

Transdisziplinäres Risikomanagement im Umgang mit extremen Nordsee-Sturmfluten – Vom Modell zur Wissenschafts-Praxis-Kooperation

Jürgen Schaper^{1, 4}, Marius Ulm², Arne Arns², Jürgen Jensen², Beate Ratter^{3, 4}, Ralf Weisse⁴

¹ Universität Hamburg, Institut für Geographie, juergen.schaper@uni-hamburg.de

² Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt

³ Universität Hamburg, Institut für Geographie

⁴ Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institut für Küstenforschung

Zusammenfassung

Die Region Emden-Krummhörn in Ostfriesland wird aufgrund ihrer besonderen Lage zur angrenzenden Nordsee von einer Vielzahl hydrologischer Risiken bedroht. Da z. B. große Teile der Region unter dem Meeresspiegel liegen, werden Deiche zum Schutz vor Sturmfluten benötigt. Zudem muss Niederschlag aus dem tiefliegenden Hinterland mit Hilfe von Sielen und Schöpfwerken entwässert werden. Im Zuge des Klimawandels droht sich diese multiple Risikolage von mehreren Seiten zu verschärfen, da Ereignisse wie Starkregen und Sturmfluten zukünftig häufiger und/oder extremer auftreten können. Um diesen steigenden Herausforderungen im Küsten- und Katastrophenschutz zu begegnen, wurden im Forschungsprojekt „EXTREMENESS – Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen“ Sturmflutrisiken für die Region Emden-Krummhörn transdisziplinär untersucht. Im vorliegenden Beitrag werden (a) das transdisziplinäre Risikomanagement im Umgang mit extremen, möglichen Nordseesturmfluten in einem Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum beschrieben und (b) die auf hydrodynamisch-numerischen Simulationen basierenden Schadenspotenzialanalysen vorgestellt, die für die Bewertung und Diskussion der Konsequenzen im Rahmen des Kooperationsforums verwendet wurden. Wissenschaftler und Fachleute aus der Praxis haben dabei zunächst die Risikovorstellungen und -wahrnehmungen sowie unwahrscheinliche Extremereignisse identifiziert (*Was ist denkbar?*), anschließend mögliche Auswirkungen von Katastrophenereignissen auf neuralgische Punkte anhand von Versagenketten entwickelt und numerisch modelliert (*Was passiert, wenn?*) sowie abschließend Handlungsoptionen und Maßnahmen abgeleitet und bewertet (*Was tun?*).

Schlagwörter

Sturmflut, transdisziplinäres Risikomanagement, numerische Überflutungssimulation, Schadenspotenzial, Katastrophenschutz, Emden, Extremereignisse, Klimawandel, Neuralgische Punkte, Kaskadeneffekte, Versagenkaskaden, Szenario-Entwicklung, Multi Stakeholder Workshops, Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum

Summary

The Emden-Krummhörn region in Eastern Frisia (Lower Saxony, Germany), is threatened by a variety of hydrological risks due to its special location in relation to the adjacent North Sea. Since large parts of the region lie below sea level, dikes are needed to protect against storm surges. In addition, precipitation from the low-lying hinterland must be drained with the aid of sluice gates and pumping stations. In the context of climate change, this multiple risk situation tends to intensify from several sides, as events such as heavy rainfall and storm surges may occur more frequently and/or more severely in the future. In order to meet these growing challenges in coastal and disaster risk management, the research project “EXTREMENESS – Extreme North Sea Storm Surges and their Consequences” transdisciplinarily examined storm surge risks for the Emden-Krummhörn region. In this paper (a) the transdisciplinary risk management in dealing with extreme, but physically possible North Sea storm surges is described in a science stakeholder cooperation forum. Scientists and practitioners first identified risk conceptions and perceptions as well as unlikely extreme events (What is conceivable?), then developed and numerically modeled possible effects of catastrophic events on neuralgic points by means of failure cascades (What happens if?), and finally derived and evaluated options for action and measures (What do?).

Keywords

storm surge, transdisciplinary risk management, numerical flood simulation, damage potential, emergency management, Emden, extreme events, climate change, neuralgic points, cascading effects, cascading failure events, scenario development, multi stakeholder workshops, science stakeholder cooperation forum (SSCF)

1 Einleitung

Im Verbundprojekt „EXTREMENESS – Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen“ wurden Sturmflutereignisse untersucht, die extrem selten und höchst unwahrscheinlich, aber potentiell mit extremen Konsequenzen verbunden sind. In Anlehnung an den Begriff des „Black Swans“, der synonym für ein sehr folgenreiches aber unvorhersehbares Ereignis steht (Taleb 2007), wurden im Verbundprojekt physikalisch mögliche Extremereignisse identifiziert: extreme Stürme und daraus folgende Sturmfluten, die allein auf Basis historischer Daten nicht vorhersehbar sind, wohl aber bei Berücksichtigung physikalischer Gesetzmäßigkeiten und Randbedingungen (Lin und Emanuel 2015). Im Gegensatz dazu arbeiten bisherige Untersuchungen zu Nordseesturmfluten hauptsächlich mit extremwertstatistischen Methoden, um zukünftig mögliche Extremereignisse abzuschätzen. Dabei werden Bemessungswasserstände für zuvor festgelegte Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt (z. B. Arns et al. 2013a, Gönnert et al. 2012). Das Projekt EXTREMENESS geht darüber hinaus und betrachtet extreme meteorologische Bedingungen und Verstärkungsmechanismen, die zu eher unwahrscheinlichen, aber denkbaren Szenarien führen.

Dazu wurden zunächst aus einer Vielzahl existierender Beobachtungsdaten, Reanalysen und Klimaszenarienrechnungen extreme Sturmflutereignisse sowie die zugrundeliegenden meteorologischen Situationen identifiziert/selektiert. Anschließend wurde mit Hilfe von numerischen Modellstudien untersucht, inwieweit diese Ereignisse innerhalb physikalisch plausibler Grenzen zu noch extremeren Sturmfluten hätten führen können. Dabei wurden z. B. Effekte des Meeresspiegelanstiegs oder der Tatsache, dass der zeitliche Ablauf eines

Sturms unabhängig von der Tidephase ist, berücksichtigt (Ganske et al. 2018, Rudolph et al. 2019). Mit regionalen Stakeholdern der Stadt Emden wurde 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 wurden.

Das Projekt EXTREMENESS wurde dafür in fünf Teilprojekte (TP) gegliedert, die aufeinander aufbauend und zum Teil miteinander in wechselseitigen Iterationsschritten der übergeordneten Fragestellung nach Auswirkungen extremer Sturmfluten nachgehen. Im vorliegenden Beitrag wird die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier konzeptionell wie auch praktisch eng verzahnter Teilprojekte D und E in EXTREMENESS dargestellt. Das Gesamtprojekt EXTREMENESS und die detaillierte Projektstruktur wird im Übersichtsbeitrag von Weisse et al. (2019) in diesem Heft zusammengefasst. Die Untersuchung der meteorologischen und astronomischen Randbedingungen, die zur Genese extremer Sturmfluten beitragen, erfolgte in den TP A, B und C. Die Arbeiten dieser TP werden im Detail im Beitrag von Rudolph et al. (2019) in diesem Heft erläutert und eingeordnet.

Der vorliegende Beitrag befasst sich im Detail mit der Simulation der Konsequenzen extremer Sturmfluten am Beispiel der Stadt und des Umlands von Emden (TP D) sowie dem transdisziplinären Risikomanagementansatz (TP E). Durch eine enge Verzahnung der beiden Teilprojekte konnte zunächst ein Vertrauensverhältnis aufgebaut und ein guter Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis erreicht werden.

Die gelungene interdisziplinäre Zusammenarbeit basierte auf einem engen wissenschaftlichen, dialogorientierten und kooperativen Arbeitsprozess durch ein gemeinsam schrittweise abgestimmtes methodisches und empirisches Vorgehen von Workshop zu Workshop. Die Arbeiten des TP E wurden am Institut für Geographie der Universität Hamburg durchgeführt und sind in Kapitel 2 beschrieben. Das TP D wurde vom Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen bearbeitet und wird in Kapitel 3 erläutert. In Kapitel 4 wird schließlich am Beispiel der Emder Katastrophenschutzübung im Dezember 2018 gezeigt, wie die Forschungsarbeiten von EXTREMENESS bereits in die Praxis eingeflossen sind und sowohl für die Forschung als auch für die Praxis einen entscheidenden Mehrwert bieten. In Kapitel 5 sind die zentralen Erkenntnisse und Lehren der teilprojektübergreifenden, transdisziplinären Kooperation zusammengefasst.

2 Transdisziplinäres Risikomanagement

Unter *transdisziplinärem Risikomanagement* versteht man den gemeinsamen Umgang von Wissenschaft und Praxis mit Risiken. Es erweitert Risikomanagement in einer integrativen Form (vgl. Gerkenmeier und Ratter 2018). Dabei ist es wichtig, wie nachfolgend gezeigt wird, sich auf ein einheitliches Risikokonzept, eine gemeinsame Problemlage und eine methodische Vorgehensweise zu einigen.

2.1 Konzepte und Problemlage

Das Konzept Risiko ist unscharf und wird in verschiedenen Disziplinen uneinheitlich definiert. Risiko bedeutet sprachgeschichtlich „die Klippe, die es zu umschiffen gilt“ und wird

mit Wagnis, Gefahr, Unsicherheit, Verlust, Nachteil assoziiert (vgl. DWDS 2019). Alltags-sprachlich ist Risiko „eine in gewissem Maße bedrohliche Situation mit ungewissem Ausgang“ (Müller-Mahn 2007). Im Gegensatz zur Gefahr – der Bedrohung von außen – ist Risiko eine selbsteingegangene Bedrohung (Geipel 1992), d. h. Risiken geht man durch Entscheidungen ein, Gefahren ist man ausgesetzt (Reese-Schäfer 1996).

2.1.1 Risikobegriffe und Definitionen

EXTREMENESS unterscheidet die Begriffe „*objektives*“ und „*subjektives*“ Risiko und legt für den Projektzusammenhang folgende Definition fest: Ein objektives Risiko ist eine technisch-mathematisch berechenbare Konstruktion, die sich in der Risikoformel ($\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \times \text{möglicher Schaden}$) ausdrücken lässt (vgl. z. B. Renn 2008). Subjektive Risiken sind „Ergebnisse eines gesellschaftlichen Konstruktionsprozesses“ und mehr als Unsicherheit oder die Abwesenheit von Sicherheit (Beck 1986).

EXTREMENESS-D, -E verwenden das Konzept Risiko als individuelle, subjektive Konstruktion im Rahmen von Schadenspotentialanalysen und des gesellschaftlichen Managements und Umgangs mit diesen Risiken.

Risikomanagement umfasst die Handhabung und den Umgang mit Risiken (vgl. Gerkenmeier et al. 2017): Entscheidungen treffen, Unsicherheiten adressieren, Strategien entwickeln, umsetzen und dabei zwischen unterschiedlichen Interessen vermitteln. Es zielt darauf ab, sich an die Ursachen anzupassen und die Folgen zu mindern und integriert dabei bestehende Risikowahrnehmungen sowie unterschiedliche Interessen, verknüpft multiple Risiken und berücksichtigt gesellschaftliche, politische und kulturelle Rahmungen in einem sozialen Prozess (vgl. UNISDR 2015, DKKV 2000, Gerkenmeier und Ratter 2018).

Transdisziplinarität und deren wissenschaftliche Anwendung als *transdisziplinäre Forschung* ist ein Konzept im Bereich der Nachhaltigkeitswissenschaft. „Transdisziplinäre Forschung liefert Beiträge zur Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme. Sie ist dabei zwangsläufig interdisziplinär und vernetzt unterschiedliche Wissenschaftsdisziplinen. Zudem bezieht sie nichtwissenschaftliche Akteure des Problemfeldes in ihre Forschung ein, um zu umsetzbaren Handlungsempfehlungen zu kommen“ (Schneidewind und Singer-Brodowski 2014).

Die Verknüpfung beider Konzepte zu einem *transdisziplinären Risikomanagement* betont das gesellschaftliche Management und den kooperativen Umgang mit möglichen extremen Nordseesturmfluten und die gemeinsame Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen innerhalb der Wissenschaft (wie Klimaforschung, Küstenbauingenieure und Sozialwissenschaften) als *interdisziplinäre* und darüber hinaus unter Beteiligung nichtwissenschaftlicher Praxisakteure (wie regionale Entscheider und Fachleute im Küsten- und Katastrophenschutz) als *transdisziplinäre* Wissenschafts-Praxis-Kooperation in einem Wissenschafts-Praxis Kooperationsforum in Emden (*Science Stakeholder Cooperation Forum, SSCF*).

2.1.2 Multi-Risiko-Problemlage in der Region Ostfriesland

Die empirische Forschungsregion Emden-Krummhörn in Ostfriesland ist aufgrund ihrer besonderen geographischen Lage und historischen Entwicklung heute gleich von mehreren Risiken im Kontext des Wassers einer dauerhaften Bedrohung ausgesetzt (Ratter und Schaper 2019). Das fruchtbare Marschen-Land war ursprünglich als Teil der Nordsee von

Wasser bedeckt und konnte nur langsam, in einem Jahrhunderte andauernden Kampf der dort lebenden Menschen, dem Meer nach und nach, zunächst durch Warften und später durch Eindeichung, abgerungen werden (Behre 2014). Heute schützen meterhohe Deiche die gesamte Nordseeküste Ostfrieslands. Das dahinterliegende Land liegt in großen Teilen unter dem Meeresspiegel. Es würde ohne die Deiche wie eine „Badewanne“ durch einströmendes, salzhaltiges Nordseewasser volllaufen. Neben der meerseitigen Bedrohung, strömt Wasser noch aus mehreren Richtungen in die Region hinein: Über Niederschläge (Regen, Schnee) von oben, seitlich über Flüsse und Bäche aus dem Binnenland, und als aufsteigendes Grundwasser von unten. Da sich das Wasser in der Region sammelt, muss es ständig durch ein weit verzweigtes Entwässerungsnetz bestehend aus Kanälen, Gräben, Unterschöpfwerken, Schöpfwerken und Sielen nach außen in die Nordsee befördert werden, damit die Region nicht vollläuft. Das überschüssige Wasser kann entweder passiv bei niedriger Tide über Siele ins Meer fließen oder es muss aktiv von Schöpfwerken gegen einen Gradienten ins Meer gepumpt werden. Diese multiple Multi-Risiko-Problem- und Bedrohungslage ist in Ostfriesland dauerhaft gegeben und damit Alltag für die Menschen. Sicherere Deiche hin zur Meereseite und die Regulierung des Wasserstands durch eine ständige Entwässerung im Binnenland von Ostfriesland sind als Daseinsvorsorge für ein sicheres Leben der Menschen in der Region dauerhaft notwendig. In einem fortschreitenden Klimawandel mit einem Meeresspiegelanstieg und einer möglichen Zunahme von extremen Nordseesturmfluten oder Starkregen kann sich diese Gefahrenlage in der Zukunft verschärfen. Diese multiple Bedrohungslage ist Anlass und Ausgangslage für ein transdisziplinäres Realexperiment: die Gründung und Etablierung eines Forums in Emden, in dem Wissenschaft und Praxisakteure aus Küsten- und Katastrophenschutz gemeinsam in einem Prozess miteinander kooperieren und vertrauensvoll zusammenarbeiten, um in einem Gedankenexperiment den Umgang mit dem Udenkbaren und dem Extremen im Sturmflutrisikomanagement in einem geschlossenen und vertrauensvollen Kreis zu erproben und daraus mögliche Konsequenzen für den Küsten- und Katastrophenschutz zu ziehen. Aus der Vielfalt und Heterogenität der Risiken in einer von Wasser aus mehreren Seiten bedrohten Küstenlandschaft erwächst die Notwendigkeit, diese Problemlage gemeinsam von Wissenschaftlern, Fachleuten, Entscheidern und regional Betroffenen in einem kooperativen Lern-, Interaktions- und Diskussionsprozess zu bearbeiten.

2.1.3 Das Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (SSCF)

Die Gründung, Gestaltung und Analyse der transdisziplinären Zusammenarbeit in einem SSCF war der Kern des Teilprojekts EXTREMENESS-E, das folgende drei Ziele verfolgte:

- Analyse der bestehenden wahrgenommenen *Risiken* von Akteuren im Küsten- und Katastrophenschutz
- Kooperative Entwicklung von *Handlungsoptionen* im Sturmflutrisikomanagement
- Transdisziplinäre *Kooperation* zwischen Wissenschaft und Fachleuten im SSCF

Das geplante Kooperationsforum sollte ein geschlossener vertrauensvoller Raum für Entscheider und Beteiligte im Küsten- und Katastrophenschutz in Emden, ohne Öffentlichkeit, sein. In einem „freien Gedankenexperiment“ sollten die Mitglieder unwahrscheinliche aber mögliche Sturmflutszenarien gemeinsam denken, durchspielen und bewerten, um im

Dialog mit dem Kooperationsforum mögliche Reaktionsstrategien zu entwickeln, Handlungsoptionen zu bewerten und im transdisziplinären Austausch Horizonte und Handlungsfähigkeit zu erweitern. Die methodische Vorgehensweise zielte auf regelmäßigen Kontakt in Emden, gegenseitigen Wissensaustausch und einen wechselseitigen Lernprozess auf Basis persönlicher Interviews und moderierter Multi-Stakeholder-Workshops (Kapitel 2.2). Die inhaltlichen Rahmenbedingungen im Forum umfassten dabei die Unterscheidung zwischen Vorsorge (Prävention) und Emergency Response (reaktives Management), eine gemeinsame Suche nach sturmflutrelevanten Themen, die Entwicklung relevanter Szenarien und die Bewertung von Maßnahmen zum Sturmflutrisikomanagement. Ein besonderes Augenmerk wurde von Anfang an auf eine vertrauensvolle Zusammenarbeit und auf Vertraulichkeit gelegt: so sollte die Verwertung der Forschungsergebnisse nicht unabgestimmt während des laufenden Prozesses, sondern gemeinsam und im Austausch mit dem Forum im Nachhinein erfolgen. Ziel der Wissenschaft war es, aufgrund der politischen Brisanz des Themas keine Katastrophendramatisierung zu erzeugen und keine Angst in der regionalen Bevölkerung zu schüren.

