

XtremRisk – Integrierte Hochwasserrisikoanalyse für extreme Sturmfluten an offenen Küsten und in Ästuaren: Wichtigste Ergebnisse und Lehren

Hocine Oumeraci, Andreas Kortenhaus, Andreas Burzel, Marie Naulin, Dilani R. Dassanayake, Jürgen Jensen, Thomas Wahl, Christoph Mudersbach, Gabriele Gönner, Sigrid Thumm, Birgit Gerkenmeier, Peter Fröhle, Karl-Friedrich Daemrich, Erik Pasche † und Gehad Ujeyl

Zusammenfassung

Das Verbundprojekt XtremRisk wird zunächst kurz beschrieben. Schwerpunkte des Forschungsvorhabens waren die Entwicklung, Verbesserung und Erweiterung von Grundlagen, Methoden und Modellen hinsichtlich folgender Aspekte: (i) Physikalisch mögliche extreme Sturmfluten für verschiedene heutige und künftige Klimaszenarien, (ii) Versagensformen und -mechanismen von Hochwasserschutzwerken, (iii) Evaluation der intangiblen Flutschäden (soziale und Umweltschäden) sowie deren Aggregation mit direkten und indirekten Schäden in eine integrierten Risikoanalyse, (iv) Zuverlässigkeitsanalyse von Hochwasserschutzsystemen, (v) Implementierung der integrierten Risikoanalyse unter Berücksichtigung der tangiblen und intangiblen Schäden auf der Grundlage des bewährten SPR-Konzeptes (Source-Pathway-Receptor) am Beispiel von zwei ausgewählten Standorten an der deutschen Nordseeküste: Sylt repräsentativ für eine offenen Küste und Hamburg für ein urbanes Ästuar-Gebiet. Der Beitrag fokussiert lediglich auf einige Schlüsselergebnisse und die wichtigsten Lehren für künftige Forschungsvorhaben.

Schlagwörter

Integrierte Risikoanalyse, SPR-Konzept, extreme Sturmflut, Hochwasserschutzwerke und -systeme, Deichbruchmodellierung, Zuverlässigkeitsanalyse, intangible und tangible Flutschäden, GIS-basierte räumliche Modellierung

Summary

A brief overview of the joint research project XtremRisk is given. The project has been focusing on developing/improving/expanding the knowledge, methods and models with respect to (i) physically possible extreme storm surge for current conditions and scenarios for climate change, (ii) failure mechanisms of flood defences, (iii) assessment of intangible losses (social and ecological) and their integration with direct/indirect economic losses, (iv) reliability analysis of flood defence systems and (v) SPR-based integrated flood risk analysis involving both tangible and intangible losses and its implementation for two selected pilot sites (representative for an open coast and an urban estuarine area in Germany). The key results are briefly summarised and the lessons learned for future flood risk studies are finally drawn.

Keywords

integrated risk analysis, SPR-Concept, extreme storm surge, flood defense structures and systems, reliability analysis, dike breach modelling, intangible and tangible flood losses, GIS-based spatial modelling

Inhalt

1	Einleitung.....	546
2	Überblick über das Gesamtprojekt.....	547
2.1	Teilprojekt 1 – Extreme Sturmfluten.....	548
2.2	Teilprojekt 2 – Zuverlässigkeitsanalyse und Bruchmodellierung von Hochwasserschutzwerken.....	549
2.3	Teilprojekt 3 – Schadensermittlung und -bewertung.....	549
2.4	Teilprojekt 4 – Risikoanalyse/Risikobewertung.....	550
3	Wichtigste Ergebnisse und Lehren.....	550
3.1	Risikoquellen.....	550
3.1.1	Wichtigste Ergebnisse.....	550
3.1.2	Wichtigste Lehren.....	553
3.2	Risikowege.....	554
3.2.1	Wichtigste Ergebnisse.....	554
3.2.2	Wichtigste Lehren.....	556
3.3	Risikoempfänger.....	558
3.3.1	Wichtigste Ergebnisse.....	558
3.3.2	Wichtigste Lehren.....	561
3.4	Integrierte Risikoermittlung.....	562
4	Abschließende Bemerkungen.....	564
5	Danksagung.....	565
6	Schriftenverzeichnis.....	565

1 Einleitung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf physikalisch mögliche extreme Sturmfluten und andere ungünstige Kombinationen der Lastfälle sowie die im 21. Jahrhundert zu erwartenden möglichen Folgeschäden an offenen Küsten und in Ästuar-Gebieten sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Angesichts dieser Faktoren ist eine integrierte Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse auf der Grundlage des Source-Pathway-Receptor-Konzeptes (SPR-Konzept) (OUMERACI 2004) als Lösungsansatz am besten geeignet. Zu den größten Hürden für die praktische Umsetzung eines solchen Ansatzes zählen die nach Abschluss des EU-FLOODsite-Projekts immer noch bestehenden Wissenslücken (KORTENHAUS und OUMERACI 2008), insbesondere fehlende Erkenntnisse über extreme Sturmfluten, Versagensmechanismen von Hochwasserschutzwerken, intangible Flutschäden und deren Aggregation mit tangiblen Schäden in einer integrierten Risikoanalyse.

