse, R.; Storch, H. von (2001): Multi-decadal atmospheric modeling for Europe yields multi-purpose data. In: *Eos Trans. AGU* 82 (28), S. 305. DOI: 10.1029/01E000176.

FHH (2013): Wasserstände für die Planung öffentlicher Hochwasserschutzanlagen. Hg. v. Freie und Hansestadt Hamburg- Behörde für Justiz und Gleichstellung (Amtlicher Anzeiger, 63).

Förster, Johannes; Barkmann, Jan; Fricke, Roman; Hotes, Stefan; Kleyer, Michael; Kobbe, Susanne et al. (2015): Assessing ecosystem services for informing land-use decisions. A problem-oriented approach. In: *E&S* 20 (3). DOI: 10.5751/ES-07804-200331.

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

Ganske, Anette; Schade, Nils; Hüttl-Kabus, Sabine; Möller, Jens; Heinrich, Hartmut; Tinz, Birger; Gates, Lydia (2016): Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979-2012. Hg. v. BMVI Expertennetzwerk (SP-108). Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/_Anlagen/Downloads/Meer_und_Umwelt/Expertennetzwerk/Analyse-von-Windstau.pdf?_blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 25.03.2020.

Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Groll, Nikolaus (2013): Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. In: *Nat Hazards* 66 (3), S. 1501–1518. DOI: 10.1007/s11069-012-0279-1.

- Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Weisse, Ralf; Groll, Nikolaus (2016): Storm surge climatology for the NE Atlantic and the North Sea – where the new RCP 8.5 scenario lead us to? Online verfügbar unter http://www.waveworkshop.org/14thWaves/Papers/Gaslikova_SurgeSymposium_2015.pdf.
- Gerber, Marie; Ganske, Anette; Müller-Navarra, Sylvain; Rosenhagen, Gudrun (2016): Categorisation of Meteorological Conditions for Storm Tide Episodes in the German Bight. In: *metz* 25 (4), S. 447–462. DOI: 10.1127/metz/2016/0660.
- Geyer, B. (2014): High-resolution atmospheric reconstruction for Europe 1948–2012. CoastDat2. In: *Earth Syst. Sci. Data* 6 (1), S. 147–164. DOI: 10.5194/essd-6-147-2014.
- González-Riancho, Pino; Gerkenmeier, Birgit; Ratter, Beate M.W. (2017): Storm surge resilience and the Sendai Framework. Risk perception, intention to prepare and enhanced collaboration along the German North Sea coast. In: *Ocean & Coastal Management* 141, S. 118–131. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.03.006.
- Grabemann, Iris; Gaslikova, Lidia; Brodhagen, Tabea; Rudolph, Elisabeth (2019): Very severe storm tides in the German Bight (North Sea) and their potential for enhancement.
- Hasse, Lutz (1974): Note on the surface-to-geostrophic wind relationship from observations in the German Bight. In: *Boundary-Layer Meteorol* 6 (1-2), S. 197–201. DOI: 10.1007/BF00232484.
- Hazeleger, Wilco; Severijns, Camiel; Semmler, Tido; Ștefănescu, Simona; Yang, Shuting; Wang, Xueli et al. (2010): EC-Earth. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 91 (10), S. 1357–1364. DOI: 10.1175/2010BAMS2877.1.
- Jensen, J.; Muderbach, C.; Müller-Navarra, S.; Bork, I.; Koziar, C.; Renner, V. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: *Die Küste* 71, S. 123–167.
- Jensen, J.; Muderbach, C.; Dangendorf, S. (2013): Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 25/2013).
- Jongejan, R. B.; Maaskant, B. (2015): Quantifying flood risks in the Netherlands. In: *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis* 35 (2), S. 252–264. DOI: 10.1111/risa.12285.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L. et al. (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77 (3), S. 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kapitza, H.; Eppel, D. (1990): Simulating morphodynamical processes on a parallel system. In: Malcolm L. Spaulding (Hg.): Estuarine and coastal modeling. Proceedings of the conference ; Newport, Rhode Island, November 15 - 17, 1989. New York, NY: American Society of Civil Engineers.
- Karrasch, L.; Schaper, J. (2016): Forschungsregion Ostfriesland (Broschüre).
- Koziar, C.; Renner, V. (2005): MUSE Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Nordseeküste, Teilprojekt 1: Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen. Hg. v. Deutscher Wetterdienst (Abschlussbericht zum BMBFForschungsvorhaben 03KIS039 (KFKI Fördernummer 78)).