Das Charakteristikum des SSCF ist die inter- und transdisziplinäre Zusammensetzung seiner Mitglieder. Neben wissenschaftlichen Akteuren aus verschiedenen Fachdisziplinen sind nichtwissenschaftliche Praxisakteure beteiligt. Dabei handelt es sich um Fachleute, Entscheider und Betroffene aus dem Küstenschutz, der Entwässerung und dem Katastrophenschutz in Ostfriesland sowie weitere relevante Akteure aus der regionalen Wirtschaft, der Verwaltung und dem Naturschutz. Die Auswahl der Mitglieder erfolgte im Rahmen der Vorstudie auf Basis qualitativer Interviews. Ziel war es, alle wichtigen Akteure zu beteiligen und zugleich auf ein handbares Maß (von ca. 20 Personen) zu begrenzen, um eine gute kooperative Zusammenarbeit der Mitglieder im Forum zu ermöglichen. Die Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung des SSCF anhand der beteiligten Institutionen in alphabetischer Reihenfolge.

Tabelle 1: Mitglieder im EXTREMENESS-Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum.

Mitglieder im EXTREMENESS-Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum (SSCF)
Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) Regionalverband Ostfriesland
Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW) Ortverband Emden
Deichacht Krummhörn
Deichacht Moormerland
GASSCO AS Branch Emden
Helmholtz-Zentrum Geesthacht – HZG (Institut für Küstenforschung)
I. Entwässerungsverband Emden
Landkreis Aurich (Deichbehörde, Fachdienst Katastrophenschutz)
Landwirtschaftlicher Hauptverein für Ostfriesland (Kreisverband Norden-Emden)
Niedersachsen Ports Emden
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Betriebsstelle Aurich, Norden, Forschungsstelle Küste Norderney)
Stadt Emden (Fachdienst Umwelt, Fachdienst Katastrophenschutz)
Universität Hamburg (Institut für Geographie)
Universität Siegen (Forschungsinstitut Wasser und Umwelt – fwu)
Volkswagen Emden
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden

Diese besondere Form einer anwendungs-, dialog- und praxisorientierten Zusammenarbeit verschiedener Fächer, Institutionen und unterschiedlicher Perspektiven sowie persönliche Einschätzungen auf eine regionalspezifische, multiple Risikogemengelage in Ostfriesland erfordert besondere Formen des risikobezogenen Umgangs, der persönlichen Kommunikation und des fachübergreifenden Wissensaustausches. Die Herausforderungen in dem transdisziplinären Forschungsprozess bestanden darin, bei den unterschiedlichen Personen vor Ort und ihren spezifischen Sichtweisen auf die Problemlage anzufangen, ihnen zunächst zuzuhören und sie dann für den weiteren Prozess zu gewinnen und langfristig mitzunehmen. Von diesen Herausforderungen und der methodischen und schrittweisen Vorgehensweise im SSCF wird im folgenden Abschnitt berichtet. Dabei werden die (Forschungs-) Ziele, der Methodeneinsatz und die Durchführung (Kapitel 2.2) sowie die erzielten Ergebnisse (Kapitel 2.3) und abgeleiteten Schlussfolgerungen (Kapitel 2.4) erläutert und begründet.

2.2 Methodische Vorgehensweise

Bei der Vorgehensweise im transdisziplinären Forschungsprozess im Rahmen des Teilprojekts EXTREMENESS-E wurden unterschiedliche Methoden der empirischen Sozialforschung sowie Moderationstechniken und Arbeitsmethoden in Kleingruppen verwendet.

Das Vorhaben EXTREMENESS-E umfasst die transdisziplinäre Bewertung unterschiedlicher (Sturmflut-) Risikomanagementoptionen im Küstenschutz der Region Emden-Krummhörn. Ziel ist die transdisziplinäre Kooperation und Bewertung von (Sturmflut-) Risiken und (Handlungs-) Optionen im Küsten- und Katastrophenschutz. Das TP E gliedert sich in eine Vorstudie und eine Hauptstudie.

2.2.1 Vorstudie: Die Mitglieder und ihre Sichtweisen im Kooperationsforum

Im Rahmen einer Vorstudie wurden mit den potenziellen Mitgliedern des Forums qualitative leitfadengestützte persönliche Face-to-face Interviews einzeln durchgeführt. Ziel war es, vertiefte Sichtweisen und persönliche Einschätzungen der Akteure zur Risikowahrnehmung und zu relevanten Themenbereichen im Kontext von Risikomanagement, Küsten- und Katastrophenschutz in Ostfriesland zu erfahren. Der Gesprächsleitfaden umfasste Fragen zu den folgenden sechs Themen:

1. *Region* (Heimat, Ortsbindung, Probleme und Bedrohungen)
2. *Extreme Sturmfluten* (denkbare Ereignisse, Szenarien, Auswirkungen)
3. *Risikoeinschätzung* (Küstenschutz, Deichsicherheit, Vulnerabilität, Klimawandel)
4. *Risikokonzept* (Maßnahmen, Akteure, Zuständigkeiten, Bevölkerung)
5. *Konflikte* (Streitpunkte, Akteure, Interessen)
6. *Kooperationsforum* (Ziele, Themen, Erwartungen, Wünsche, Mitglieder)

Die Interviews wurden aufgezeichnet, wörtlich transkribiert und analysiert. Sie lieferten differenzierte Akteurssichtweisen und spezifisches Wissen der Akteure, zudem regten sie die Befragten zum Nachdenken über die verschiedenen Themenbereiche an. Dies war wichtig, um bei den Befragten eine Reflexion über extreme Nordseesturmfluten zu initiieren und die Notwendigkeit und Zielsetzung von EXTREMENESS zu verdeutlichen. Die Ergebnisse der Interviews sind in ausgewählter Form in Kapitel 2.3.1 dargestellt.

Überdies ging es insbesondere darum, die Mitglieder kennenzulernen, gemeinsames Vertrauen aufzubauen und sie für den weiteren Prozess im Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforum zu gewinnen. Zudem wurden weitere relevante Akteure abgefragt, um einen vollständigen Kreis aller wichtigen Personen und Institutionen zu erhalten. Zusammengefasst lieferten die Interviews wertvolles Wissen und Einschätzungen zur gesamten Problemlage aus verschiedenen Perspektiven und Institutionen. Dieses umfangreiche akteursspezifische Wissen wurde nach qualitativer Datenanalyse und Auswertung der Interviews anhand ausgewählter Ergebnisse gleich zu Beginn des moderierten Workshop-Prozesses den Akteuren im Forum zurückgespiegelt, damit alle Akteure ein gemeinsames, wechselseitiges Problemverständnis hatten. Die Vorstudie war eine unabdingbare Voraussetzung und die Basis für den nachfolgenden Workshop-Prozess im Kooperationsforum im Rahmen der Hauptstudie, da in den persönlichen Gesprächen die vertrauensvolle Beziehung zu jedem Einzelnen geknüpft wurde, die notwendig war, um sich auf den mehrjährigen transdisziplinären Kooperationsprozess einzulassen und dauerhaft mitzuarbeiten.

2.2.2 Hauptstudie: Der Workshop-Prozess im Kooperationsforum

Der mehrjährige Workshop-Prozess im Kooperationsforum bildete den Kern der transdisziplinären Zusammenarbeit im EXTREMENESS-Projekt insgesamt und insbesondere zwischen den Teilprojekten EXTREMENESS-D und EXTREMENESS-E. In einer Reihe von drei moderierten Multi-Stakeholder-Workshops im Zeitraum von 2017 bis 2019 wurden mit den Mitgliedern des SSCF

1. extreme Sturmflutereignisse mit partizipativen Methoden identifiziert,
2. mögliche Auswirkungen dieser Ereignisse mit Hilfe von Szenario-Modellierungen der High-Impact-Events des fwu (TP D) im Kooperationsforum untersucht
3. und mögliche Anpassungsmaßnahmen und Konsequenzen für den Küsten- und Katastrophenschutz abgeleitet und evaluiert.

Ziel war es, schrittweise in einem iterativen Prozess, ausgehend von den Risikovorstellungen der Mitglieder, eine überschaubare Anzahl konkreter Extremereignisse zu identifizieren, die wichtigsten auszuwählen, diese anhand von narrativen Szenarien und Modellierungen zu veranschaulichen, die möglichen Auswirkungen zu analysieren und Handlungsnotwendigkeiten zu formulieren und zu bewerten. Die Workshop-Reihe fand in Emden zu den folgenden Themenbereichen statt:

I. Identifikation extremer Sturmflutereignisse und Risiken – Was ist denkbar?

Im November 2017 wurde das SSCF in der Stiftung Ökowerk Emden gegründet: Im ersten von der Universität Hamburg (UHH – Beate Ratter, Jürgen Schaper) durchgeführten und moderierten Workshop wurden extreme, denkbare Sturmflutereignisse und Risikovorstellungen der Mitglieder in Kleingruppen methodengestützt identifiziert, priorisiert und die drei wichtigsten Sturmflutereignisse anhand von narrativen Szenarien von den Mitgliedern im SSCF analysiert. Die Ergebnisse der Risikovorstellungen und Szenarien waren Grundlage sowohl für die Auswahl und Modellierung der extremen Ereignisse in den TP A-C (Rudolph et al. 2019), als auch für die Versagensmodellierungen (TP D des fwu) und den weiteren Workshop-Prozess in 2018.

II. Mögliche Auswirkungen extremer Nordseesturmfluten – Was passiert, wenn?

Im September 2018 fand der zweite Workshop des SSCF in Emden statt. 20 Fachleute und Entscheider sowie UHH, HZG und fwu haben erneut teilgenommen. Es wurden mögliche Auswirkungen extremer Nordseesturmfluten anhand der drei priorisierten Sturmflutereignisse mit den Mitgliedern im Forum analysiert. Dabei konnten neuralgische Punkte (kritische Stellen und Infrastrukturen wie Strom, Wasserversorgung, Entwässerung, Versorgung, Verkehr, Landwirtschaft u. a.) in der Region Emden-Krummhörn identifiziert werden. Die dynamischen Prozesse dieser möglichen Extremereignisse wurden anhand von Versagenskaskaden (Ereignisketten im Katastrophenfall) von den Mitgliedern antizipiert, diskutiert und mithilfe von numerischen Modellierungen (TP D) simuliert. Zudem wurden Beurteilungskriterien für erfolgreiche Maßnahmen im Katastrophenmanagement von den Akteuren im Forum erarbeitet. Es fand erneut ein intensiver Austausch und eine transdisziplinäre Zusammenarbeit sowie wechselseitiges Lernen zwischen den Praxisakteuren des institutionellen Küstenschutzes und den beteiligten Wissenschaftlern in dem geschlossenen vertrauensvollen Raum im SSCF statt. Die neuralgischen Punkte, Versagenskaskaden, Modellierungen und Beurteilungskriterien waren wichtige Ergebnisse und Grundlage für den dritten Workshop (vgl. dazu Kapitel 2.3.2).

III. Anpassungsmaßnahmen im Sturmflutrisikomanagement – Was tun?

Im dritten und letzten Workshop im März 2019 sollte der Umgang mit möglichen Maßnahmen erprobt und Handlungsnotwendigkeiten für die Praxis abgeleitet werden. Dazu wurde mit den Mitgliedern eine spielerische szenariobasierte Realitätssimulation durchgeführt. Im Planspiel „Schwarzer Schwan“ wurde ein denkbares, sehr extremes Katastrophenszenario schrittweise in mehreren Runden weiterentwickelt. Die Mitglieder verteilten sich auf fünf verschiedene Arbeitsgruppen mit unterschiedlichen funktionalen und räumlichen Zuständigkeiten. Sie mussten in jeder Runde, durch die Auswahl und den Einsatz geeigneter Maßnahmen und Mittel durch Dokumentation auf Moderationskarten und Visualisierung auf einer Metaplanwand die neuralgischen Punkte (kritische Infrastrukturen) in ihren (Zuständigkeits-) Bereichen (Stadt Emden, Hafen, Region Krummhörn, Entwässerung, Landwirtschaft) schützen. Ziel war es, durch die kooperative Zusammenarbeit innerhalb und zwischen den Gruppen sowie einen geeigneten Maßnahmeneinsatz, die Versagenskaskade(n) zu unterbrechen oder aufzuhalten und die neuralgischen Punkte vor dem (System-) Versagen zu bewahren. Das Planspiel lieferte wertvolle Hinweise zur Zusammenarbeit und zeigte Schwachstellen auf. Es gelang den meisten Arbeitsgruppen, aufgrund der hohen Intensität der Ereignisse, des vorgegebenen Zeitdrucks und der Dynamik an Veränderungen in den Versagensketten nicht, die neuralgischen Punkte dauerhaft zu schützen. In der nachfolgenden Diskussion und Reflexion wurden Handlungsnotwendigkeiten diskutiert und Schlussfolgerungen für den Umgang mit Extremereignissen gezogen. Diese zeigten Ähnlichkeiten zu den Erfahrungen der LÜKEX 15 Sturmflutübung insbesondere bei den Themen Evakuierung, Ausfall kritischer Infrastrukturen, Kommunikation und Warnung der Bevölkerung sowie Ressourcenmanagement (vgl. BBK 2019). Im Unterschied zur LÜKEX 2015 wurde der Fokus im Planspiel noch stärker auf den Umgang mit dynamischen Katastrophen bei Versagenskaskaden gelegt.

In der folgenden Abbildung 1 ist die transdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Wissenschaftler und der Multi-Stakeholder-Workshop-Prozess im SSCF schematisch dargestellt. Er verdeutlicht die iterative und wechselwirkende Vorgehensweise und die

Verknüpfungen zwischen den Teilprojekten EXTREMENESS-A, -B, -C, -D und -E. Darüber hinaus fand eine weitergehende Verbindung von EXTREMENESS mit der regionalen Praxis im Katastrophenmanagement der Stadt Emdden statt.