Dies war die Ausgangssituation für das auf vier Jahre angelegte Projekt „XtremRisK“, das im Oktober 2008 initiiert und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wurde. An dem Projekt waren drei Kooperationspartner aus verschiedenen deutschen Universitäten (TU Braunschweig, fwu Siegen, TU Hamburg-Harburg, nachfolgend LWI, fwu und TUHH) beteiligt, außerdem ein Partner vom Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) in Hamburg sowie die Nutzer der Ergebnisse für Hamburg (LSBG und HPA) und die Insel Sylt (Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, LKN).

Nach einem sehr kurzen Überblick über das Projekt und einer knappen Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse werden abschließend die für künftige Flutrisikostudien relevanten Lehren und auch Empfehlungen für künftige FuE-Prioritäten vorgestellt.

2 Überblick über das Gesamtprojekt

Das Projekt XtremRisK folgt dem SPR-basierten integrierten Risikoanalyse- und -managementansatz, der von OUMERACI (2004) und von FLOODsite (www.floodsite.net) vorgelegt wurde. XtremRisK unterscheidet sich jedoch von ähnlichen Flutrisikoprojekten in den folgenden Punkten: (i) den Hauptschwerpunkt sollten extreme Sturmflutereignisse bilden, die heute und Ende dieses Jahrhunderts physikalisch möglich sind; (ii) Grundlage des Projekts ist eine ausführliche Modellierung und Zuverlässigkeitsanalyse des Versagens vollständiger Hochwasserschutzsysteme einschließlich baulicher und natürlicher Barrieren; (iii) die Ermittlung der tangiblen Flutschäden beinhaltet sowohl direkte als auch indirekte Schäden; (iv) die Ermittlung der intangiblen Schäden beinhaltet gesellschaftliche Schäden (Verluste an Menschenleben oder Kulturgütern) und Umweltschäden; (v) es erfolgt eine konsistente und integrierte Betrachtung tangibler und intangibler Schäden innerhalb eines einheitlichen methodischen Rahmens, um in der Risikoanalyse die Gesamtschäden zu bewerten.

Zwei Untersuchungsgebiete, für die die benötigten Daten größtenteils vorlagen, wurden für die Anwendung der entwickelten Methoden, Modellierungstools und -techniken sowie abschließend für die praktische Umsetzung der integrierten Risikoanalyse ausgewählt: Hamburg repräsentativ für ein urbanes Ästuar-Gebiet und Sylt für eine offenen Küste.

Das Gesamtprojekt (unter der Leitung von LWI) gliedert sich entsprechend dem SPR-Konzept (Abb. 1) in vier Teilprojekte (TP1-TP4) für die Schwerpunkte Risikoquelle (TP1), Risikowege (TP2), Risikoempfänger (TP3) und ihre Zusammenführung in einer Risikoanalyse (TP4).

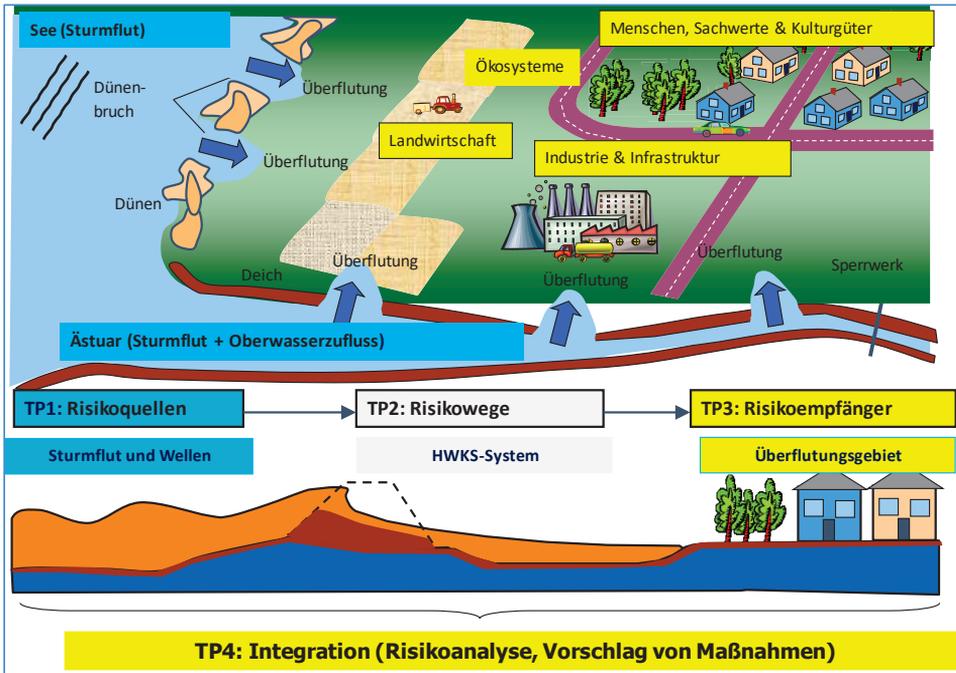


Abbildung 1: „Source-Pathway-Receptor“(SPR)-Konzept und Teilprojekte (TP) in XtremRisk.

2.1 Teilprojekt 1 – Extreme Sturmfluten

Teilprojekt 1 – Extreme Sturmfluten (Risikoquellen) umfasst das vom LSBG geleitete Teilprojekt 1a (TP1a) und das Teilprojekt 1b (TP1b) unter der Leitung der fwu.