Kramer, J.; Liese, R.; Lüders, K. (1962): Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. In: *Die Küste* 10 (1), S. 17–53. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100777>.

Laloyaux, Patrick; Boisseson, Eric de; Balmaseda, Magdalena; Bidlot, Jean-Raymond; Broennimann, Stefan; Buizza, Roberto et al. (2018): CERA-20C. A Coupled Reanalysis of the Twentieth Century. In: *J. Adv. Model. Earth Syst.* 10 (5), S. 1172–1195. DOI: 10.1029/2018MS001273.

Lyard, Florent; Lefevre, Fabien; Letellier, Thierry; Francis, Olivier (2006): Modelling the global ocean tides. Modern insights from FES2004. In: *Ocean Dynamics* 56 (5-6), S. 394–415. DOI: 10.1007/s10236-006-0086-x.

Müller-Navarra, Sylvain H.; Giese, Harald (1999): Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. In: *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 51 (4), S. 385–405. DOI: 10.1007/BF02764162.

Nakicenovic, Nebojsa; Kolp, Peter; Riahi, Keywan; Kainuma, Mikiko; Hanaoka, Tatsuya (2006): Assessment of emissions scenarios revisited. In: *Environ Econ Policy Stud* 7 (3), S. 137–173. DOI: 10.1007/BF03353998.

NDG (1963): Niedersächsisches Deichgesetz. NDG, vom 23.02.2004. Fundstelle: Nds. GVBl. 2004, 83. Online verfügbar unter <http://www.nds-voris.de/jportal/?quelle=jlink&query=DeichG+ND&psml=bsvorisprod.psml&max=true&aiz=true>.

NLWKN (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. Online verfügbar unter https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/22925/Generalplan_Kuestenschutz.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2020.

Norddeutsches Klimabüro (2018): Norddeutscher Klimaatlas. Hg. v. Norddeutsches Klimabüro. Online verfügbar unter <https://www.norddeutscher-klimaatlas.de>, zuletzt geprüft am 23.03.2020.

Oppenheimer, M.; B.C. Glavovic; J. Hinkel; R. van de Wal; A.K. Magnan; A. Abd-Elgawad et al. (2019): Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska et al. (Hg.): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>.

Oumeraci, H.; Gönnert, G.; Jensen, J.; Kortenhaus, A.; Fröhle, P.; Gerkenmeier, B. et al. (2012): XtremRisk: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten - Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel. Hg. v. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Braunschweig.

Plüß, A.; Rudolph, E.; Schrödter, D. (2001): Characteristics of storm surges in German estuaries. In: *Clim. Res.* 18, S. 71–76. DOI: 10.3354/cr018071.

Ratter, B.; Schaper, J. (2019): Risikomanagement in der „Badewanne“ – wenn in Ostfriesland bei Sturmflut Wasser von allen Seiten kommt. In: *Geographische Rundschau* (9), S. 28–33.

Rockel, Burkhard; Will, Andreas; Hense, Andreas (2008): The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). In: *metz* 17 (4), S. 347–348. DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0309.

- Röckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M. et al. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: model description. Hg. v. Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg (MPI Rep., 349). Online verfügbar unter http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/models/echam/mmpi_report_349.pdf, zuletzt geprüft am 20.03.2020.
- Rosenhagen, G.; Bork, I. (2009): Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872. In: *Die Küste* 75, S. 51–70, zuletzt geprüft am 20.03.2020.
- Rudolph, E. (2014): Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. In: *Die Küste* 81, S. 291–300.
- Rudolph, Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Ganske, Anette; Grabemann, Iris et al. (2020): Analyse extremer Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste und ihre möglichen Verstärkungen., under review.
- Samuelsson, Patrick; Jones, Colin G.; Will'En, Ulrika; Ullerstig, Anders; Gollvik, Stefan; Hansson, Ulf et al. (2016): The Rossby Centre Regional Climate model RCA3. Model description and performance. In: *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63 (1), S. 4–23. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x.
- Schaper, J.; Ratter, B. (2019): EXTREMENESS-E: Transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher Risikomanagementoptionen. KFKI Seminar zur Küstenforschung. Hamburg, 21.11.2019. Online verfügbar unter http://www.kfki.de/files/kfki-seminare/0/24_KFKI-Seminar2019_Abstract_EXTREMENESS_E_Schaper.pdf, zuletzt geprüft am 25.03.2020.
- Schaper, Jürgen; Ulm, Marius; Arns, Arne; Jensen, Jürgen; Ratter, Beate M.W.; Weiße, Ralf (2020): Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten: Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation. In: *Die Küste*, under review.
- Scoccimarro, Enrico; Gualdi, Silvio; Bellucci, Alessio; Sanna, Antonella; Giuseppe Fogli, Pier; Manzini, Elisa et al. (2011): Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High-Resolution Coupled General Circulation Model. In: *J. Climate* 24 (16), S. 4368–4384. DOI: 10.1175/2011JCLI4104.1.
- Sehili, Aissa; Lang, Günther; Lippert, Christoph (2014): High-resolution subgrid models. Background, grid generation, and implementation. In: *Ocean Dynamics* 64 (4), S. 519–535. DOI: 10.1007/s10236-014-0693-x.
- Smith, S. D.; Banke, E. G. (1975): Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 101 (429), S. 665–673. DOI: 10.1002/qj.49710142920.
- Spiekermann, Jan; Ahlhorn, Frank; Bormann, Helge; Kebschull, Jenny (2018): Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden. Universität Oldenburg. Online verfügbar unter <https://uol.de/klever/ergebnisbroschuere/>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- Stevens, Bjorn; Giorgetta, Marco; Esch, Monika; Mauritsen, Thorsten; Crueger, Traute; Rast, Sebastian et al. (2013): Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model. ECHAM6. In: *J. Adv. Model. Earth Syst.* 5 (2), S. 146–172. DOI: 10.1002/jame.20015.
- Stocker, Thomas (Hg.) (2014): Climate change 2013. The physical science basis : Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Cambridge: Cambridge University Press. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

Taylor, Karl E.; Stouffer, Ronald J.; Meehl, Gerald A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93 (4), S. 485–498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

The GFDL Global Atmospheric Model Development Team (2004): The New GFDL Global Atmosphere and Land Model AM2–LM2. Evaluation with Prescribed SST Simulations. In: *J. Climate* 17 (24), S. 4641–4673. DOI: 10.1175/JCLI-3223.1.

Ulm, Marius; Schaper, Jürgen; Bönnewitz, M. (2018): Forschung trifft Praxis - Was passiert bei einer Katastrophensturmflut? Online verfügbar unter <https://blogs.helmholtz.de/kuestenforschung/2018/12/19/forschung-trifft-praxis-was-passiert-bei-einer-katastrophensturmflut/>.

Uppala, S. M.; KÅllberg, P. W.; Simmons, A. J.; Andrae, U.; Bechtold, V. Da Costa; Fiorino, M. et al. (2005): The ERA-40 re-analysis. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 131 (612), S. 2961–3012. DOI: 10.1256/qj.04.176.

van Vuuren, Detlef P.; Edmonds, Jae; Kainuma, Mikiko; Riahi, Keywan; Thomson, Allison; Hibbard, Kathy et al. (2011): The representative concentration pathways. An overview. In: *Climatic Change* 109 (1-2), S. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

Weisse, Ralf; Bisling, Peter; Gaslikova, Lidia; Geyer, Beate; Groll, Nikolaus; Hortamani, Mahboubeh et al. (2015): Climate services for marine applications in Europe. In: *Earth Perspectives* 2 (1), S. 3887. DOI: 10.1186/s40322-015-0029-0.

Weisse, Ralf; Plüß, Andreas (2006): Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958–2002. In: *Ocean Dynamics* 56 (1), S. 16–25. DOI: 10.1007/s10236-005-0037-y.

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

Woodworth, P. L.; Flather, R. A.; Williams, J. A.; Wakelin, S. L.; Jevrejeva, S. (2007): The dependence of UK extreme sea levels and storm surges on the North Atlantic Oscillation. In: *Continental Shelf Research* 27 (7), S. 935–946. DOI: 10.1016/j.csr.2006.12.007.