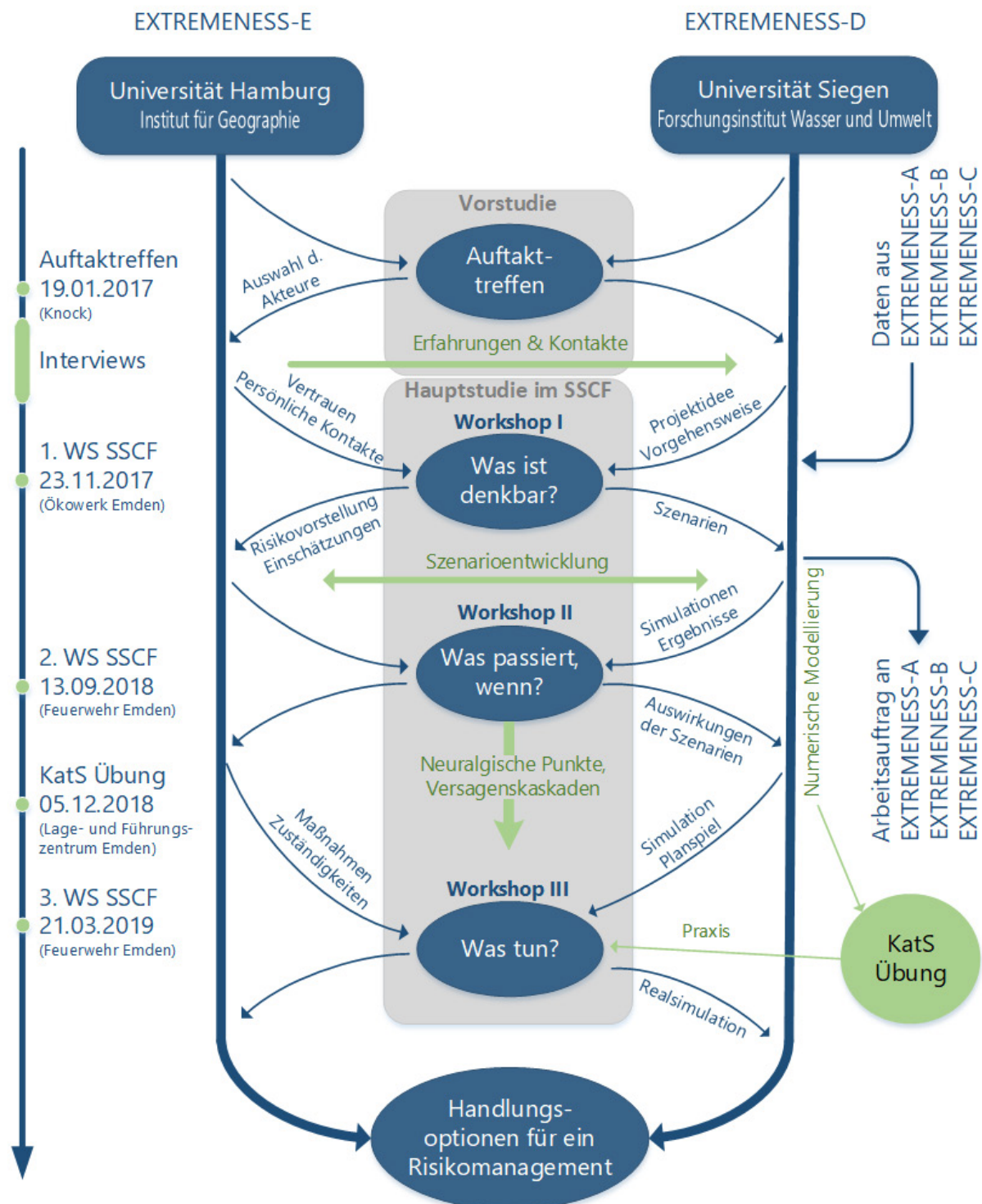


Abbildung 1: Der dreijährige Arbeits- und Forschungsprozess der transdisziplinären Zusammenarbeit im SSCF.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Vorstudie: 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 *Region* Emden-Krummhörn ist Heimat, Zuhause und Arbeitsort für viele Befragte. Leben hinter dem Deich bedeutet direkte Nachbarschaft zum Blanken Hans (der stürmischen Nordsee). Dies ist der Ort, an dem Familie und Freunde leben. Eine weite flache Marschenlandschaft, in der die fruchtbaren Marschböden eine gute Landwirtschaft ermöglichen. Die Region ist wie eine „Badewanne“ in weiten Teilen unter dem Meeresspiegel gelegen, die Menschen sind daher einer dauerhaften naturräumlichen Gefahrensituation ausgesetzt. Die Menschen begegnen sich ehrlich, hilfsbereit und auf Augenhöhe. Die Befragten schätzten die Ruhe und Gelassenheit der Menschen und dass man hier gut leben und arbeiten kann, wo andere Urlaub machen. Insgesamt besteht bei den meisten Befragten eine starke regionale Bindung und große Heimatverbundenheit zur Region. Bei den vergangenen *Sturmflutereignissen* wurde die Allerheiligenflut am 1. November 2006 als besonders bedeutsam wahrgenommen, da sie unerwartet hoch war, „aus dem Nichts kam“ und die Menschen überraschte. Das Wasser drang in den Hafen von Emden und zudem ins Schöpfwerk Knock (Höchstwasserstand: 5,13 m über Normalhöhennull, NHN). Aber, zusammenfassend wurde angemerkt: die Deiche hielten der Bedrohung zum Glück stand und es hätte nach Ansicht der Befragten noch schlimmer kommen können. Bei der *Risikoeinschätzung* bewerten die Befragten die Deichsicherheit und den Küstenschutz heute mehrheitlich als sehr hoch, aber langfristig gilt es, die Finanzierung dafür zu sichern. Die Befragten sind sich der dauerhaften Risikolage bewusst, aber das Sicherheitsgefühl und Vertrauen in den Küstenschutz und die zuständigen Institutionen ist groß. Das derzeitige *Risikokonzept* und die Zusammenarbeit im Küsten- und Katastrophenschutz werden als gut und wirksam eingeschätzt. *Konflikte* oder *gegensätzliche Interessen* werden zwischen Landwirtschaft (Deichsicherheit), Naturschutz, Tourismus und zugezogenen Anwohnern bei den Themen Deichbeweidung (Vieh), Teek (-abfuhr), Kleientnahme, Baumaßnahmen und Pflege der Entwässerungsgräben gesehen. Es wurde betont: Man redet miteinander und kommt insgesamt gut aus. Vom *Kooperationsforum* erhofften sich die Befragten u. a. neues Wissen und wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel und zur Deichsicherheit. Sie wünschten sich einen Austausch mit der Wissenschaft über aktuelle Erkenntnisse, zukünftige Entwicklungen, mögliche Schwachstellen und zu überprüfen, ob die Region wirklich sicher ist oder ob man nachbessern muss.

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 Mitglied im SSCF zu begleiten und zu unterstützen.

2.3.2 Hauptstudie: Ergebnisse des Multi-Stakeholder-Workshop-Prozesses

Die Ergebnisse in dem iterativen Workshop-Prozess und die schrittweise und wechselseitig bedingende Zusammenarbeit zwischen den Wissenschaftlern von HZG, UHH und fwu werden in diesem Teil gezeigt. Dabei werden die Ergebnisse und Resultate aus jedem Workshop zusammenfassend dargestellt. Zudem sollen die gemeinsame Zusammenarbeit der Zwischenschritte, d. h. die Nacharbeiten und Vorarbeiten für die Workshops von UHH und fwu als zentrales und erfolgreiches Ergebnis bei der Planung und Durchführung des gelungenen kollaborativen Arbeitsprozesses betont werden.

Workshop I: Identifizierung von Risikovorstellungen und Extremereignissen

Die Risikovorstellungen und Visionen der Akteure zu den schwersten vorstellbaren Extremereignissen wurden im ersten Workshop gesammelt, dokumentiert, priorisiert und anhand von narrativen Szenarien entwickelt. Das Verfahren umfasste mehrere Schritte und Methoden im Wechsel von Präsentationen, Kleingruppenarbeit und moderierten Gruppendiskussionen. Die folgende Tabelle 2 zeigt die Auswahl und letztlich die Priorisierung der identifizierten Extremereignisse durch die Akteure. Die drei in fett markierten Ereignisse sollten anschließend im Projekt konkretisiert und weiterverfolgt werden.

Tabelle 2: Auswahl und Priorisierung der identifizierten Extremereignisse durch die Akteure. Die drei fett markierten wurden im Projekt weiterverfolgt.

Identifizierte Extremereignisse und Priorisierung		
<i>Sturmflutereignisse (gesammelt)</i>	<i>Priorisierung</i>	<i>Bewertungspunkte</i>
Serie von kurz aufeinanderfolgenden Sturmfluten (Kette)		25
Eisdruck auf Deiche oder technische Bauwerke		3
Sommersturmfluten		2
Schiffshavarie in Deich einbrechend		15
Langanhaltende Niederschläge		1
Schäden im Deich durch Tiere (Nutria)		4
Beschleunigter Meeresspiegelanstieg		14
Technisches Versagen von Sperrwerken, Schleusen		15
Politische Fehlentscheidungen		0
Terrorangriff / Hackerattacken		0
Überspülung der Deiche auf längeren Abschnitten		4
Stromausfall / Versagen der Kommunikation		3
Falsche Wetter- oder Sturmflutvorhersagen		0
Epidemien, Seuchen		0
Fernwellen		7
Geotektonische Veränderungen (Gasentnahmen)		5
Ästuarerweiterung		0

Diese Extremereignisse (Serie von Sturmfluten bzw. Ketten-Sturmflut, Schiffshavarie und Technisches Versagen) wurden anschließend in den Arbeitsgruppen in Bezug auf mögliche Auswirkungen auf die Bereiche Mensch und Gesellschaft, Wirtschaft und Infrastruktur, Natur und Umwelt, Politik und Verwaltung diskutiert und daraus narrative Szenarien auf

der Metaplanwand entwickelt. Die entwickelten Narrative der Szenarioentwicklung werden nachfolgend wiedergegeben:

Szenario 1: Bei dem Szenario „*Ketten-Sturmfluten*“ treten drei extreme Sturmflutereignisse hintereinander *im Dollart* in einer Sturmflutkette auf. (Der erste Sturm verursacht eine Vorfüllung der Bucht mit Wasser durch Wind aus Nord-West. Der zweite Sturm mit Wind aus Nord bewirkt den Stau in der Ems. Und drittens tritt zudem ein Extremereignis, eine Springtide oder Fernwelle, über eine Dauer von 48 Stunden und Windgeschwindigkeiten > 30 m/s auf.) Es werden die Auswirkungen auf das Binnenland betrachtet unter der Vorgabe, dass der Deich hält (bzw. nicht bricht) und der Küstenschutz funktioniert. Ein Deichbruch und Versagen der Küstenschutzsysteme war in dem Szenario für die Beteiligten weder vorstellbar noch akzeptabel.

Szenario 2: Bei dem Szenario „*Schiffshavarie*“ (in den Deich einbrechend) treibt ein manövrierunfähiges Schiff infolge des Sturms in den Deich oder verliert Ladung (z. B. Container), die den Deich schädigen kann. Das Schiff kann dabei selbst in den Deich geraten. Der Ort der Deichschädigung ist dabei egal, da sich das Wasser prinzipiell immer am tiefsten Ort sammeln wird. Entscheidend aus Sicht der Akteure ist nicht, wo der Deich bricht, sondern wie groß das Loch ist, durch das das Wasser einströmt. Kleinere Elemente werden als gefährlicher angesehen, weil größere gleichzeitig auch eine blockierende Wirkung haben können. Problematisch wird es aus Sicht der Akteure, wenn der Sandkern der Deiche offengelegt wird und/oder Öl austritt. Für die weitere Betrachtung im Projekt soll sich die Schiffshavarie mit Deichbruch an der Krummhörner Westküste am Schardeich (ohne schützendes Vorland) *beim Campener Leuchtturm* ereignen.

Szenario 3: Das Szenario „*Technisches Versagen*“ bezieht sich auf das technische Versagen der Öffnungs- und Schließmechanismen von technischen Küstenschutzbauwerken (Schleusen, Sperrwerke oder Deichscharte) während einer Sturmflut. Hier wird das Versagen der *Großen Seeschleuse* in Emden betrachtet. Der Zeitpunkt im Worst-Case ist zwei Stunden vor Tide-Hochwasser. Durch den steigenden Wasserdruck kann die geöffnete Schleuse kaum noch manuell reguliert werden. Wasser strömt dann aus der Ems durch die Öffnung in den Emder Binnenhafen und weiter in die Stadt Emden.

Besonders gewinnbringend und aufschlussreich waren die transdisziplinären Diskussionen zwischen den Wissenschaftlern und Fachleuten bei der Identifizierung der Risikovorstellungen und Extremereignisse: Es wurde dabei deutlich, dass die beteiligten Wissenschaftler vorher andere Extremereignisse (besonders hohe Sturmfluten) im Blick hatten, als die die Fachleute im SSCF priorisierten (besonders lange Sturmfluten, Ketten-Sturmfluten, und Ereignisse höherer Gewalt). Für die Identifizierung und Konkretisierung der Extremereignisse, war der gewählte, szenariobasierte Ansatz der UHH besonders geeignet und hilfreich für den weiteren Prozess. Die identifizierten Extremereignisse wurden von allen gemeinsam entwickelt und getragen.

Die Szenarien wurden in Steckbriefen als narrative Erzählungen dokumentiert. Sie waren Grundlage für die Betrachtung möglicher Auswirkungen in und für die Region Emden-Krummhörn.

Workshop II: Entwicklung der Auswirkungen von Extremereignissen auf Versagenskaskaden und neuralgische Punkte

Im zweiten Workshop zum Thema „Mögliche Auswirkungen extremer Sturmflutereignisse – Was passiert, wenn?“ wurden die drei ausgewählten Extremszenarien aus dem ersten Workshop anhand ihrer Auswirkungen, denkbarer Ereignisabfolgen und kaskadischer Verkettungen auf neuralgische Punkte in der Region weiterentwickelt. Ziel war es, a) in drei transdisziplinär zusammengesetzten Arbeitsgruppen, für jedes einzelne Katastrophenszenario die Identifizierung der neuralgischen Punkte, die betroffen wären, wenn das jeweilige Extremereignis auftritt und b) die Erarbeitung von Versagenskaskaden für das Szenario in jeder Arbeitsgruppe. 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). 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 Tsunamis entstandene Nuklearkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 genannt). Diese sekundären Ereignisse sind mindestens so ernst wie das ursprüngliche Ereignis und tragen zur Dauer und zum Ausmaß der Katastrophe bei. Kaskadierende Katastrophen zeigen Schwachstellen (neuralgische, kritische Punkte) und Verwundbarkeiten der menschlichen Gesellschaft (vgl. Pescaroli und Alexander 2015).

Nachfolgend sind die identifizierten neuralgischen Punkte und die entwickelten Versagenskaskaden für jedes Szenario in der Region der Arbeitsgruppen dargestellt:

Neuralgische Punkte und Versagenskaskade im Szenario „Ketten-Sturmfluten“

Das Szenario Ketten-Sturmfluten erzeugt an der gesamten Küstenlinie sehr hohe Wasserstände über mehrere Tidehochwasser hinweg mit Überspülungen und Überflutungen an den niedrigsten Stellen oder an den Schädstellen nicht mehr wehrhafter, aufgeweichter Deiche. Das Wasser verteilt sich von dort in den Kanälen und Gräben des Entwässerungsnetzes flächig und sammelt sich zunächst an den niedrigsten Stellen in der gesamten Region Krummhörn und der Stadt Emden, die langsam vollläuft und überflutet. Neuralgische Punkte sind in der Region die besonders tiefliegenden *Ortschaften*, das *Entwässerungssystem* mit Sielen, Schleusen und Schöpfwerken (Greetsiel, Leysiel, Knock und Borssum), die *Stromerzeugung und Versorgung* (Kraftwerke, Umspannwerke und Transformatoren) und die *Wasserversorgung* (Klärwerk und Wasserspeicher). Weiterhin können die Gasversorgungseinrichtungen der GASSCO sowie die *Straßen und Schieneninfrastrukturen* in Stadt und Region überflutet werden. Damit sind die Verkehrswege unterbrochen. *Ländliche* wie landwirtschaftliche Flächen, Betriebe und Viehzucht, und *städtische Wirtschaftsstandorte* wie Volkswagen und der *Emder Hafen* sind ebenfalls neuralgische Punkte, die überflutet werden können. Straßenzüge stehen unter Wasser und behindern den Verkehr. Der Stromausfall führt zu starken Einschränkungen im gesellschaftlichen Leben, da beispielsweise Türen und Kassen in Supermärkten und viele andere öffentliche Einrichtungen nicht mehr funktionieren.

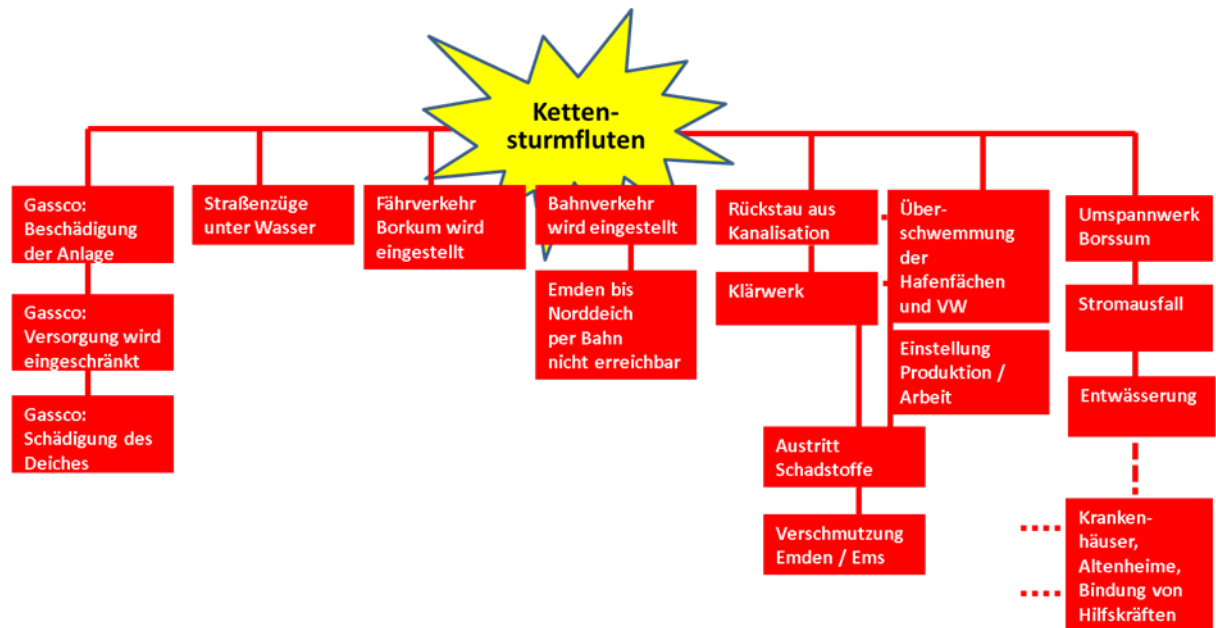


Abbildung 2: Versagenskaskade Szenario „Ketten-Sturmfluten“.

Neuralgische Punkte und Versagenskaskade im Szenario „Schiffshavarie“

Beim Szenario Schiffshavarie mit Deichbruch an der Krummhörner Westküste sind es die angrenzenden *betroffenen Ortschaften*, die in der Gefahrenlage zu evakuieren sind. Eine Evakuierung der regionalen *Viehbestände* in der Krummhörn wird vermutlich kaum möglich sein. Die *landwirtschaftlichen Flächen* und *Gräben* werden geflutet und können zudem auch nicht mehr als Lieferant für Futter und Trinkwasser für das Vieh dienen. In den regionalen *Gasanlagen* (Gaskavernen und Verdichtungsanlagen) wird Gas unterirdisch komprimiert gelagert und in einem Leitungsnetz bis nach Nordrhein-Westfalen geleitet. Unklar ist, was im Überflutungsfall dort passiert. Ein *Stromausfall* bedroht die *Pumpen der Schöpfwerke*, die *Melkmaschinen* der Viehzucht. Folgen der Überflutung wären Verlust von Tieren (Seuchengefahr), Versalzung von Ackerböden und Binnengewässern, Überflutung der Umspannwerke und Transformatoren. Der Stromausfall erzeugt weitreichende wirtschaftliche und soziale Folgen in der gesamten betroffenen Region.