Das Ziel von TP1a ist die Entwicklung von Szenarien mit den größten physikalisch möglichen extremen Sturmfluten in den ausgewählten Untersuchungsgebieten auf Basis der Analyse von Felddaten (z. B. Tidepegel Cuxhaven) und numerischer Modelle. Dabei werden sämtliche physikalische Komponenten einer Sturmflut (z. B. Windstau, Springtide und Fernwellen) und deren nichtlinearen Interaktionen im Vergleich mit ihrer linearen Überlagerung untersucht (s. Abb. 4).

Teilprojekt TP1b befasst sich mit der Bestimmung der Überschreitungswahrscheinlichkeiten für die von TP1a bereitgestellten extremen Sturmflutszenarien. Zu diesem Zweck wurde ein Sturmflutgenerator entwickelt, der in der Lage ist, vollständige parametrisierte Sturmflutverläufe in Kombination mit einer multivariaten statistischen Analyse der Wasserstände bei extremen Sturmfluten zu reproduzieren (Felddaten und synthetische Sturmflutdaten vom Sturmflutgenerator). Die gemeinsamen Wahrscheinlichkeiten beider Scheitelwerte $h_{w,max}$ und die Fülle F der extremen Sturmflut werden mithilfe eines bivariaten Copula-Ansatzes bestimmt. Soll auch die signifikante Wellenhöhe H_s berücksichtigt werden, wird ein trivariater Ansatz benötigt. Die so erhaltenen gemeinsamen Wahrscheinlichkeiten werden als Grundlage für die Zuverlässigkeitsanalysen der Hochwasserschutzanlagen an Teilprojekt 2 weitergegeben (Risikowege).

2.2 Teilprojekt 2 – Zuverlässigkeitsanalyse und Bruchmodellierung von Hochwasserschutzwerken

Teilprojekt 2 – Zuverlässigkeitsanalyse und Bruchmodellierung von Hochwasserschutzwerken (Risikowege) unter der Leitung vom LWL.

Auf Grundlage der in TP1 entwickelten Szenarien für extreme Sturmfluten befasst sich TP2 mit der Bestimmung der Belastung und der Zuverlässigkeitsanalyse für alle Elemente der Hochwasserschutzwerke in den beiden Untersuchungsgebieten. Dies umfasst auch das vollständige Versagen dieser Elemente, einschließlich Bruch und Bruchentwicklung von Hochwasserschutzwerken.

Das ultimative Ziel ist die Bestimmung einer Versagenswahrscheinlichkeit der Hochwasserschutzsysteme (und somit der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit $P_{f,cond}$), welche die erste Komponente des Überflutungsrisikos darstellt (in diesem Projekt als Produkt der Wahrscheinlichkeit $P_{f,cond}$ und der damit verbundenen Schäden D definiert). Zusätzlich werden die Eingangsbedingungen an der Bruchstelle für die Modellierung der Ausbreitung der Flutwellen bestimmt, einschließlich der Bruchentwicklung und der endgültigen Bruchbreite und -tiefe.

Die Ergebnisse dienen als Eingangsparameter für Teilprojekt TP3, das sich mit der numerischen Simulation der Flutwellenausbreitung und der Ermittlung der damit verbundenen Schäden in den beiden Untersuchungsgebieten befasst.

2.3 Teilprojekt 3 – Schadensermittlung und -bewertung

Das Teilprojekt 3 – Schadensermittlung und -bewertung (Risikoempfänger) unter der Leitung von der TUHH.

Ziel von TP3 ist die Ermittlung der direkten und indirekten ökonomischen Schäden in den Untersuchungsgebieten. Zu diesem Zweck wird die Ausbreitung der Flutwellen numerisch simuliert. Gleichzeitig werden Schadensmodelle für die Ermittlung der direkten Schäden an Wohnbebauung und gewerblichen und industriellen Objekten entwickelt sowie ein ökonomisches Modell zur Bewertung der indirekten Schäden aufgrund von Störungen wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aktivitäten als Folge der direkten Flutschäden. Die ausschließliche Betrachtung direkter ökonomischer Schäden ist im Falle von Risiken in Verbindung mit Extremereignissen nicht ausreichend.

Direkte Schäden werden auf der Mikroebene des betroffenen Objekts (beispielsweise ein Gebäude) ermittelt und auf eine Gruppe ähnlicher Objekte auf der mesoskaligen Ebene extrapoliert. Mittels eines Cluster-basierten Ansatzes werden die Schäden von der Gebäudeebene auf der Ebene von Wirtschaftssektoren im gesamten Untersuchungsgebiet aggregiert, sodass sie in einen ökonomischen Modellierungsrahmen auf Makroebene implementiert werden können.

Die GIS-basierten direkten und indirekten ökonomischen Schäden werden für Teilprojekt TP4 zur Zusammenführung aller Schadenskategorien in einer Risikoanalyse bereitgestellt.

2.4 Teilprojekt 4 – Risikoanalyse/Risikobewertung

Teilprojekt 4 – Risikoanalyse, Risikobewertung und Empfehlungen für Maßnahmen zur Risikoreduzierung (Integration) unter der Leitung vom LWI.