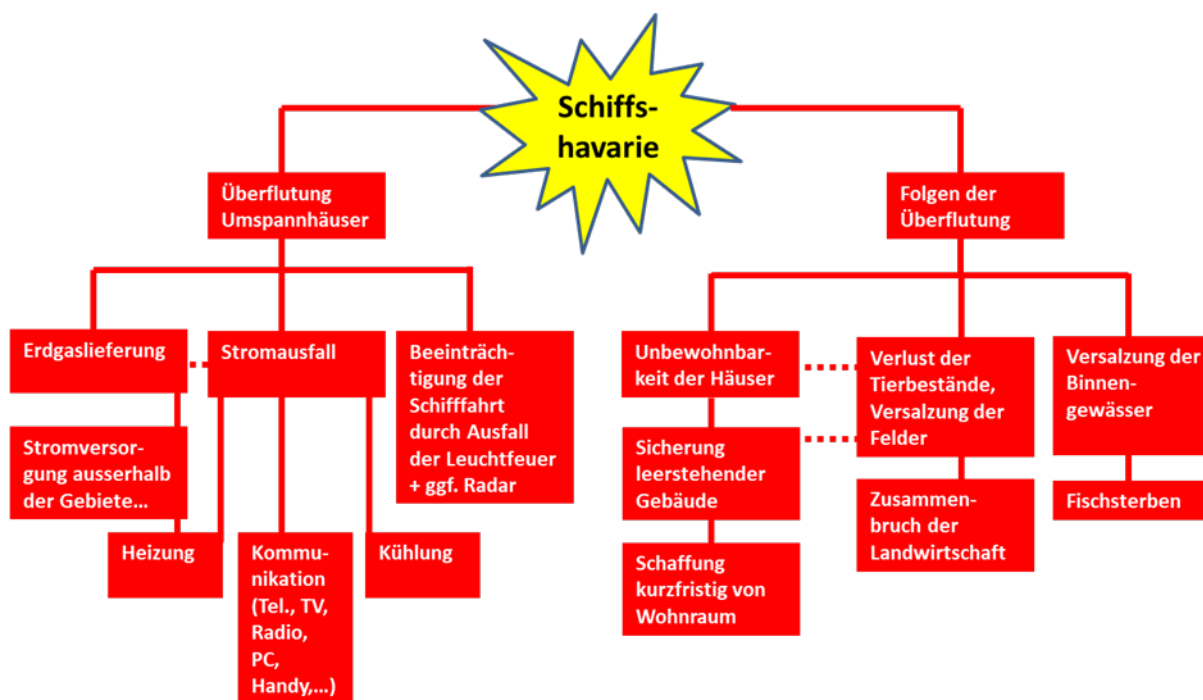


Abbildung 3: Versagenskaskade Szenario „Schiffshavarie“.

Neuralgische Punkte und Versagenskaskade im Szenario „Technisches Versagen“

Das Szenario Technisches Versagen der Großen Seeschleuse betrifft zunächst besonders die Stadt Emden und den Emdener Hafen, da hier das Wasser zuerst einströmt und sich ausbreitet, aber im weiteren Verlauf auch in der Region in die Fläche fließt. Ein besonderer Fokus lag bei diesem Szenario auf dem Gefährdungspotenzial von freigesetzten Giftstoffen und deren Auswirkungen. Bei der Kaskade wurden daher Umweltauswirkungen, Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur und die Wasserversorgung unterschieden. Für jeden Bereich wurden Verkettungen von Folgeereignissen und Konsequenzen für Menschen, Tiere, Umwelt und Infrastrukturen abgeleitet.

Neuralgische Punkte in der Stadt sind *Infrastruktureinrichtungen*, wie Straßen, Umspannwerke, Eisenbahnlinien, Klärwerk, das Reserveschöpfwerk Borssum. Zudem sind *soziale Einrichtungen* wie Schulen, Altenheime, die Feuerwehr und das Krankenhaus gefährdet. Neuralgische Punkte im Hafen sind ein Bauhof, ein Biomassekraftwerk, Düngerlager, die Treibstofftankanlage, eine Müllverladestation, eine Raffinerie und der Trinkwasserspeicher. Eine Überflutung im Hafen ist besonders gefährlich durch die mögliche Freisetzung von Giftstoffen (Chemie, Müll, Dünger, Öl).



Abbildung 4: Versagenskaskade „Technisches Versagen Seeschleuse“.

Für alle drei Szenarien kann festgehalten werden, dass drei wesentliche Klassen neuralgischer Punkte identifiziert wurden:

- kritische Infrastrukturen* (Strom, Gas, Wasser und Entwässerung einschließlich, wirtschaftlicher Produktionsstandorte (VW, Hafen, Landwirtschaft) und Verkehrsinfrastrukturen (Straße, Schiene), deren Ausfall weitreichende Folgen für die Region hat,
- gemeinschaftliche Versorgungseinrichtungen* (Altenheime, Schulen, Krankenhaus),
- direkte Nähe* (Ortschaften) und unmittelbare Betroffenheit (Mensch, Flächen, Vieh) zum Katastrophenereignis.

In der anschließenden Diskussion der Szenarien und den möglichen Auswirkungen deuteten einzelne Mitglieder im SSCF an, dass ihnen die entwickelten Extremereignisse nicht extrem genug waren. Die Szenarien seien alle noch im Bereich des Denkbaren. Da das Projekt EXTREMENESS aber das Undenkbare, Extreme bearbeiten wolle, wurden dazu die drei ausgewählten Szenarien in ihrem Verlauf in einer fortschreitenden Katastrophe miteinander kombiniert. Die Kombination und Wechselwirkung aller drei Extremereignisse in einem parallelen Zeitverlauf sollte ein sehr seltenes, aber mögliches Gesamt ereignis erzeugen. Aus der Diskussion konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Die Auswirkungen der drei Versagensereignisse nähern sich im Zeitverlauf und in der Wirkung für die Gesellschaft an. Nicht die Extremereignisse allein sind das zu bewältigende Problem im Katastrophenschutz, sondern lediglich der primäre Impuls und Auslöser für weitere

nachfolgende Ereignisse und Versagensketten. Die Probleme entstehen durch die Verwundbarkeit von Mensch, Tier und Infrastruktur. Verwundbarkeiten entscheiden über die Dauer und das Ausmaß einer Katastrophe.

Für den weiteren Prozess im SSCF stellte sich die Frage, welche Folgen die identifizierten neuralgischen Punkte und die entwickelten Versagenskaskaden für Prävention und Notfallplanung im Katastrophenmanagement haben und in welcher Form sie bei der Maßnahmenplanung berücksichtigt werden können.

Workshop III: Ableitung von Maßnahmen im Katastrophenmanagement beim Umgang mit Extremereignissen im Planspiel „Schwarzer Schwan“

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. 2014): Notfallmaßnahmen (*Emergency response*), Wiederherstellung (*Recovery*), Anpassung (*Longterm adaptation*) und Vorsorge (*Preparedness*) bei dynamischen Versagenskaskaden spielerisch in einem Realexperiment zu üben und nachfolgend zu bewerten: In einem gemeinsam von der UHH und fwu entwickelten und ausgestalteten Planspiel, dem ein in den TP A-C identifiziertes und modelliertes Extremereignis zugrunde liegt, haben die Akteure im dritten Workshop deshalb spielerisch in einer Realitätssimulation das Katastrophenmanagement und den Maßnahmenereinsatz während eines Extremereignisses geübt. Ziel des Workshops war 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 Kapitel 4). Im dritten Workshop wurde im Verlauf des Planspiels ein Multi-Katastrophenszenario in 14 Spielrunden vorgegeben. Dazu wurde der zeitliche Ablauf einer Sturmflutserie vorgegeben, in den schrittweise immer neue Ereignisse eingespielt wurden. Das Planspiel beinhaltete alle priorisierten Extremereignisse aus dem ersten Workshop und die neuralgischen Punkte und Versagenskaskaden aus dem zweiten Workshop. Es wurden fünf Kleingruppen gebildet, deren Zuständigkeit der Schutz unterschiedlicher neuralgischer Punkte war. Aufgabe war es, im Spielverlauf Maßnahmen zu identifizieren, zu treffen und einzusetzen, die die Versagenskaskade an den neuralgischen Punkten unterbrechen können. Ein Infoboard des fwu lieferte in jeder Spielrunde die zeitlich fortschreitende Entwicklung des Wasserstands (Ganglinie) sowie deren „Vorhersage“ für den nächsten Spielschritt und Informationen zur „Lage“, (Karten von Überflutungssimulationen infolge der Versagensereignisse). Den Gruppen standen dabei nur eine begrenzte, aber realistische, Ausstattung an Material, Personal und Finanzen, zur Verfügung, mit denen Maßnahmen eingeleitet werden konnten. Jede Gruppe verfügte zudem über eine topografische Karte des Gebietes mit den zu schützenden neuralgischen Punkten und eine Metaplanwand, auf der in jeder Runde der Maßnahmenereinsatz auf Karten notiert und gesammelt wurde. Während des Spiels hatten die Gruppen zudem die Möglichkeit der Kommunikation und Kooperation mit den anderen Arbeitsgruppen. Der Spielverlauf beinhaltete eine vorgegebene hohe Dynamik der Veränderungen und erzeugte damit beabsichtigten Zeitdruck bei den Beteiligten. Im Anschluss an das Spiel erfolgte eine Reflexion zur Aufarbeitung in den Gruppen (Fragen: Wurden die neuralgischen Punkte erfolgreich geschützt?

Wurde die Versagenskaskade unterbrochen? Was ist gut und nicht gut gelaufen? Was sollte anders laufen?) und im Plenum (Fragen: Welche Maßnahmen wurden (nicht) umgesetzt? (Wie) wurden die Probleme gelöst? Wurde die Versagenskette unterbrochen? War die Arbeit kooperativ?). Zudem wurden die Themen Verantwortung und Zuständigkeit sowie planerische und bauliche Vorsorgemaßnahmen (Prävention) diskutiert (Fragen: Welche Maßnahmen sind entscheidend, um die Kettenreaktionen zu verhindern oder zu unterbrechen? Welche Handlungsnotwendigkeiten ergeben sich für die Praxis? Wer muss was machen? Was muss getan werden?).

Diskutiert wurden für den Bereich planerische und bauliche Vorsorgemaßnahmen unter anderem der Einsatz mobiler Hochwasserschutzmaßnahmen, die rechtzeitige Information und Warnung der breiten Bevölkerung über geeignete Kanäle (Handy-App KAT-WARN, Mundpropaganda), die Öffentlichkeitsarbeit und Bildung an Schulen, Freiwilligenausbildung (Möglichkeiten und Grenzen), technische Sicherungssysteme (doppelte Pumpleistung) in der Entwässerung und stabile Deiche im Küstenschutz. Als Schlussfolgerungen für Handlungsnotwendigkeiten in der Praxis sowie Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten wurden genannt:

- mehr Schöpfleistung in der Entwässerung und mehr Redundanzen (Pumpen, Notstrom) sowie Schaffung der dafür notwendigen gesetzlichen Grundlagen
- Strom müsste stärker autark und dezentral verfügbar sein (z. B. in Krankenhäusern und in landwirtschaftlichen Viehzuchtbetrieben für Melkmaschinen)
- mehr Personal insbesondere im Hafen sinnvoll

Bei der Frage der Verantwortlichkeit wurde dies als eine gesellschaftliche Aufgabe angesehen, d. h. eine Verbände-Politik-Verwaltungsverantwortung. Fazit des dritten Workshops war, dass die neuralgischen Punkte zwar vereinzelt geschützt werden konnten, aber die Versagenskaskade aufgrund der großen Auswirkungen und der hohen Dynamik der Ereignisse nicht gestoppt werden konnte. Aus Sicht der Akteure wurde festgehalten, dass Vorbereitung (Prävention) wichtig und notwendig, aber nicht ausreichend ist. Prävention ist nicht gleich Schützen, d. h. notwendige Maßnahmen zur Vorbeugung und Verhütung können nicht unbedingt ausreichenden Schutz vor Versagensketten in dynamischen Katastrophen bieten, da die Auswirkungen und die Dynamik der multiplen Ereignisse zu hoch sind. Zudem wurde in der abschließenden Diskussion gemeinsam betont, dass Küstenschutz und Entwässerung immer zusammengehören und daher auch zusammen gedacht werden müssen.

2.4 Schlussfolgerungen zur transdisziplinären Zusammenarbeit

Zum Abschluss von Kapitel 2 werden die Erkenntnisse aus der transdisziplinären Kooperation für die beteiligten Wissenschaftler und Praxisakteure vorgestellt und der kooperative Mehrwert für die Akteure bilanziert. Welche Lehren (*Lessons Learnt*) und Schlüsse können aus der mehrjährigen transdisziplinären Zusammenarbeit im SSCF für die Zukunft gezogen werden?

1. *Interesse und Offenheit*: Zu Beginn des Prozesses war die gegenseitige Skepsis der Praxisakteure gegenüber den Wissenschaftlern noch vergleichsweise groß. Auf einem ersten Vorbereitungstreffen am Schöpfwerk Knock deuteten die Fachleute der Deichachten und der Entwässerungsverbände an, dass sie das Projekt

EXTREMENESS gerne unterstützen, Interesse an wissenschaftlichen Erkenntnissen haben und deshalb offen sind, aber sich auch einen praktischen Mehrwert für den regionalen Küstenschutz davon wünschen. Je länger der Prozess andauerte, desto größer wurde die gegenseitige Offenheit und Anerkennung auf allen Seiten.

2. *Vertrauen und Vertraulichkeit*: Ein Schlüssel für das Gelingen war das gegenseitige Vertrauen der Akteure untereinander (vgl. Edmondson und Levy 2019). Dieses war nicht von Anfang an da, sondern musste auf allen Seiten langsam wachsen und gebildet werden. Als vertrauensbildende Maßnahme werden die persönlichen Interviews der Vorstudie gewertet. Die Interviews waren die entscheidende Vorarbeit, um die Menschen kennenzulernen, akteursbezogenes Wissen und persönliche Sichtweisen zu erfahren, eine vertrauensvolle Beziehung aufzubauen und die Mitglieder für das SSCF zu gewinnen. Wichtig war ebenso der ehrliche Umgang miteinander während des Projektverlaufs. Mit dem Forum wurde ein vertrauensvoller, geschlossener Raum geschaffen und etabliert (vgl. dazu Gerkenmeier et al. 2017), in dem alle Beteiligten jederzeit frei denken, reden und handeln konnten, ohne Angst haben zu müssen, dass etwas Kritisches oder Udenkbares an Öffentlichkeit oder Medien gelangt. Es galt während des Prozesses die Vereinbarung, dass nichts ohne Zustimmung der Mitglieder das Forum nach außen verlässt. Nach dem letzten Workshop waren die Teilnehmer damit einverstanden und haben es sich auch gewünscht, dass die Ergebnisse publiziert werden.
3. *Menschen*: Die Bewohner der Region sind unserer Erfahrung nach charakterlich besonders kooperativ. In allen persönlichen Begegnungen der Zusammenarbeit waren sie immer sehr hilfsbereit, offen, zugewandt und kooperativ – niemals strategisch, ablehnend oder abweisend. Im Zuge des fortschreitenden Prozesses verstärkte sich diese Wahrnehmung und war entscheidend zum Gelingen im SSCF.
4. *Konfliktfähigkeit und Umgang*: Es gab zwischen den Akteuren unterschiedliche Meinungen und Vorstellungen in den Diskussionen, die aber nie einseitig, negativ oder destruktiv verhandelt wurden. Im Kern wurde bei der gemeinsamen, diskursiven Problembearbeitung immer „am gleichen Strang gezogen“, auch wenn sich Meinungen unterschieden haben.
5. *Wissen und voneinander lernen*: Die Workshops erzeugten einen moderierten Arbeits- und sozialen Lernprozess im Forum. Beide Seiten – Wissenschaft und Praxis – hatten ausreichend Zeit, um Wissen auszutauschen, Erfahrungen und Sichtweisen zu wechseln, Perspektiven des andern zu verstehen und in einem methodisch gesteuerten Prozess im Wechsel von Interviews, Vorträgen, Gruppenarbeit, Diskussionen, Exkursionen und informellen Runden (Pausengespräche und Mahlzeiten) in persönlicher Kommunikation und guter Atmosphäre miteinander zu reden und voneinander zu lernen. Wichtig war, dass jeder reden konnte und gehört wurde.
6. *Transdisziplinäre Vernetzung*: Die persönlichen Begegnungen und Diskussionen im kleinen Kreise in den Workshops förderten die Verknüpfung von Beziehungen und transdisziplinäre Vernetzung zwischen den Experten in Wissenschaft und Praxis. Die Netzwerkbildung förderte, dass die Akteure zukünftig bei

Sturmfluten bereits bestehende und erweiterte Netzwerke reaktivieren können und schnell im Risikomanagement handeln können. Zudem war die sehr gute interdisziplinäre Zusammenarbeit der wissenschaftlichen Partner entscheidend, für den gelungenen Workshop-Prozess im SSCF.

7. *Das „undenkbare“ Gedankenexperiment:* Ein entscheidender Grund für die erfolgreiche Zusammenarbeit war die Bereitschaft aller Beteiligten, sich auf das Experiment einzulassen, gemeinsam in einem mehrjährigen iterativen Arbeits- und Kooperations-Prozess, das Extreme und Undenkbare zu denken, Szenarien zu entwickeln und daraus Handlungsnotwendigkeiten und Konsequenzen zu ziehen. Dieser kontinuierliche Arbeitsprozess auf Basis von gegenseitigem Vertrauen, Verlässlichkeit, Ausdauer, Motivation und Dialog erzeugte die Offenheit, etwas Neues zu wagen, Undenkbare zu denken und auszuprobieren. Die Überwindung von gedanklichen Schranken und Grenzen im Kopf etablierter Routinen der Akteure war für manche eine große Herausforderung, aber letztlich ein entscheidender Erfolgsfaktor der transdisziplinären Zusammenarbeit.

Erfolgreiche transdisziplinäre Zusammenarbeit im Risikomanagement braucht einen langfristigen, sozialen Arbeits-, Kommunikations- und Interaktionsprozess auf Basis von Vertrauen, Erfahrung, Wissen und Kontinuität (vgl. Gerkenmeier und Ratter 2018).