Im TP4 werden die Ergebnisse aus den Teilprojekten 1-3 in einer integrierten Flutrisikoanalyse für die beiden Untersuchungsgebiete zusammengeführt (s. Abb. 1 und OUMERACI 2004). Dabei werden die in TP1 festgelegten Sturmflutszenarien für heutige (2010) und zukünftige (2100) klimatische Bedingungen berücksichtigt. Für die Integration der Ergebnisse ist jedoch ein geeignetes Verfahren zur Ermittlung der intangiblen Schäden (gesellschaftliche, kulturelle und umweltbezogene Schäden), ihrer GIS-basierten räumlichen Modellierung sowie ihrer Zusammenführung mit den in TP3 ermittelten wirtschaftlichen Schäden in integrierten Risikokarten erforderlich. Dazu bedarf es eines konsistenten GIS-Ansatzes (Cellbased Risk Assessment, CRA) für die räumliche Modellierung der Risiken. Der CRA-Ansatz findet auch bei der Modellierung der direkten und indirekten wirtschaftlichen Schäden auf Basis der Ergebnisse von Teilprojekt 3 Anwendung sowie bei der kartographischen Abbildung des mit jeder Schadenskategorie verbundenen Risikos auf Grundlage des GIS. Auch die Integration aller Risikokategorien in einer integrierten Risikokarte für die Untersuchungsgebiete basiert auf dem CRA-Ansatz.

Die vorhergesagten Flutrisiken bei heutigen und zukünftigen Bedingungen werden zusätzlich auf Basis von tolerierbaren Risiken bewertet, die in enger Zusammenarbeit mit den voraussichtlichen Anwendern der Studienergebnisse in den Gebieten für jede Schadenskategorie geschätzt wurden. Schließlich werden strukturelle und nicht-strukturelle Maßnahmen zur Risikoreduzierung vorgeschlagen, um die vorhergesagten Flutrisiken auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren.

Eine Detailanalyse der ausgewählten Maßnahmen, die im Hinblick auf ihre technische und wirtschaftliche Machbarkeit am geeignetsten sind, eine Reduzierung des Sturmflutrisikos zu bewirken, wird möglicherweise Gegenstand eines Folgeprojekts sein, abhängig von den Ergebnissen der Diskussionen mit den für das Flutrisikomanagement in den beiden Untersuchungsgebieten zuständigen Entscheidungsträgern.

3 Wichtigste Ergebnisse und Lehren

3.1 Risikoquellen

3.1.1 Wichtigste Ergebnisse

In einem neuen Ansatz werden empirische Methoden mit einer numerischen Modellierung kombiniert, um die nichtlineare Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten zu untersuchen und extreme Sturmflutszenarien festzulegen. Die Umsetzung dieses kombinierten Ansatzes in den Untersuchungsgebieten besteht aus drei Hauptarbeitsschritten: (i) Analyse der höchsten beobachteten Ausprägung jeder Sturmflutkomponente; (ii) Analyse der Wechselwirkung zwischen Tide und Windstau einerseits und zwischen Windstau und Fernwelle andererseits; (iii) Berechnung eines extremen Sturmflutszenarios auf Basis der Ergebnisse dieser Analysen (GÖNNERT et al. 2012). Die Analyse der nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den Sturmflutkomponenten ergibt niedrigere Wasserstände als die lineare Überlagerung der Komponenten. Dies gilt jedoch nur für die Daten, die bisher am

Pegel Cuxhaven ausgewertet wurden (durchgehende Zeitreihen für mehr als 100 Jahre). Durch die Übertragung des Verfahrens auf die Daten des Pegels Hörnum (Sylt) konnte seine Anwendbarkeit auf andere Gebiete gezeigt werden (GÖNNERT et al. 2012). Für ein besseres Verständnis des relativen Beitrags der nichtlinearen Effekte und zur Verifizierung der Gültigkeit dieser wichtigen Ergebnisse wurde eine Doktorarbeit für die Implementierung eines hybriden Ansatzes mit hydrodynamischer Modellierung und künstlichen neuronalen Netzen initiiert, das mittlerweile kurz vor dem Abschluss steht (s. TAYEL und OUMERACI 2014).

Ein leistungsfähiger und rechnerisch effizienter stochastischer Sturmflutgenerator (SSFG) sowie eine fortschrittliche multivariate statistische Analyse von Extremsturmflutereignissen auf Basis von Copula-Funktionen (englisch: Copula-based multivariate statistical analysis, CMSA) wurden in TP1b entwickelt und in den beiden Untersuchungsgebieten implementiert.

Der Sturmflutgenerator ist in der Lage, eine große Anzahl von Sturmflutszenarien stochastisch zu simulieren (Größenordnung 10^7). Grundlage hierfür bilden (i) die Parametrisierung der an den Pegeln Cuxhaven (Elbe Ästuar) und Hörnum (Sylt) beobachteten Wasserstände bei Sturmfluten anhand von 19 Wasserstandsparametern und 6 Zeitparametern, (ii) die Anpassung der parametrischen Verteilungsfunktionen an die aus der Parametrisierung abgeleiteten Datensätze, (iii) die Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Parametern und die Anwendung empirischer Filterfunktionen zur Vermeidung von Inkonsistenzen sowie (iv) Monte-Carlo-Simulationen (MCS) unter Berücksichtigung der angepassten parametrischen Verteilungen und verschiedenen Filterfunktionen. Ein Vergleich der generierten synthetischen Sturmflutverläufe (Zeitreihen mit einer 1-minütigen Auflösung) mit den Sturmflutverläufen, die aus Beobachtungsdaten, hydrodynamischen Modellen und empirischen Auswertungen abgeleitet wurden, zeigt die Leistungsfähigkeit des Sturmflutgenerators. Ausführlichere Informationen finden sich in WAHL et al. (2011) und WAHL et al. (2012a, b).