3 Risikoanalyse möglicher Auswirkungen

Ein wesentlicher Grundstein der diskutierten transdisziplinären Zusammenarbeit war eine begleitende Risikoanalyse, d. h. die Abschätzung und Auswertung potenzieller Konsequenzen extremer Nordseesturmfluten. Aufgrund der Multi-Risiko-Situation in der Region Emden-Krummhörn (vgl. Kapitel 2.1.2) sind detaillierte Untersuchungen erforderlich, um das Schadenspotenzial zu erfassen und mögliche Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Im Rahmen früherer Forschungsprojekte wurden in der Modellregion bereits Untersuchungen zum Entwässerungsmanagement (Projekt KLEVER, Bormann et al. 2018, Spiekermann et al. 2018), zur drohenden Grundwasserversalzung (Projekt SALTSA, Karrasch und Schaper 2017) und zur nachhaltigen Landnutzung (Projekt COMTESS, Förster et al. 2015) durchgeführt. Die Betrachtung extremer Sturmfluten als weitere 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 (siehe Abbildung 1).

Im Folgenden wird zunächst der gewählte Ansatz für die Risikoanalyse erläutert und die zugrundeliegenden Sturmflutszenarien statistisch und wissenschaftlich eingeordnet. Die anschließend beschriebenen numerischen Modellierungen der Region Emden-Krummhörn gingen aus Workshop I hervor und stellten das Werkzeug zur Ermittlung der Schadenspotenziale dar. In den Schlussfolgerungen wird zudem, über die hier vorgestellten Modellierungen hinaus, auf die Veränderung des Risikos im Zuge des Klimawandels eingegangen.

3.1 Ansatz und Vorgehensweise

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. De Moel und Aerts (2011) zeigen, dass sich die einzelnen Unsicherheiten aufsummieren und die Ergebnisse einer Hochwasserschadensmodellierung bei Betrachtung absoluter Schadensgrößen mit dem Faktor 5 bis 6 variieren können. Deutlich robuster sind hingegen relative Betrachtungen, bei denen der Unterschied der Schäden zwischen zwei Szenarien betrachtet wird. Da die Unsicherheiten der grundlegenden Annahmen gleich bleiben, heben sich deren Auswirkungen auf das Ergebnis in der Vergleichsbetrachtung zum Großteil auf. Für die Abschätzung der Konsequenzen wurden deshalb relative Betrachtungen der Schadenspotenziale vorgenommen.

Die vorangegangenen Analysen der 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, Rudolph et al. 2019). 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 (siehe Abbildung 5). 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 Breschengeometrie 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 Sturmflut-szenarien. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Vorgehensweise genauer beschrieben.

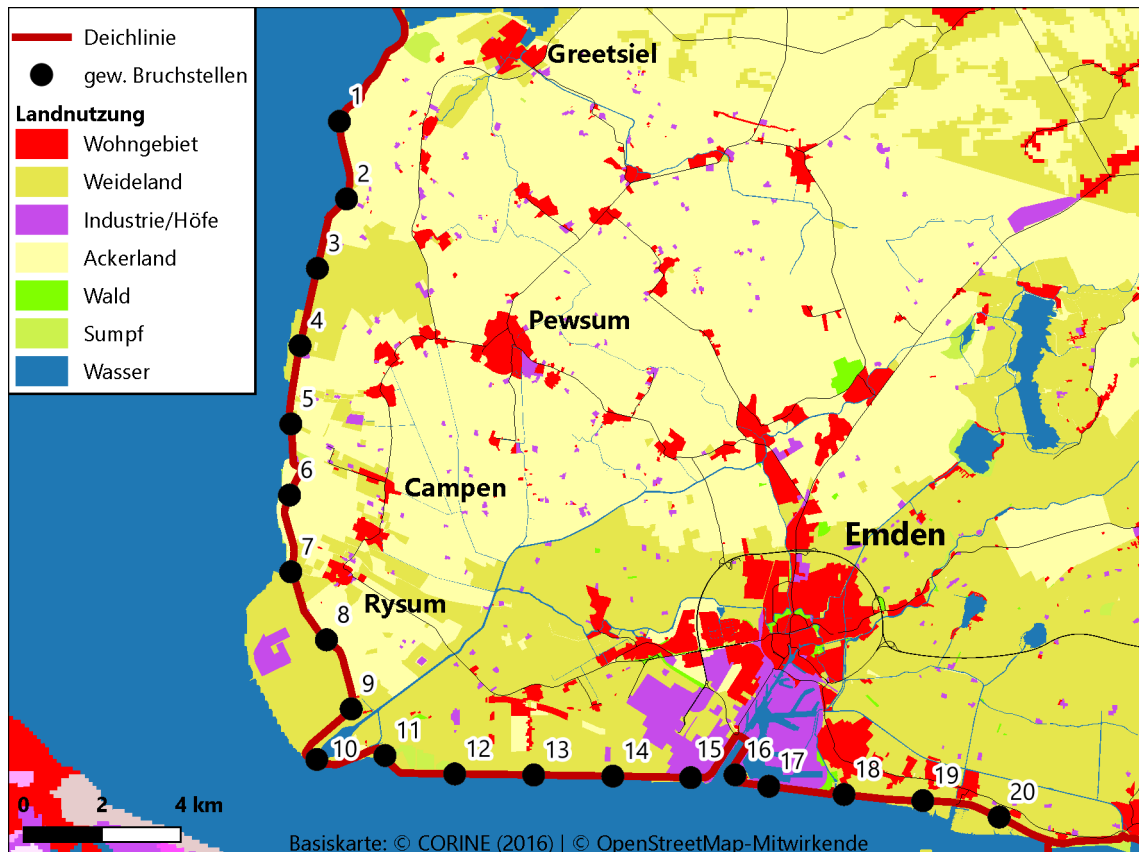


Abbildung 5: Untersuchte Bruchstellen (schwarze Punkte) entlang der Deichlinie (rot). Der Abstand zwischen den Bruchstellen, gemessen entlang der Deichlinie, beträgt jeweils ca. 2 km. Im Hintergrund liegt die Landnutzung aus CORINE (2016) und OSM (2018).

3.2 Sturmflutszenarien

Für die Schadenspotenzialanalysen, die im Workshop II für die Identifikation der neuralgischen Punkte herangezogen wurden, wurde eine relative Betrachtungsweise gewählt. Die abgeleiteten Schadenspotenziale wurden mit einem Referenzszenario verglichen und die Veränderung der Schadenspotenziale gegenüber diesem Referenzszenario wird schließlich als Bewertungskriterium herangezogen. Für das Referenzszenario werden die Wasserstände der bisher höchsten beobachteten Sturmflut vom 01.11.2006 unter Annahme identischer Abschnitte und Breschen verwendet. Die Verwendung dieses Ereignisses als Referenz bietet den Vorteil, dass Hochwasser und Sturm der Bevölkerung noch sehr gut in Erinnerung sind und ein Vergleich mit den im Rahmen des Projektes abgeleiteten Sturmfluten auch für Fachfremde greifbar und nachvollziehbar ist. Auch wenn die Deiche bei der Sturmflut 2006 praktisch nicht beschädigt wurden, wurde die besondere Bedeutung der Sturmflut durch die wiederholte Einschätzung der Teilnehmer des Forums, „*dass die Region bei dieser Sturmflut Glück gehabt*“ habe, deutlich.

Die Überflutungssimulationen wurden an allen gewählten Bruchstellen für jeweils drei Szenarien durchgeführt: das Referenzszenario mit den Sturmflutwasserständen von 2006 (hier: REF), das hohe Szenario nach Rudolph et al. (2019) (hier: HIGH) und das lange Szenario nach Rudolph et al. (2019) (hier: LONG). Für das Szenario HIGH wurde entsprechend der höchste Sturmflutwasserstand gewählt, der infolge der veränderten Randbedingungen im Emsästuar resultiert (siehe TP C). Im Bereich des Emder Hafens stellt sich beim HIGH-Szenario ein Wasserstand von 6,61 m ü. NHN ein und liegt damit 1,40 m über dem REF-Szenario. Die Abschätzungen und Modellrechnungen des vorangegangenen KFKI-Projekts MUSE erlauben eine Plausibilisierung dieses Szenariowasserstandes (Jensen et al. 2006). Dabei ergaben die 2006 durchgeführten Rechnungen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) einen Maximalwasserstand für Emden von 6,09 m ü. NHN für extreme Sturmflutwetterlagen. In Rudolph et al. (2019) konnten weitere Verstärkungsmechanismen identifiziert werden, sodass sich im HIGH-Szenario ein 52 cm höherer Wasserstand aufgrund der extremeren Randbedingungen einstellt. Für das LONG-Szenario wurde eine Wetterlage gewählt, die zu mehreren sehr hohen Tidehochwassern (Thw) in Serie führt und dementsprechend eine zeitlich andauernde bzw. über mehrere Tage immer wiederkehrend hohe Belastung der Deiche verursacht. Der maximale Wasserstand ist mit 5,96 m ü. NHN geringer als beim HIGH-Szenario, allerdings immer noch höher als beim REF-Vergleichsszenario und zudem folgen auf den Maximalwasserstand noch zwei weitere, ähnlich hohe Tidehochwasser (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Betrachtete Sturmflutszenarien.

Szenario	Scheitelwasserstand (Hafen Emden) [m ü. NHN]	Beschreibung
REF	5,21	Vergleichsszenario, Sturmflut vom 01.11.2006
HIGH	6,61	Das höchste ermittelte Thw
LONG	5,96; 4,85; 4,52	Drei sehr hohe Thw in Folge

Zur statistischen Einordnung der Extremwasserstände wurde basierend auf multidekadischen Aufzeichnungen am Pegel „Emden Neue Seeschleuse“ eine Extremwertstatistik erstellt. Dafür wurde die Schwellenwertmethode (engl. *Peak Over Threshold*, kurz POT) verwendet, d. h. betrachtet werden alle aufgezeichneten Tidehochwasser, die eine definierte Höhe (Schwellenwert) überschreiten. Diese Überschreitungen folgen, sofern der Schwellenwert groß genug gewählt wird, der verallgemeinerten Pareto-Verteilung, kurz GPD (engl. *Generalized Pareto Distribution*) (Coles 2001). Auf Basis der Untersuchungen von Arns et al. (2013b) wurde die POT-Stichprobe zunächst aus den 0,3 % höchsten Tidehochwassern gebildet (99,7-Perzentil). Durch ein Declustering wurden aufeinanderfolgende und dadurch als nicht unabhängig anzusehende Tidehochwasser auf einen einzelnen, maximalen Wert reduziert, sodass die Stichprobe die 118 höchsten Tidehochwasser enthält, was bei einer Zeitreihenlänge von 68 Jahren zu rund 1,74 Peaks pro Jahr führt. Die Parameter der GPD wurden über die Maximum Likelihood-Methode anhand der POT-Stichprobe geschätzt. Über die GPD lassen sich schließlich die Wiederkehrintervalle der Szenariowasserstände bestimmen (siehe Abbildung 6). Da die Szenariowasserstände deutlich über die bisherigen Beobachtungen hinausgehen, sind die extremwertstatistischen Einordnungen als

grobe Abschätzung zu verstehen. Die mit zunehmendem Wiederkehrintervall wachsenden Unsicherheiten sind am 95 %-Konfidenzintervall in Abbildung 6 erkennbar. Zur Prüfung der Sensitivität und zur Einschätzung des Konfidenzintervalls wurde der Schwellenwert deshalb im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung variiert (99,6- und 99,8-Perzentil). Hierbei wird deutlich, dass besonders bei Betrachtung der großen Wiederkehrintervalle die Wahl des Perzentils das Ergebnis der Statistik stark beeinflusst. Das 99,6-Perzentil enthält mehr Sturmfluthochwasser, sodass der untere Rand der Verteilung zu stark gewichtet wird und somit ein unrealistischer, progressiver Verlauf der GPD entsteht. Das 99,8-Perzentil hingegen führt zu einem degressiven Verlauf. Das gewählte 99,7-Perzentil führt zu einem annähernd linearen Verlauf. Die Untersuchungen von Arns et al. (2013b) zeigen, dass die Statistik auf Basis dieses Perzentils zu den robustesten, d. h. auch bei Veränderung der Stichprobe stabilen, Ergebnissen an der deutschen Nordseeküste führen.

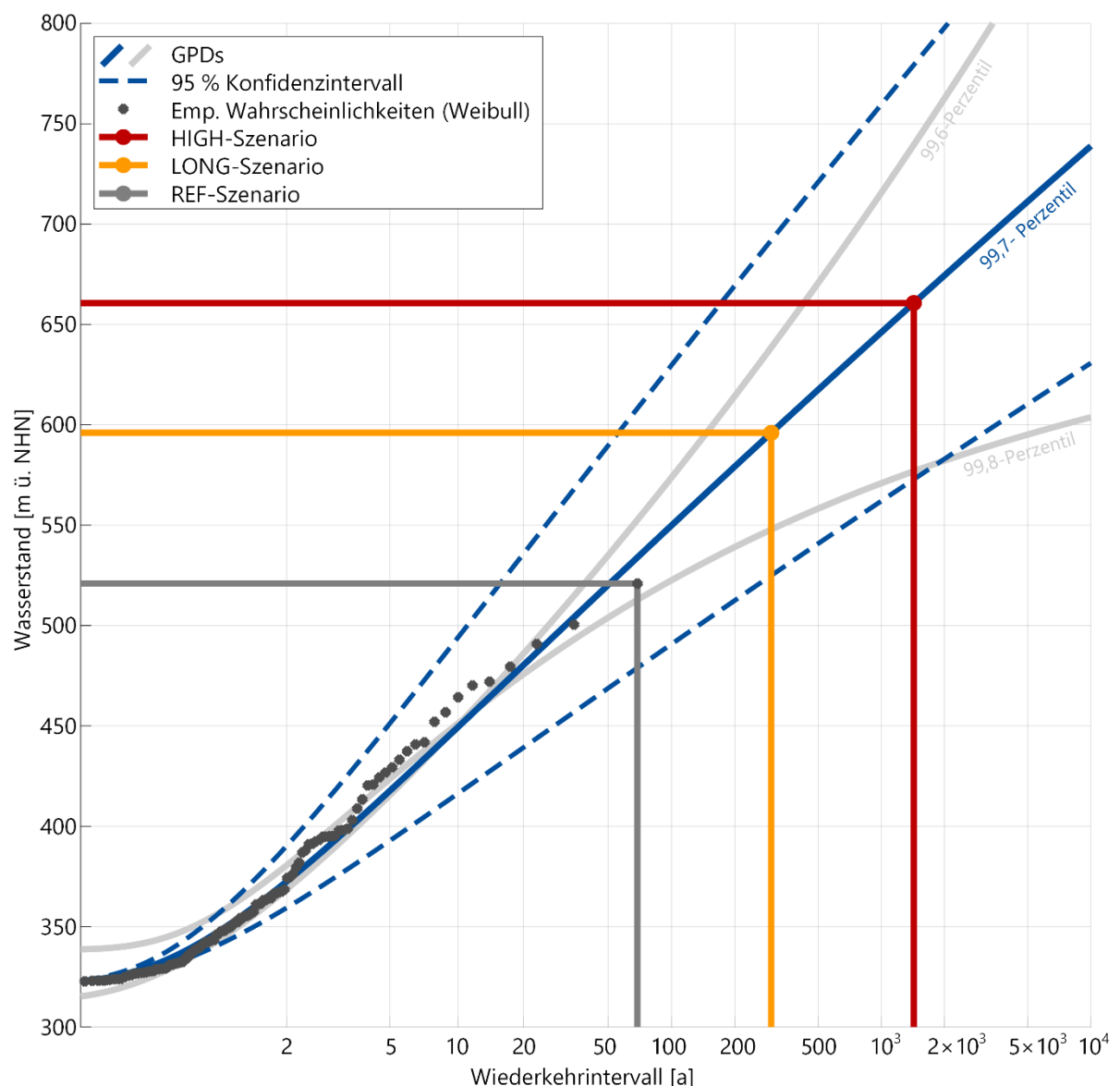


Abbildung 6: Extremwertstatistische Einordnung der Szenarien (nach Ulm et al. 2019).

3.3 Numerische Modellierung

Zur Simulation und anschließenden Analyse der möglichen Auswirkungen extremer Sturmfluten wurde ein zweidimensional hydrodynamisch-numerisches Modell der gewählten Modellregion Emden-Krummhörn erstellt. Die Simulation erfolgte mit der Software MIKE 21 des Herstellers DHI. Für das Pre- und Postprocessing wurden neben den integrierten Werkzeugen der Simulationssoftware insbesondere MATLAB® als Entwicklungsumgebung für die Verarbeitung großer Datenmengen und QGIS® als Geoinformationssystem eingesetzt.

Die Modellregion umfasst eine Fläche von rund 414 km². Für die Simulation der Überflutungen muss dieses Gebiet zunächst durch ein Rechengitter abgebildet werden, an dessen Zellen die eigentlichen Berechnungen durchgeführt werden. Die Wahl der Zellgröße hat dabei folgende Konsequenzen: Je kleiner die Zellen gewählt werden, desto besser können Details des Geländes abgebildet werden; im Vergleich zu einem gröber aufgelösten Rechengitter ist die Simulation jedoch langsamer, da an mehr Zellen Rechenoperationen durchgeführt werden müssen. Aufgrund der geplanten Vorgehensweise im Projekt, bei der verschiedene Sturmflutszenarien an verschiedenen Deichbruchstellen simuliert werden sollen und somit eine Vielzahl an Rechnungen nötig ist, ist eine Optimierung des Rechengitters hinsichtlich der Rechenzeit erforderlich. Die eingesetzte Software MIKE 21 erlaubt die Verwendung von unregelmäßigen Rechennetzen, die aus Dreieckszellen zusammengesetzt werden. Dies bietet den Vorteil, dass die Zellgröße nicht einheitlich sein muss, sondern flexibel an die örtlichen Strukturen angepasst werden kann („flexible mesh“).

In der Modellregion ergeben sich damit mehrere kleinräumige Strukturen, die ein dichteres Rechengitter erfordern. Insbesondere Wohnbebauungen in den Städten und Dörfern, die Industrieflächen, das weit verzweigte Netz aus Entwässerungskanälen und die Deichlinie können nur durch eine vergleichsweise hohe Gitterauflösung adäquat abgebildet werden. Die Wohn- und Industriebebauung muss darüber hinaus möglichst detailliert im Gitter abgebildet werden, damit eine realistische Darstellung der Überflutungsflächen und der anschließenden monetären Bewertung erreicht wird. Auch das Entwässerungsnetzwerk sollte möglichst detailliert im numerischen Modell abgebildet werden, da die Kanäle oft die einzigen Fließwege sind, über die anstehendes Wasser abgeführt wird. Um die Überflutungsflächen nicht zu überschätzen, ist eine möglichst genaue Abbildung der realen Situation erforderlich. Als entscheidendes Element für den Ursprung und die Ausbreitung der Überflutung muss zudem die Deichlinie in Lage und Höhe korrekt in das Modell integriert werden. Die großen landwirtschaftlich genutzten Flächen hingegen benötigen kein hochaufgelöstes Rechengitter. Da die Geländehöhen und Rauheiten auf diesen Flächen nur wenig variieren, können die Zellen des Rechengitters dort größer sein, ohne dass die Qualität der Simulationsergebnisse im primären Untersuchungsgebiet nachteilig beeinflusst wird. In MATLAB® wurde basierend auf Landnutzungsdaten ein Rechennetz erstellt, das die genannten Besonderheiten und Anforderungen berücksichtigt. Im Bereich der Städte wird eine Auflösung von bis zu 10 m erreicht, wohingegen die Zellen der landwirtschaftlichen Flächen Kantenlängen im Bereich von 60 bis 75 m aufweisen. Aufgrund des hohen Anteils an landwirtschaftlicher Fläche an der gesamten Modellfläche (ca. 78 %), kann dadurch die Rechenzeit des Modells deutlich verkürzt werden.

Für die Landnutzungsdaten wurde als Grundlage die frei verfügbaren Daten der OpenStreetMap-Datenbank (OSM 2018) verwendet. Die OSM-Daten werden von

freiwilligen Unterstützern gesammelt und basieren i. d. R. auf Ortskenntnissen bzw. Datensammlungen vor Ort und Luftbilddauswertungen. Neben den Landnutzungsdaten stehen auch Straßen-, Gewässer- und Gebäudedaten in der Datenbank zur Verfügung. Die OSM-Daten weisen in weiten Teilen des Modellgebiets einen hohen Detailgrad auf. Die Landnutzung steht dabei in Form von Polygonen zur Verfügung. Validiert und in lückenhaften Bereichen ergänzt wurden die OSM-Daten mithilfe der europaweit verfügbaren CORINE (2012)-Daten, die die Landnutzung mit einer Auflösung von 100 m beschreiben. Die Landnutzung wird schließlich auch zur Festlegung der Rauheiten herangezogen. Beispielsweise bieten Aigner und Bollrich (2015) eine gute Übersicht über die verschiedenen Rauheiten unterschiedlicher Oberflächen. Kaiser et al. (2011) schlüsseln die Landnutzungsarten im Küstenbereich detailliert auf und bietet somit gute Erfahrungswerte für die einzusteuernde Rauheit, speziell bei der Verwendung von MIKE 21 als Simulationssoftware. Mithilfe dieser Erfahrungswerte konnten im Rahmen der Modellerstellung realistische Werte für das Untersuchungsgebiet gewählt werden. Da Erfahrungswerte für großflächige Überflutungen der Region Emden oder vergleichbaren Flächen an der deutschen Küste nicht existieren, wurde die Leistungsfähigkeit des Modells und die Aussagekraft der Ergebnisse mithilfe einer Sensitivitätsanalyse plausibilisiert. Dazu wurden leichte Veränderungen an den Rauheiten vorgenommen und in wiederholenden Simulationen die daraus resultierende Veränderung der Ergebnisse analysiert.

Im Kontext der hier verfolgten Fragestellung werden des Weiteren präzise Informationen zu Geländehöhen benötigt, die aus mehreren digitalen Geländemodellen (DGM) zusammengestellt wurden und auf das Berechnungsgitter interpoliert wurden. Für die Bathymetrie im Emsästuar sowie für die angrenzenden Deiche wurde das Digitale Geländemodell des Wasserlaufes (DGM-W) der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes mit einer räumlichen Auflösung von 5 m verwendet (WSV 2015). Das Stadtgebiet Emdens wurde ebenfalls auf Basis eines DGM mit 5 m Gitterweite modelliert. Für sonstige Gebiete (insbesondere außerhalb der Stadt) wurden gröber aufgelösten Höhendaten genutzt (10 bis 15 m).

Die Simulation der Überflutungsflächen erfolgte sukzessive für alle Sturmflutszenarien und alle in Abbildung 5 markierten Deichbruchstellen. Die von der BAW (TP C) ermittelten Wasserstände im Emsästuar wurden am seeseitigen Rand des Modells eingesteuert und der Deichbruch für eine Deichbruchstelle durch ein Absenken des Deichelements auf die Deichfußhöhe abgebildet. Auf diese Weise wurden nacheinander alle 20 Deichbruchstellen simuliert. Die Entwicklung und Ausdehnung der Überflutungsflächen wurden für jeden Durchlauf kontinuierlich abgespeichert und zur weiteren (Schadenspotenzial-) Analyse in QGIS® aufbereitet.

Durch die Größe der Modellregion und der großräumigen Analyse der Simulationsergebnisse ist die zum Teil hohe Auflösung des Rechengitters für die Ergebnisdarstellung wenig geeignet. Zudem ist eine visuelle Beurteilung der Ergebnisse auf Basis des unmittelbaren Modelloutputs unpraktisch, da sich der Betrachter schnell in Details verliert, die jedoch aufgrund der Randbedingungen und Modellannahmen mit Unsicherheiten behaftet sind. Deshalb wurde ein separates, gröberes Gitter zur Ergebnisdarstellung entworfen. Das Gitter besteht aus achteckigen Zellen (Hexagone bzw. „Waben“) mit einem Innendurchmesser von 250 m. Durch die relativ großen Waben werden bei der Ergebnisdarstellung jeweils Gebäudekomplexe bzw. einzelne Straßenzüge zusammengefasst und damit den Modellunsicherheiten Rechnung getragen, indem stets ein Mittelwert über mehrere

Rechenzellen gebildet wird. Eine hexagonale Zerlegung der Ebene hat, im Gegensatz zu Viereck- oder regelmäßigen Dreiecksgittern, den Vorteil, dass alle benachbarten Zellen immer über eine Zellkante verbunden sind (Randall et al. 2002). Dadurch lassen sich unregelmäßige Strukturen, wie z. B. der Verlauf eines Kanals besser darstellen. Im Folgenden wird in allen Karten das Wabengitter zur Darstellung der Ergebnisse verwendet. Um den zugrundeliegenden Detaillierungsgrad zu erhalten, wurden die Berechnungen auf dem ursprünglichen Rechengitter durchgeführt. Die Zusammenfassung in übergeordnete räumliche Strukturen (hier Wabengitter) erfolgte aus o. g. Gründen lediglich im letzten Schritt.

3.4 Schadenspotenzialanalysen

Die Bewertung der Konsequenzen der simulierten Sturmflutszenarien erfolgte mithilfe von Schadenspotenzialanalysen. Für Workshop II wurden zwei im vorangegangenen Workshop festgelegte Bruchstellen besonders intensiv analysiert und ausgewertet, wie in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

3.4.1 Methodik und Datengrundlage

Mithilfe der hydrodynamisch-numerischen Simulationen werden Überflutungsflächen für drei Szenario-Sturmfluten an einer Vielzahl von Deichbruchstellen ermittelt. Allein die Größe der Überflutungsflächen ist jedoch kein aussagekräftiges Maß, um die tatsächlichen Folgen eines Szenarios zu beschreiben. Erst eine Verknüpfung der Überflutungsflächen mit den potentiellen, infolge der Überflutung resultierenden Schäden ergibt das Schadenspotenzial, d. h. ein Maß, mit dem die einzelnen Szenarien auf wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ebene bewertet werden können. Dabei werden in der Regel zwei Schadenskategorien differenziert: Tangible Schäden sind jene, die durch Kosten zur Behebung beschrieben werden können, während intangible Schäden nicht monetär erfasst werden können. Zudem wird unterschieden, ob die Schäden direkt auf die Einwirkung der Überflutung zurückgeführt werden können (direkte Schäden) oder ob die Schäden erst als Folge der Überflutung entstehen (indirekte Schäden) (Patt und Jüpner 2013). Somit sind zum Beispiel der Wertverlust eines Fahrzeugs oder die Kosten für die Trockenlegung und Renovierung eines Kellers direkte, tangible Schäden. In der Schadenspotenzialanalyse für die Modellregion werden zunächst direkte, tangible Schäden berücksichtigt. Anschließend werden zur weiteren Bewertung der Szenarien auch indirekte Schäden miteinbezogen.

Je nach Zielsetzung lässt sich der Detailgrad einer Schadenspotenzialanalyse praktisch beliebig steigern. Nicht unüblich ist eine Bewertung einzelner Gebäude in Abhängigkeit des Wasserstandes über Schadensfunktionen (BWK 2001, DWA 2008). Dies setzt jedoch detaillierte Informationen über die einzelnen Gebäude eines betroffenen Gebiets voraus. Aufgrund der Größe der Modellregion (rund 38.500 Gebäude-Objekte in OSM, 2018) wird im Projekt eine mesoskalige Betrachtungsweise gewählt, die hauptsächlich auf den Landnutzungsdaten basiert, jedoch um Gebäudedaten wie folgt erweitert wurde. Für die Ermittlung der möglichen Schäden wurden zunächst existierende Studien zusammengetragen. Kanig und Schröder (2014) haben eine makroskalige Schadenspotenzialanalyse für die deutsche Nordseeküste durchgeführt und stellen landnutzungsabhängige Schadenswerte bereit. Ebenso bieten der Rhein-Atlas (IKSR 2001), der Hochwasser-Aktionsplan Lippe (Hydrotec 2002) und Untersuchungen an der Diemel (StUA Bielefeld 2004)

Schadenswerte, die auf die Modellregion übertragen werden können. Da die Studien aus unterschiedlichen Jahren stammen, wurden die Schadenswerte zunächst um die Inflation bereinigt, auf das Jahr 2019 hochgerechnet und anschließend zu einem mittleren Schadenswert je Landnutzungskategorie zusammengeführt. In einem weiteren Schritt wurden die Gebäudedaten aus OSM (2018) genutzt, um die Bebauungsdichte der Wohngebiete zu berücksichtigen. Die alleinige Berücksichtigung des Schadenswertes je Landnutzungskategorie würde dazu führen, dass dicht bebauten Flächen der gleiche Schaden zugewiesen würde, wie einer Fläche, auf der nur wenige Wohnhäuser in größeren Abständen vorhanden sind. Dabei wurde ein mittlerer Schaden von 15.000 €/m² angesetzt, der sich aus einem Anteil für das Gebäude und einem Anteil für den Hausrat zusammensetzt. Zurückgegriffen wurde dafür auf eine Untersuchung des StUA Bielefeld (2004), in der durchschnittliche Werte für Deutschland angegeben sind. Der angesetzte Schadenswert für Wohngebiete erfasst dann sämtliche Schäden außerhalb von Gebäuden, wie z. B. an geparkten Fahrzeugen und Grundstücken sowie deren Infrastruktur. Die verwendeten Schadensmittelwerte sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die Kombination der Überflutungsflächen mit den für jede Rechenzelle ermittelten Schäden ergibt schließlich eine über Landnutzungs- und Gebäudedaten gewichtete räumliche Verteilung der Schadenspotenziale. Die in den Schadenswerten enthaltenen Unsicherheiten spielen durch die relative Betrachtung eine untergeordnete Rolle. Die für den Vergleich wichtige, möglichst exakte Zuordnung der Schäden wird durch die hochaufgelöste Geodatengrundlage erreicht, sodass die verschiedenen Überflutungen hinsichtlich ihrer Konsequenzen im Sinne von direkten tangiblen Schäden bewertet werden können.

Tabelle 4: Angesetzte Schadensmittelwerte zur Gewichtung der Überflutungsflächen.

Landnutzung	Schadenswert [€/m ²]
Wohngebiet	305,00
Industrie und landwirtschaftliche Höfe	749,00
Landwirtschaftliche Nutzfläche	3,56
Forst	0,83
Wohngebäude	15.000,00

3.4.2 Ergebnisse der Schadenspotenzialanalysen

Ein wesentlicher Fokus der Untersuchungen lag auf den Szenarien, die im Rahmen des ersten Workshops vom beteiligten SSCF ausgewählt wurden. Demnach sind die Bruchstellen 6 und 16 von besonderer Bedeutung (vgl. Karte in Abbildung 5). Bruchstelle 6 liegt in der Nähe des Campener Leuchtturms an einem scharliegenden Deichabschnitt. Der unterstellte Deichbruch an dieser Stelle kann dem Szenario „Schiffshavarie“ zugeordnet werden, bei dem beispielsweise direkt durch ein Schiff oder aber auch durch verlorene Ladung des Schiffes der Deichkörper vor oder während einer Sturmflut so stark geschädigt wird, dass der Deich bricht. Bruchstelle 16 liegt im Bereich der Großen Seeschleuse im Emder Hafen. Hier wird das Szenario „Technisches Versagen“ als Auslöser angenommen, bei dem durch die Seeschleuse unkontrolliert Wasser in das Hafenbecken strömt.

Für beide Szenarien sowie für die weiteren angenommenen Bruchstellen liegen simulierte Überflutungsflächen vor. Die Verknüpfung der Überflutungsflächen mit den potenziellen Schäden erfolgte schließlich für alle angenommenen Bruchstellen. Die Überflutungsfläche wird dabei als betroffene Fläche angegeben, die beschreibt, wie groß die von

der Überflutung betroffene Fläche bezogen auf die Gesamtfläche einer Wabe auf dem Wabengitter ist, ohne Berücksichtigung der Überflutungstiefe. Waben mit weniger als 10 % betroffener Fläche werden zudem in den folgenden Abbildungen der Übersichtlichkeit halber nicht mehr dargestellt. Für Bruchstelle 6 ist exemplarisch die Verteilung der Schäden in Abbildung 7 (rechts) neben der durch die Überflutung betroffenen Fläche (links) dargestellt.

Die insgesamt durch Schäden betroffene Fläche korrespondiert entsprechend mit der durch die Überflutung betroffenen Fläche. Gleichzeitig ist erkennbar, dass die größten Schäden besonders in Ortschaften und landwirtschaftlich genutzte Gebieten entstehen. Flächen mit Industrie- und landwirtschaftlicher Bebauung sowie Wohnbebauung sind im oberen Bereich der angegebenen Schadensspanne vorzufinden, wohingegen die monetären Schäden an landwirtschaftlich genutzter Fläche geringer ausfallen und das untere Ende der Spanne darstellen. Von der Überflutung betroffene Flächen ohne Schadensangaben sind darauf zurückzuführen, dass dort nur kleine Flächen betroffen sind, denen gleichzeitig ein geringer Schadenswert zugeordnet wird (z. B. Forst). Im Gegenzug treten vereinzelte Gebiete auf, deren betroffene Fläche sehr klein ist, jedoch werden dort z. B. aufgrund von sehr dichter Bebauung hohe Schadenswerte angesetzt, sodass in der Schadenskarte ein nennenswerter Schaden dargestellt wird.

Der Vergleich des REF-Szenarios mit den beiden extremen Sturmfluten aus dem HIGH- und dem LONG-Szenario (vgl. Abbildung 8) zeigt schließlich, dass bei diesen sehr hohen und außergewöhnlichen Sturmfluten die Überflutungen und Schäden deutlich zunehmen. Die im REF-Szenario bereits betroffenen Ortschaften bilden auch weiterhin den Kern des Schadensgebiets, jedoch führen die hohen seeseitigen Wasserstände dazu, dass die Überflutungsflächen deutlich größer werden. Die zahlreichen Entwässerungsgräben begünstigen dabei die Ausbreitung, bieten jedoch auch einen gewissen Schutz durch ein schnelles Abführen geringerer Wassermassen, wie am Beispiel des LONG-Szenarios erkennbar ist (Abbildung 8 rechts). Hier bildet das Knockster Tief die südliche Grenze des durch Überflutungen geschädigten Gebiets, da über das Schöpfwerk Knock im Südwesten Wasser abgeführt wird. Anhand des HIGH-Szenarios wird jedoch auch deutlich, dass diese Schutzfunktion des Entwässerungssystems begrenzt ist und bei höheren seeseitigen Wasserständen im Falle eines Deichbruchs auch über das Knockster Tief hinaus Überflutungen und damit verbundene Schäden möglich sind.

Die Ausdehnung der geschädigten Gebiete bietet dabei jedoch nur eine erste, visuelle Bewertungsmöglichkeit. Im Weiteren wird besonders das Verhältnis zwischen dem zu erwartenden Schaden beim REF-Szenario und dem Schaden beim HIGH- bzw. LONG-Szenario betrachtet, da durch diese Vorgehensweise die Unsicherheiten, die in den Schadensangaben enthalten sind, umgangen werden können. Über die gesamte Modellregion gemittelt zeigt sich, dass die Schäden im HIGH-Szenario in etwa 3-fach höher liegen als im REF-Szenario. Für das LONG-Szenario ist immerhin noch eine Verdopplung der Schäden zu verzeichnen. Die Vergrößerung der Schäden ist dabei sowohl auf den höheren seeseitigen Wasserstand beim Einströmen, als auch auf die längere Zeit zurückzuführen, in der der Wasserstand über der Deichfußhöhe liegt.