Im Gegensatz zu den meisten bisherigen Untersuchungen, bei denen nur der höchste Scheitelwasserstand $h_{w,max}$ (S in Abb. 2) als statistisch repräsentativer Parameter für das Sturmflutereignis betrachtet wird, berücksichtigt die CMSA in ihrer bivariaten Version zusätzlich die „Fülle“ F (Abb. 2) des gesamten Sturmflutverlaufs.

Tatsächlich kann die „Fülle“ F für die Stabilität von Hochwasserschutzwerken und die Überflutungswahrscheinlichkeit genauso kritisch sein wie $h_{w,max}$, da sie implizit die Verweilzeit der Wasserstände zwischen dem Referenzwasserstand Normalnull und dem aufgezeichneten Scheitelwasserstand $h_{w,max}$ (S) beschreibt. Die vorgelegte CMSA und die ermittelten gemeinsamen Wahrscheinlichkeiten von $h_{w,max}$ und F wie in Abb. 3 gezeigt stellen somit einen bedeutenden Fortschritt in der Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse dar.

Durch Verwendung eines Ansatzes mit einer vollständig genesteten Archimedischen Copula wird das bivariate Modell zum trivariaten Modell erweitert und die signifikante Wellenhöhe H_s als einer der wichtigsten Wellenparameter zusätzlich berücksichtigt.

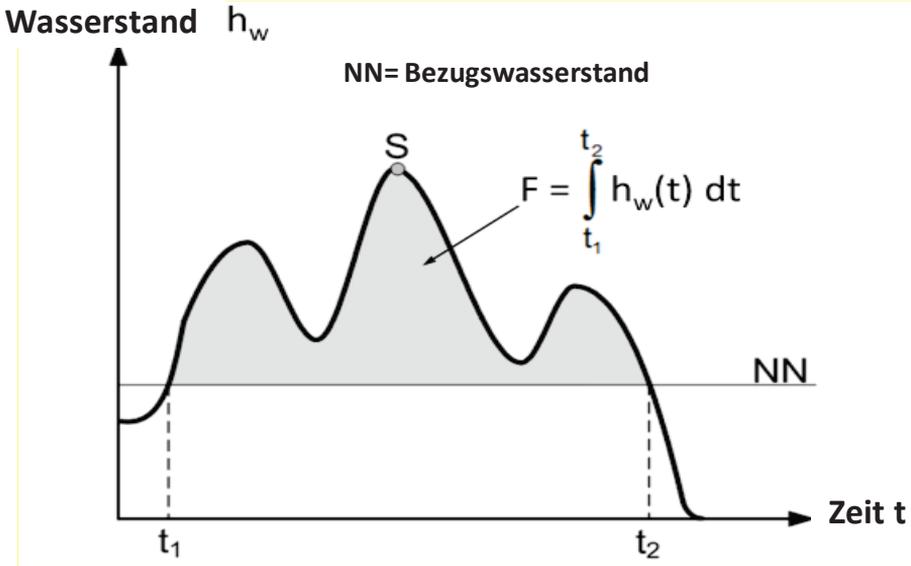


Abbildung 2: Sturmflutverlauf mit Scheitel S und „Fülle“ F (Definitionsskizze) (in Anlehnung an WAHL et al. 2011).

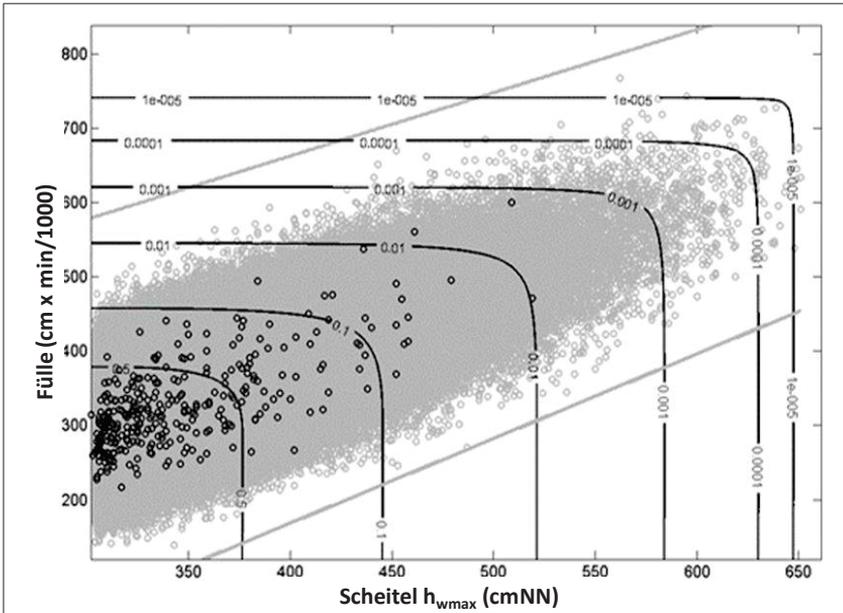


Abbildung 3: Kombinierte Wahrscheinlichkeiten von Scheitelwasserstand und Fülle F (WAHL et al. 2011).