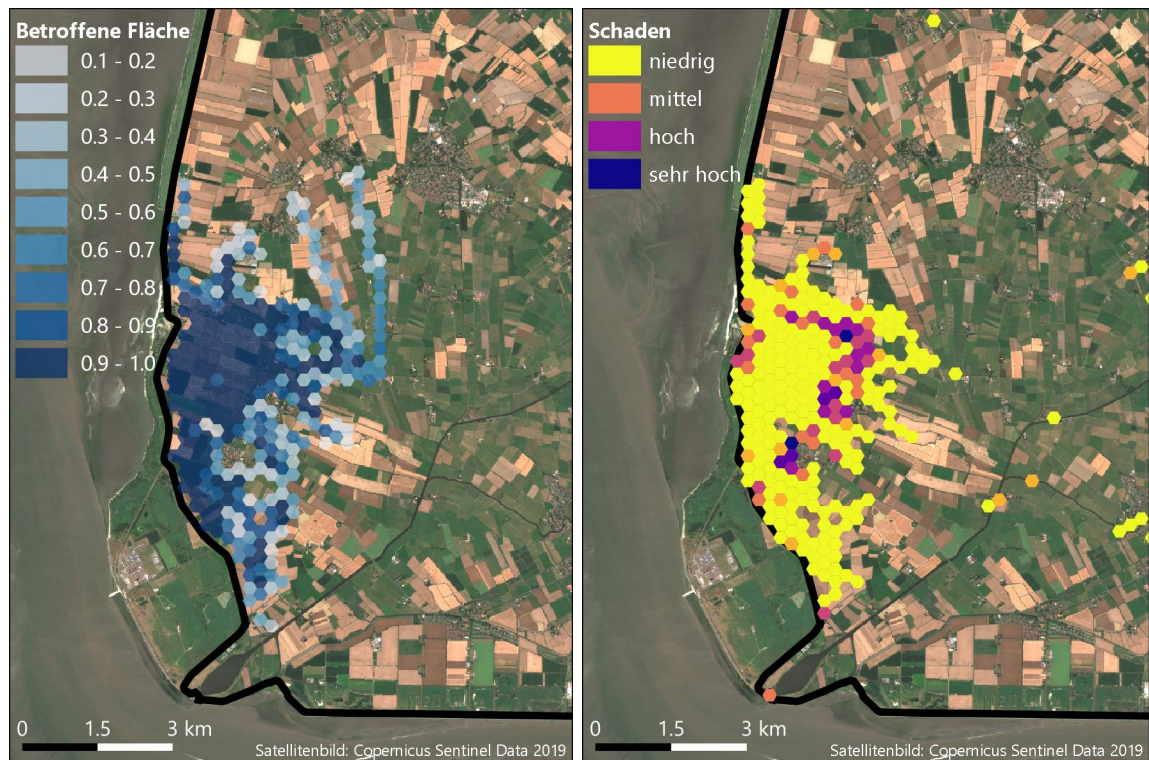


Abbildung 7: Betroffene Fläche (links) und Schäden (rechts) des Deichbruchszenarios an Bruchstelle 6 als Folge des REF-Sturmflutszenarios.

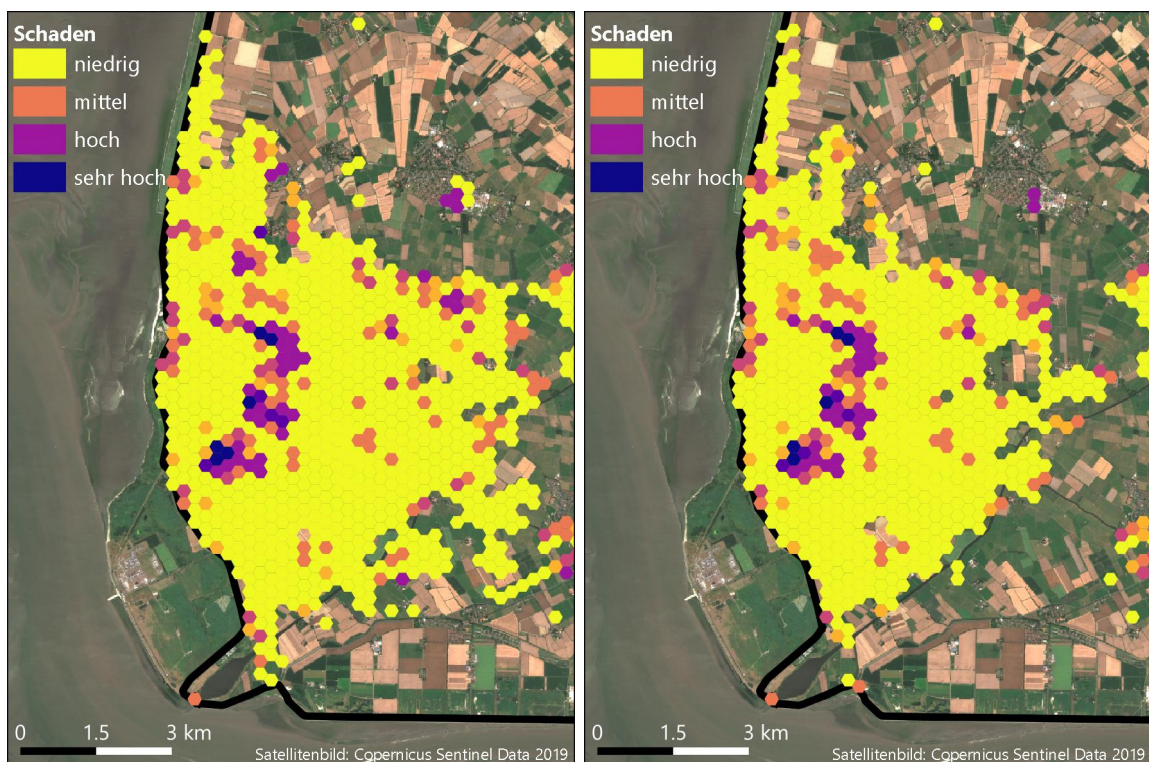


Abbildung 8: Schäden des Deichbruchszenarios an Bruchstelle 6 als Folge des HIGH-Sturmflutszenarios (links) und des LONG-Sturmflutszenarios (rechts).

Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Bruchstelle 16 im Bereich der Großen Seeschleuse im Emdener Hafen, die im Workshop I für das Szenario 3 „Technisches Versagen“ vom SSCF ausgewählt (vgl. Kapitel 2.3.2 Workshop I) und anschließend simuliert wurde. Jedoch ist

der Gesamtschaden in jedem Szenario (REF, HIGH, LONG) infolge der urban und industriell geprägten Landnutzung deutlich höher als bei Deichbruchstelle 6, wie in Abbildung 9 (links) dargestellt. Für das REF-Szenario beschränken sich die Schäden auf den Hafenbereich und die östlich gelegenen Gebiete (Abbildung 9 rechts). In den beiden Extremszenarien (Abbildung 10) sind hingegen große Teile des Emder Stadtgebietes betroffen. Auch hier zeigt sich, dass das Entwässerungssystem die Ausbreitung der Überflutungen begünstigt. In den eigentlich von der Deichbruchstelle weiter entfernt liegenden, kleineren Ortschaften treten lokal nennenswerte Schäden auf, da das eindringende Wasser durch das Entwässerungssystem im Hinterland verteilt wird. Die Ausbreitung entlang der Gräben führt dabei nur zu geringfügigen Schäden.

Darüber hinaus ergeben sich durch die im Hafengebiet angesiedelte kritische Infrastruktur weitere Auswirkungen, die im zweiten Workshop bei der Entwicklung der Versagenskaskaden diskutiert wurden. Die durch die Kaskaden zusätzlich entstandenen Schäden wurden in den Analysen nicht explizit erfasst, da eine monetäre Bewertung nicht in allen Fällen möglich war. Es erfolgte lediglich eine qualitative Bewertung. So sind bei den Szenarien HIGH und LONG sowohl die Wasserversorgung und -entsorgung, als auch die Stromversorgung und die wichtigsten Verkehrsverbindungen (Schiene, Autobahn) durch das eindringende Wasser betroffen. Potentiell resultieren hieraus einerseits direkte Konsequenzen für die Bevölkerung, z. B. durch fehlende Elektrizität, andererseits aber auch indirekt, da große Unternehmen und Arbeitgeber nicht mehr handlungsfähig oder erreichbar sind. Von der im Hafen angesiedelten Industrie geht zudem im Falle einer Überflutung auch eine nicht unerhebliche Umweltgefahr aus (Jensen et al. 2019).

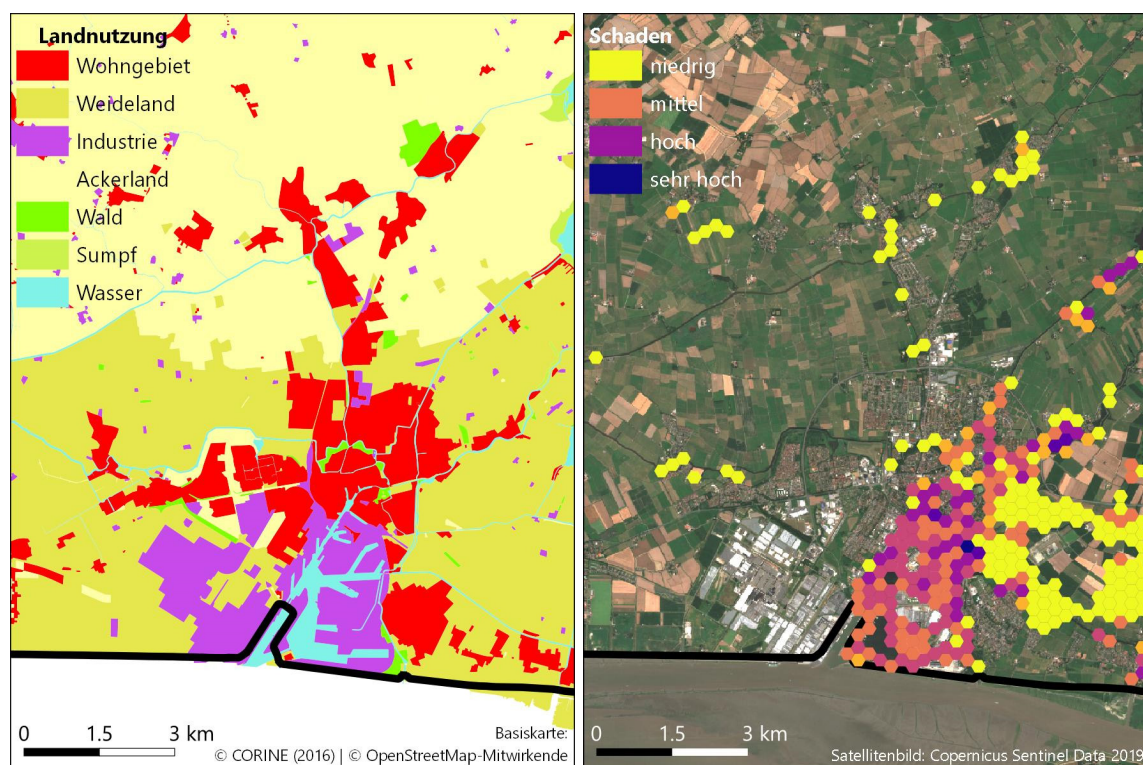


Abbildung 9: Landnutzung im Bereich der Stadt und des Emder Hafens (links) und Schäden (rechts) des Deichbruchszenarios an Bruchstelle 16 als Folge des REF-Sturmflutszenarios.

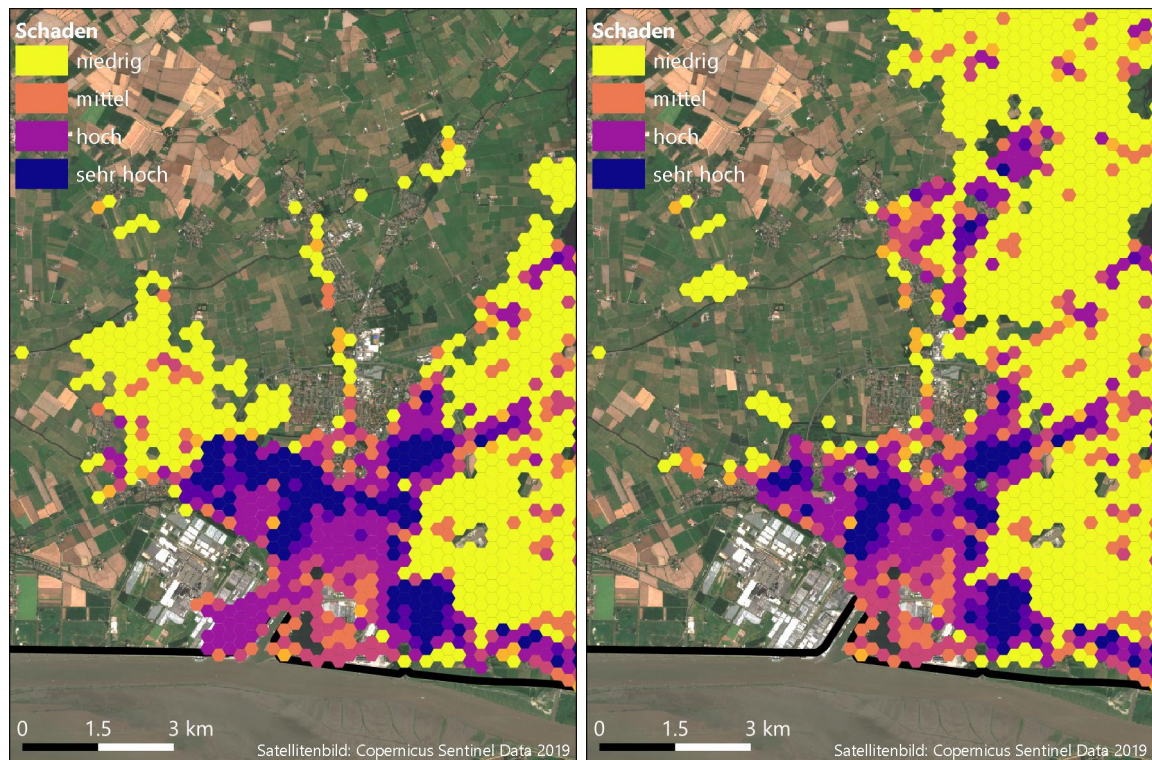


Abbildung 10: Ausschnitt der Schäden des Deichbruchszenarios an Bruchstelle 16 als Folge des HIGH-Sturmflutszenarios (links) und des LONG-Sturmflutszenarios (rechts).

3.5 Schlussfolgerungen zur Risikoanalyse möglicher Auswirkungen

Die in Kooperation mit dem SSCF durchgeführten Untersuchungen zu bislang unbeobachteten aber physikalisch möglichen Sturmfluten (Rudolph et al. 2019) 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 HIGH-Szenario, führen zu Wasserständen am Deich, die noch unterhalb der Deichkronenhöhe liegen. Lediglich ein weniger hoch ausgebauter Bereich am Emder Außenhafen wird beim HIGH-Szenario überströmt, was jedoch nur zu lokal begrenzten Überflutungen führt. Die Region ist deshalb insgesamt sehr gut gegen Sturmfluten geschützt.

Für die weitere Betrachtung im Projekt wurden Deichbruchszenarien angenommen, um der Frage „*Was passiert, wenn?*“ nachzugehen (vgl. Kapitel 2.3.2 Workshop II). Dabei zeigt sich, dass die schwerste, beobachtete Sturmflut der vergangenen Jahrzehnte (REF-Szenario) im Falle eines Deichbruchs zu nicht unerheblichen Schäden geführt hätte. Im Vergleich der möglichen Schäden wird deutlich, dass die extremen Sturmflutszenarien HIGH bzw. LONG zu einer Verdreifachung respektive Verdopplung der Schäden, bezogen auf das REF-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 (vgl. z. B. Weisse et al. 2012) bedeutet dies, dass Sturmfluten, die in der Schwere vergleichbar mit dem REF-Szenario sind, bei einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Zukunft ein größeres Schadenspotenzial aufweisen als heutzutage. Für das REF-Szenario an Bruchstelle 6 zeigt

sich beispielsweise, dass die gleiche Sturmflut bei einem angenommenen Anstieg des mittleren Meeresspiegels um 100 cm ca. 1,7-fach größere Fläche überfluten und (ähnlich wie im LONG-Szenario) zu einer Verdopplung der Schäden führen würde (Ulm et al. 2018a). Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch an den weiteren Deichbruchstellen. Zu berücksichtigen ist dabei insgesamt jedoch, dass sämtliche Schadensabschätzungen auf der heutigen Landnutzung basieren. Zukünftig entstehende Wohn- oder Industriegebiete vergrößern das Schadenspotenzial, können 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.

Im Rahmen der Workshops und mit dem dabei eingebrachten lokalen Fachwissen des SSCF wurden neuragische Punkte im Emdener Hafengebiet identifiziert, 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.

4 Praktische Anwendung: Katastrophenschutzübung Emden

Im Dezember 2018 fand eine Katastrophenübung der Stadt Emden statt, bei der den Projektbeteiligten die Möglichkeit gegeben wurde, beobachtend und unterstützend teilzunehmen. Die eintägige Übung erfolgte im Lagezentrum der Feuerwehrtechnischen Zentrale der Stadt Emden. 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 Multi-Versagensszenario, bei dem mehrere Gebiete in Emden und Umgebung infolge einer schweren Sturmflut, einer ungünstigen Westwind-Wetterlage und mehrerer verketteter Versagensereignisse zu 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, für das das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen ergänzende Überflutungssimulationen durchgeführt und der Übung zur Verfügung gestellt hat. Dabei wurde ein (im Vergleich zu den angenommenen Deichbrüchen im Projekt) kleinerer Schaden an einem Hochwasserschutzelement angenommen und die daraus resultierende Überflutung simuliert. Die speziell angefertigten 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.