3.1.2 Wichtigste Lehren

Bei vielen der verfügbaren konventionellen bivariaten Ansätze zeichnen sich die zugrunde liegenden Datensätze durch Einschränkungen und Zwänge hinsichtlich Abhängigkeit oder Randverteilungen aus. Anders die Copula-basierten Ansätze: ihre Flexibilität ist größer als die der konventionellen Modelle und sie können abhängige Parameter mit gemischten Randbedingungen bewältigen.

Es ist folglich möglich, die vorgeschlagene CSMA zu erweitern und weitere Sturmflut-Wellenparameter zu berücksichtigen. Copula-Funktionen stellen zudem eine vielversprechende Alternative für die Lösung weiterer Klassen von multivariaten Problemen dar. Das wichtigste Problem bleiben jedoch die beträchtlichen Unsicherheiten, die mit höherdimensionalen Copula-basierten Modellen verbunden sind.

In der vorliegenden Studie wird der Versuch unternommen, sich durch Verwendung von Filterfunktionen auf zwei Quellen der Unsicherheiten zu beschränken - auf den Copula-Parameter θ und die stochastisch generierten synthetischen Sturmflutdaten. Es zeigte sich, dass letztere Quelle von weitaus größerer Bedeutung ist und eine Verringerung der Unsicherheiten nur möglich ist durch ein besseres physikalisches Verständnis der relativen Einflüsse der Sturmflutkomponenten und ihrer nichtlinearen Interaktionen (Abb. 4), der zu Grunde liegenden prägenden Faktoren einschließlich ihrer Schwankungsbreite sowie ihrer Grenzen gemäß den physikalischen Gesetzen.

Dafür wird eine konsistente Modellierungsstrategie mit geeigneten Modellen und geeigneten Analysen der Unsicherheiten benötigt, um Vorhersagen treffen zu können, wie sich die klimatischen/geophysikalischen/morphologischen Veränderungen innerhalb einer Dekade auf die Verteilungen der kombinierten Wahrscheinlichkeit von Wasserständen und Wellen bei einer Sturmflut auswirken, einschließlich der kombinierten Extremereignisse für die Bemessung. Ein erster Schritt in diese Richtung wurde von TAYEL und OUMERACI (2014) mit der Implementierung eines kombinierten 2-dimensionalen hydrodynamischen Modells und rückgekoppelten künstlichen neuronalen Netzen (KNN) unternommen, um ein besseres Verständnis der nichtlinearen Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten in der Deutschen Bucht wie in Abb. 4 dargestellt zu ermöglichen. Die Ergebnisse sind sehr vielversprechend: die entwickelte hybride Modellierung erweist sich als effizienter Ansatz, da hiermit der allgemeine relative Einfluss der nichtlinearen Wechselwirkung zwischen den Sturmflutkomponenten im Vergleich zu ihrer linearen Überlagerung erfasst werden kann und somit die Vorhersage extremer Sturmfluten möglich ist. Wie GÖNNERT et al. (2012) feststellten, führt die lineare Überlagerung im Allgemeinen zu höheren Wasserständen, doch unter bestimmten, derzeit noch nicht vollständig geklärten Bedingungen, können die nichtlinearen Wechselwirkungen auch höhere Wasserstände bewirken (TAYEL und OUMERACI 2014).

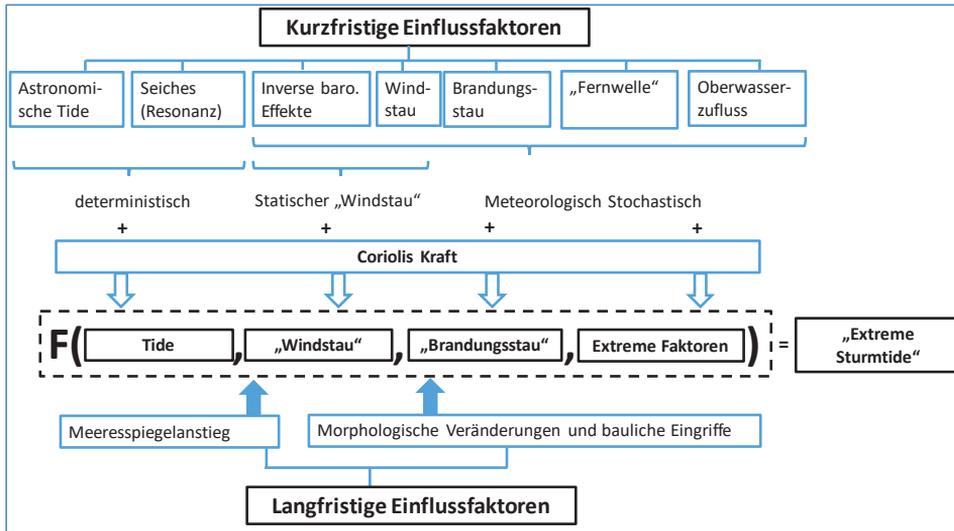


Abbildung 4: Sturmflutkomponenten und ihre nichtlinearen Wechselwirkungen (TAYEL und OUMERACI 2012).