Die Übung im Katastrophenstab der Stadt Emden wurde offen teilnehmend beobachtet und steht als weiteres Beispiel für die gewinnbringende und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis auf beiden Seiten auch jenseits des eigentlichen Projektrahmens von EXTREMENESS. Sie zeigt beispielhaft den wechselseitigen Wissenstransfer zwischen Forschern und Praktikern: Das Projekt EXTREMENESS lieferte

wissenschaftliche Erkenntnisse und Daten in Form von Versagensmodellierungen sowie Ansätzen der narrativen Szenarioentwicklung, die in die Übung einfließen. Gleichsam lieferte die teilnehmende Beobachtung des Realexperiments wichtige Einblicke in die praktische Stabsarbeit im Katastrophenmanagement der Stadt Emden (vgl. Ulm et al. 2018b). Die Übung war zudem weiterer Impulsgeber für das Planspiel „Schwarzer Schwan“ im dritten Workshop, bei dem der Umgang des Katastrophenmanagements mit einer extremen Sturmflut im Rahmen einer Realitätssimulation im SSCF spielerisch erprobt und evaluiert wurde.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Region Ostfriesland steht vor wachsenden Herausforderungen im Umgang mit hydrologischen Risiken. Bereits heute ist diese besondere Küstenlandschaft einer multiplen Risikolage mit Wasser von mehreren Seiten ausgesetzt. Zukünftig könnte sich diese Bedrohungslage bei einem fortschreitenden Klimawandel mit einem Meeresspiegelanstieg sowie der Zunahme von Extremereignissen noch verschärfen. Daher sind neue Formen eines transdisziplinären Risikomanagements notwendig, um den Umgang mit extremen Nordseesturmfluten im Küsten- und Katastrophenschutz zu erforschen und zu erproben. Das Science Stakeholder Cooperation Forum (SSCF) im Projekt EXTREMENESS-D und E bezeugt eine gelungene Wissenschafts-Praxis-Kooperation. Im Rahmen eines dreijährigen Forschungs- und Arbeitsprozesses im SSCF wurden zwischen Wissenschaftlern und Küstenschutzern aus der Region Emden und Krummhörn gemeinsam neue Wege der transdisziplinären Zusammenarbeit beschritten, die auf gegenseitiger Offenheit und wechselseitigem Vertrauen basiert. In enger Zusammenarbeit wurden 1.) seltene, denkbare Sturmflutereignisse und Risiken in der Region Emden und Krummhörn identifiziert, 2.) mögliche Auswirkungen und Konsequenzen für den Küsten- und Katastrophenschutz exemplarisch untersucht und 3.) mögliche Anpassungsmaßnahmen im Sturmflutrisikomanagement spielerisch erprobt und Handlungsnotwendigkeiten für die Praxis diskursiv bewertet.

Zentrale Ergebnisse und Erkenntnisse im SSCF sind: Der derzeitige Küstenschutz in Ostfriesland ist funktionsfähig: Die heutigen Deiche an der Küstenlinie sind sicher, wehrhaft, (mit wenigen Ausnahmen) aktuell hoch genug. Das System Küstenschutz in Ostfriesland ist damit gegenwärtig gut aufgestellt. Forschungsbedarfe bestehen aber weiterhin und dauerhaft, um die Sicherheit der Region auch in Zukunft mit einem fortschreitenden Meeresspiegel und bei einer möglichen Zunahme von Extremereignissen im Klimawandel langfristig und nachhaltig zu gewährleisten. Neben der Finanzierungsfrage ist insbesondere der Umgang der Akteure im Risikomanagement mit dynamischen, kaskadenartigen Katastrophen und deren Auswirkungen auf neuralgische Punkte (kritische Infrastrukturen wie Strom-, Gas- und Wasserversorgung oder Entwässerung und Verkehrswege) weiter zu erforschen.

Ein transdisziplinäres Risikomanagement muss zudem zukünftig die Gefahren von Nordseesturmfluten und Binnenhochwasser intensiver zusammen betrachten. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, wie in einem szenariobasierten Ansatz extreme Nordseesturmfluten und Katastrophenereignisse unter Berücksichtigung von Niederschlägen, Grundwasser und Flussbinnenhochwasser modelliert und in einem transdisziplinären Ansatz analysiert und bewertet werden können.

Der Erfolg im Forum basierte insbesondere darauf, dass die Beteiligten sich darauf einließen und dabei geblieben sind, um den Umgang mit dem Udenkbaren und Extremen zu üben und dabei einen Schritt weiter als üblicherweise gedacht haben. Durch die Überwindung von institutionellen Routinen und persönlichen Gedankengrenzen, konnten Wissenschaft und Praxis gemeinsam über den Bereich des Normalen hinausschauen und zudem ein breiteres Netzwerk zwischen regionalem Küsten-, Katastrophenschutz, Entwässerung mit Wissenschaftlern verschiedener Fächer in Ostfriesland knüpfen. Ein Realexperiment der Praxis in Form einer Katastrophenübung der Stadt Emden ergänzte zusätzlich den erfolgreichen Wissenschafts-Praxis-Transfer in beide Richtungen und ermöglichte einen neuen Umgang mit extremen Nordseesturmfluten in einem transdisziplinären Risikomanagement in Ostfriesland.

Ohne die vertrauensvolle Zusammenarbeit und den Austausch der beiden Akteursgruppen, Wissenschaft und Praxis, wäre eine vergleichbare Forschungs- und zudem praxisrelevante anwendungsorientierte Szenarioentwicklung nicht möglich gewesen. Der gemeinsame Mehrwert der Arbeit im SSCF bestand aus Wissen, Lernen und Vernetzung. Dies wurde von allen Seiten als zentraler transdisziplinärer Gewinn betont. Das SSCF in Emden steht modellhaft als Best-Practice-Beispiel und kann als Vorbild für weitere transdisziplinäre Forschungen bei multiplen Risikolagen in vergleichbaren Küstenregionen dienen.

6 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF für die gewährte Finanzierung im Rahmen der Fördermaßnahme „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee“ im Rahmenprogramm FONA 3 (Förderkennzeichen 03F0758B und 03F0758C). Wir danken der Stadt und der Feuerwehr Emden, besonders Hartmut Freseman, Christian Federolf und Holger Schuster für die ausgesprochen gute Zusammenarbeit, ihre große Hilfsbereitschaft und die sehr gute Unterstützung. Wir danken allen Mitgliedern des Wissenschafts-Praxis-Kooperationsforums in Emden für die mehrjährige Mitarbeit, die Offenheit, das gegenseitige Vertrauen und das große Engagement über den gesamten Projektzeitraum. Dies waren im Einzelnen Vertreter der Stadt Emden und von den Fachdiensten Umwelt sowie Brand-, Zivil- und Katastrophenschutz, die Deichacht Krummhörn, die Moormerländer Deichacht Oldersum, der I. Entwässerungsverband Emden, die Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW)-Ortsverband Emden, Niedersachsen Ports Emden, das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden, der NLWKN Betriebsstelle Aurich und Forschungsstelle Küste (FSK) Norderney, der Landkreis Aurich (Amt für Kreisstraßen, Wasserwirtschaft und Deiche; Abt. f. Zivil- und Feuerschutz, Rettungsdienst), der Landwirtschaftliche Hauptverein für Ostfriesland, der BUND-Regionalverband Ostfriesland, Gassco AS German Branch Emden und Volkswagen Emden. Ohne sie hätte die Wissenschafts-Praxis-Kooperation nicht stattgefunden. Wir danken darüber hinaus dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die fachliche Begleitung des Projektes und insbesondere dem Forschungsleiter Küste des KFKI, Frank Thorenz, sowie Gabriele Gönnert als Obfrau der projektbegleitenden Gruppe und ihren Mitgliedern Cordula Berkenbrink, Anette Ganske, Katharina Heinrich, Jacobus Hofstede, Frerk Jensen, Silvin Müller-Navarra, Frank Rosenberg, Karina Stockmann und Andreas Wurpts für fruchtbare Diskussionen und weiterführende Anregungen.

7 Literaturverzeichnis

Aigner, D.; Bollrich, G.: Handbuch der Hydraulik, für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Beuth Verlag Berlin, 2015.

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Mudersbach, C.; Jensen, J.: Ermittlung regionalisierter Extremwasserstände für die Schleswig-Holsteinische Nordseeküste. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57, 6, 264–278, https://doi.org/10.5675/HyWa_2013,6_1, 2013a.

Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.; Pattiaratchi, C.: Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise. In: Coastal Engineering, 81, 51–66, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003>, 2013b.

Beck, U.: Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 1986.

Behre, K. E.: Ostfriesland. Die Geschichte seiner Landschaft und ihrer Besiedlung. Wilhelmshaven, 2014.

Bormann, H.; Keschull, J.; Ahlhorn, F.; Spiekermann, J.; Schaal, P.: Modellbasierte Szenarioanalyse zur Anpassung des Entwässerungsmanagements im nordwestdeutschen Küstenraum. In: Wasser und Abfall, 20, 7–8, 60–66, <https://doi.org/10.1007/s35152-018-0083-7>, 2018.

Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK): Hochwasserschadenspotenziale. Berichte 1/2001, BWK Düsseldorf, 2001.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK): Erfahrungsbericht LÜKEX 15. Sturmflut an der deutschen Nordseeküste. 2019.

Coles, S.: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag London, 2001.

CORINE: Corine Land Cover (CLC) 2012, Version 18.5, veröffentlicht 2016. Stand 13.09.2017: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>, 2016.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA): Arbeitshilfe Hochwasserschadensinformationen. DWA Hennef, 2008.

DKKV - Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V.: Maßnahmen des Katastrophenschutzes und Reaktion der Bürger in Hochwassergebieten. Bonn, 2000.

DWDS: „Risiko“, bereitgestellt durch das Digitale Wörterbuch der deutschen Sprache, Stand 12.09.2019: <https://www.dwds.de/wb/Risiko>.

Edmondson, B.; Levy, S. (eds.): Transformative Climates and Accountable Governance. Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97400-2>, 2019.

EXTREMENESS Gruppe (Weisse, R.; Grabemann, I.; Gaslikova, L.; Meyer, E.; Tinz, B.; Fery, N.; Möller, T.; Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Arns, A.; Jensen, J.; Ulm, M.; Ratter, B.; Schaper, J.): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. In: Die Küste, 87, 2019.

Förster, J.; Barkmann, J.; Fricke, R.; Hotes, S.; Kleyer, M.; Kobbe, S.; Kübler, D.; Rumbaur, C.; Siegmund-Schultze, M.; Seppelt, R.; Settele, J.; Spangenberg, J. H.; Tekken, V.; Václavík, T.; Wittmer, H.: Assessing ecosystem services for informing land-use decisions: a problem-oriented approach. In: *Ecology and Society*, 20, 3, 31, <https://doi.org/10.5751/ES-07804-200331>, 2015.

Ganske, A.; Fery, N.; Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Weisse R.; Tinz B.: Identification of extreme storm surges with high-impact potential along the German North Sea coastline. In: *Ocean Dyn*, 68, 10, 1371–1382, <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1190-4>, 2018.

Geipel, R.: *Naturrisiken. Katastrophenbewältigung im sozialen Umfeld*. Darmstadt, 1992.

Gerkenmeier, B.; Ratter, B.; Vollmer, M.; Walsh, C.: Managing coastal risks at the Wadden Sea: a societal perspective. In: *Disaster Prevention and Management*, 27, 1, 15–27, <https://doi.org/10.1108/DPM-04-2017-0074>, 2017.

Gerkenmeier, B.; Ratter, B.: Governing coastal risks as a social process – Facilitating integrative risk management by enhanced multi-stakeholder collaboration. In: *Environmental Science and Policy*, 80, 144–151, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.011>, 2018.

González-Riancho, P.; Gerkenmeier, B.; Ratter, B.: 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, 118–131, 2017.

Gönnert, G.; Gerkenmeier, B.; Müller, J.-M.: Ermittlung des Sturmflutbemessungswasserstandes für den öffentlichen Hochwasserschutz in Hamburg. Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (Hg.), Nr. 12/2012, ISSN 1867-7959, 2012.

Hydrotec: Hochwasser-Aktionsplan Lippe. Grundlagen, Überflutungsgebiete, Schadenspotenzial, Defizite und Maßnahmen. Projektbericht im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Lippstadt. Aachen, 2002.

Internationale Kommission zum Schutz der Rheins (IKSR): Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein – Rhein-Atlas. IKSR Koblenz, ISBN 3-935324-43-X, 2001.

Jensen, J.; Mudersbach, C.; Müller-Navarra, S. H.; Bork, I.; Koziar, C.; Renner, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: *Die Küste*, 71, 123–167, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101559>, 2006.

Jensen, J.; Ulm, M.; Arns, A.: Bewertung möglicher Auswirkungen von extremen Sturmfluten auf Gesellschaft und Infrastruktur am Beispiel des Emder Hafens. HTG Kongress, 11.-13. September, Lübeck, 2019.

Jongejan, R. B.; Maaskant, B.: Quantifying flood risks in the Netherlands. In: *Risk Analysis*, 35, 2, 252–264, <https://doi.org/10.1111/risa.12285>, 2015.

Kaiser, G.; Scheele, L.; Kortenhaus, A.; Løvholt, F.; Römer, H.; Leschka, S.: The influence of land cover roughness on the results of high resolution tsunami inundation modeling. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 9, 2521–2540, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2521-2011>, 2011.

- Kanig, M.; Schröder, A.: Schadenspotenzialanalyse für die deutsche Nordseeküste. Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel, Forschungsbericht. Berlin, 2014.
- Karrasch, L.; Schaper, J.: Forschungsregion Ostfriesland. Broschüre der Universität Oldenburg, UHH und HZG. Oldenburg, 2017.
- Lin, N.; Emanuel, K.: Grey swan tropical cyclones. In: *Nature Climate Change*, 6, 106–111, <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2777>, 2016.
- de Moel, H.; Aerts, J. C. J. H.: Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. In: *Natural Hazards*, 58, 407–425, <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9675-6>, 2011.
- Müller-Mahn, D.: Perspektiven der geographischen Risikoforschung. In: *Geographische Rundschau*, 59, 10, 4–11, 2007.
- OSM: © OpenStreetMap-Mitwirkende, Datenbestand der Region Emden-Krummhörn vom 22.02.2018. Open Data gemäß der Open Data Commons Open Database Lizenz (ODbL), <https://www.openstreetmap.org/copyright>, 2018.
- Patt, H.; Jüpner, R. (Hg.): *Hochwasser-Handbuch*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-28191-4_9, 2013.
- Pescaroli, G.; Alexander, D.: A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the “toppling dominos” metaphor. In: *GRF Davos Planet@Risk*, 3, 1, 2015.
- Randall, D. A.; Ringler, T. D.; Heikes, R. P.; Jones, P.; Baumgardner, J.: Climate modeling with spherical geodesic grids. In: *Computing in Science & Engineering*, 4, 5, <https://doi.org/10.1109/MCISE.2002.1032427>, 2002.
- Ratter, B.; Schaper, J.: Risikomanagement in der Badewanne - Wenn in Ostfriesland bei Sturmflut das Wasser von allen Seiten kommt. In: *Geographische Rundschau*, 9/2019, 28–33, 2019.
- Reese-Schäfer, W.: *Luhmann zur Einführung*. 2. Aufl. Hamburg, 1996.
- Renn, O.: Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review – Part 1: Disciplinary Risk Concepts. In: *GAIA*, 17, 1, 50–66, <https://doi.org/10.14512/gaia.17.1.13>, 2008.
- Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Fery, N.; Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Meyer, E.; Möller, T.; Tinz, B.; Weisse, R.: Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkungen. In: *Die Küste*, 87, 2019.
- Schneidewind, U.; Singer-Brodowski, M.: *Transformative Wissenschaft. Klimawandel im deutschen Wissenschafts- und Hochschulsystem*. Marburg, 42, 2014.
- Spiekermann, J.; Ahlhorn, F.; Bormann, H.; Kebschull, J.: *Klimaoptimiertes Entwässerungsmanagement im Verbandsgebiet Emden (KLEVER). Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels*. Oldenburg, 2018.
- Staatliches Umweltamt (StUA) Bielefeld: *Hochwasseraktionsplan Diemel – Schadenspotential*. Bericht, 2004.
- Taleb, N. N.: *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. The Random House, 2007.

Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.: Black Swans and Risk – Assessing Consequences of Extreme Events for the German Bight. 36th International Conference on Coastal Engineering, Baltimore, <https://doi.org/10.9753/icce.v36.risk.103>, 2018a.

Ulm, M.; Schaper, J.; Bönewitz, M.: Forschung trifft Praxis – Was passiert bei einer Katastrophenübung. Helmholtz Blog-Beitrag vom 19.12.2018. Stand 12.09.2019: <https://blogs.helmholtz.de/kuestenforschung/2018/12/19/forschung-trifft-praxis-was-passiert-bei-einer-katastrophensturmflut/>, 2018b.

Ulm, M.; Arns, A.; Jensen, J.: Estimating the consequences of a high impact event at the Ems estuary, Germany. European Geosciences Union General Assembly, Wien, https://presentations.copernicus.org/EGU2019-6871_presentation.pdf, 2019.

UNISDR: Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Sendai, 2015.

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV): DGM-W 2015 Unter- und Außenems, aus dem Geodatenportal Tideems, https://www.kuestendaten.de/Tideems/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html, 2015.

Weisse, R.; von Storch, H.; Niemeier, H. D.; Knaack, H.: Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? In: Ocean & Coastal Management, 68, 58–68, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005>, 2012.