3.2 Risikowege

3.2.1 Wichtigste Ergebnisse

Im Rahmen vorhergehender Projekte wie FLOODsite (www.floodsite.net) wurden Erkenntnisse gewonnen und Modellierungstools entwickelt, die in XtremRisk verbessert beziehungsweise weiter ausgebaut wurden. Sie bilden die Grundlage einer für beide Untersuchungsgebiete durchgeführten Zuverlässigkeitsanalyse der linearen Hochwasserschutzwerke wie beispielsweise Seedeiche, Dünen und Hochwasserschutzwände. Die Analyse liefert als Ergebnis eine Überflutungswahrscheinlichkeit P_f für die in TP1 entwickelten extremen Sturmflutszenarien. Sie beinhaltet auch (i) die Bruchmodellierung für Seedeiche durch Verwendung der von TUAN und OUMERACI (2010, 2011) sowie STANCZAK und OUMERACI (2012) entwickelten Modelle für einen Deichbruch, der durch Wellenüberlauf/Überströmen der landseitigen Deichböschung beziehungsweise durch Einwirkung brechender Wellen auf die seeseitige Böschung initiiert wird, sowie (ii) die Anwendung des „X-Beach“-Code zur Modellierung von Dünenerosion und -bruch.

Da die Hochwasserschutzlinien in den Untersuchungsgebieten aus verschiedenartigen Bauwerken bestehen, die normalerweise nicht über ihre gesamte Länge homogen sind, wurde eine Segmentierung in etwa 300 homogene Abschnitte mit ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich Belastung und Widerstand vorgenommen. Für jeden Abschnitt wurden rund 80 Parameter für die Berechnung der 35 Grenzzustandsgleichungen (22 Gleichungen für Deiche, 8 Gleichungen für Hochwasserschutzwände und 5 Gleichungen für Dünen) zur Durchführung der Zuverlässigkeitsanalyse benötigt. Die betrachteten Grenzzustandsgleichungen stammten mehrheitlich aus vorhergehenden Studien. Im Rahmen dieses Projekts wurden auch einige Modifikationen und Weiterentwicklungen vorgenommen.

Neben den allgemein angewendeten Grenzzustandsgleichungen für die Dünenerosion werden auf Basis verfügbarer analytischer Modelle auch zusätzliche Grenzzustandsgleichungen für die Strandprofilentwicklung als Reaktion der Dünen auf die Einwirkung von Wellen und Overwash verwendet. Der übliche Ansatz für die Grenzzustandsgleichungen, bei dem die zulässige Wellenüberlauf-/Überströmrate q_{adm} mit der tatsächlichen Überlauf-/Überströmrate q verglichen wird, wurde hier modifiziert und anstatt dessen wurden das zulässige Volumen V_{adm} und das tatsächliche Volumen V (Gleichung 1) betrachtet:

$$V = \sum_{i=1}^{n,m} V_i = \sum_{i=1}^{n,m} q_i \cdot t_i \cdot l_i \quad (1)$$

mit: t_i = Zeit [s]; l_i = Länge des Abschnitts der Hochwasserschutzlinie [m]; n = Anzahl der Zeitschritte [-]; m = Anzahl der Abschnitte [-]. Die Berücksichtigung zeitabhängiger Volumina ist mit erheblichen Vorteilen verbunden, da sie eine bessere Approximation der zeitabhängigen Prozesse und der damit verbundenen Versagensmechanismen über den gesamten Zeitverlauf der Sturmflut darstellt. Darüber hinaus wird, im Gegensatz zu dem üblichen lediglich auf den Überlaufdaten beruhenden Ansatz, die Speicherkapazität des Hinterlandes berücksichtigt. Ein Überschreiten der kritischen Überlaufhöhe ist tatsächlich für eine kurze Dauer während des Scheitels der Sturmflut möglich, führt jedoch nicht notwendigerweise zu einer Überflutung. Ausführlichere Informationen finden sich in NAULIN et al. (2012a, b). Aufgrund der immer noch bestehenden Wissenslücken in Bezug auf die physikalischen Zusammenhänge, insbesondere die zeitliche Abhängigkeit der Versagensmechanismen und ihre räumliche Korrelation entlang der gesamten Küstenschutzlinie, war es nicht möglich, in der Zuverlässigkeitsanalyse den Faktor Zeit und den sogenannten „Längeneffekt“ vollständig zu berücksichtigen. Die Versagensmechanismen wurden also für jeden Abschnitt der segmentierten Küstenschutzlinie mehr oder weniger separat betrachtet. Trotz dieser Vereinfachungen und obgleich lediglich konventionelle Fehlerbaumanalysen durchgeführt wurden, in denen

- (i) die *Dauer* der Versagensmechanismen, ihre *zeitliche Sequenz* und *tatsächlichen Zusammenhänge* sowie
- (ii) die Versagensmechanismen, auf welche sich allgemeine Grenzzustandsgleichungen kaum anwenden lassen (z. B. Versagen beweglicher Sperrwerke infolge menschlichen Versagens), nicht berücksichtigt wurden,

zeigten die Ergebnisse eindeutig den relativen Beitrag jedes Versagensmechanismus zur Wahrscheinlichkeit des Top Event (Überflutung). Sie lieferten somit wertvolle Hinweise auf vorrangige Themenbereiche, die weiterer Ausarbeitung und F&E- Aktivitäten bedürfen. Traditionelle hierarchisch strukturierte Zuverlässigkeitsmodelle wie Fehler-/Ereignisbäume und Zuverlässigkeits-Blockdiagramme sind weder in der Lage, die Kausalität des Versagens noch seine Wechselwirkungen in Zeit und Raum zu erfassen (ZIO 2009). Zu diesem Zweck werden neue agentenbasierte Modellierungsansätze entwickelt, welche die Nutzung vorhandenen Wissens und bestehender Modelle zu den Einwirkungen und wesentlichen Materialeigenschaften ermöglichen, um potenzielle Versagensfälle und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen einschließlich Kaskadeneffekte zu identifizieren und in Modellen abzubilden (MACAL und NORTH 2010).

3.2.2 Wichtigste Lehren

Auch wenn die vorgenannten und weitere Vereinfachungen erforderlich sind, um die Zuverlässigkeitsanalyse für ganze Hochwasserschutzsysteme praktisch durchführbar zu machen, leisten die so ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzelementen/-abschnitten und die damit verbundenen konventionellen Fehlerbäume einen wesentlichen Beitrag zur Identifizierung der Schwachstellen und der Priorisierung von Themen, die für weitere Detailuntersuchungen relevant sind. Dies gilt auch für die Risikoreduzierung bei damit verbundenen möglichen strukturellen Gegenmaßnahmen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigten darüber hinaus, dass die Wirksamkeit eines vollständigen Schutzsystems aufgrund seiner großen Komplexität mit den gegenwärtig verfügbaren Modellierungsansätzen und konventionellen Zuverlässigkeits-/Fehlerbaumanalysen nicht effizient beschrieben werden kann. Infolge der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität der Parameter von Einwirkung und Widerstand, die sich auf die Versagensmechanismen auswirken, und aufgrund ihrer Wechselwirkungen bei einem einzelnen Hochwasserschutzelement und bei der Vielfalt nimmt diese Komplexität signifikant zu.

Es wird daher ein *adäquater Modellierungsansatz* benötigt, der die Abbildung der komplexen Versagensmechanismen in Zeit und Raum ermöglicht und dabei alle Wechselwirkungen zwischen den Hochwasserschutzelementen sowie die Integration der als direkte Folge der Flutausbreitung erwarteten Schäden mit einschließt. Ein solcher Modellierungsansatz lässt sich möglicherweise durch Kopplung systemdynamischer Modelle für die zeitabhängigen Prozesse mit GIS-basierten Ansätzen für die räumliche Modellierung realisieren. Dies würde auch die Simulation der Wirksamkeit des gesamten Hochwasserschutzsystems über die erwartete Nutzungsdauer erlauben und somit auch die explizite Berücksichtigung der langfristigen Veränderung der Versagenswahrscheinlichkeiten, die sich notwendigerweise aus den langfristigen Veränderungen der Belastungs- und Widerstandsparameter ergeben würden. Dies ist besonders relevant für die Wahrscheinlichkeitsdiskontierung, da sich eine Optimierung nur unter Berücksichtigung der Kosten über die gesamte Nutzungsdauer erzielen lässt.

Zeitabhängige Zuverlässigkeitsanalyse: BUIJS et al. (2009) legten einen strukturierten Ansatz zur Definition statistischer Modelle für zeitabhängige Prozesse bei Hochwasserschutzwerken und einen komplexen Modellierungsrahmen mit hierarchischen und stochastischen Prozessmodellen vor. Es handelt sich dabei um einen sehr vielversprechenden Ansatz, mit dem sich möglicherweise neue Erkenntnisse über das zeitabhängige Verhalten von Hochwasserschutzwerken gewinnen lassen, insbesondere bei einem Versagen in Verbindung mit Schädigungsprozessen. Allerdings liegen nach wie vor nur unzureichende wissenschaftliche zeitabhängige Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse, welche den zeitabhängigen Versagensmechanismen und ihren Wechselwirkungen im Laufe der Zeit zugrunde liegen, vor. Eine effiziente Anwendung dieser oder anderer detaillierter Ansätze für zeitabhängige Zuverlässigkeitsanalysen von Hochwasserschutzelementen und -systemen ist daher in der Praxis noch nicht möglich. Vielmehr könnte die Anwendung komplexer Modellierungsansätze ein *zusätzliches Risiko* mit der möglichen Folge wesentlich höherer Flutschäden bedeuten, wenn die zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge, Schädigungsmechanismen und sonstigen zeitabhängigen Versagensformen nicht hinreichend bekannt sind. Die praktische Implementierung von Modellierungsansätzen, die beispielsweise die Entwicklung zeitabhängiger Fragilitätskurven und ihre Einbettung in

die Zuverlässigkeitsanalyse für ein ganzes Hochwasserschutzsystem ermöglichen, muss auf den Ergebnissen von Grundlagenforschung über die relevantesten grundlegenden physikalischen Prozesse aufbauen. Iterative Verfeinerungen auf Basis dieser Ergebnisse und nach Durchführung einer Sensitivitätsanalyse für das gesamte System werden ebenfalls für jeden Prozess benötigt.

Längerfristig bedarf es eines besseren Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Versagensmechanismen, der zeitlichen und räumlichen Korrelation zwischen den Abschnitten einer Küstenschutzlinie und zwischen den verschiedenen Elementen des gesamten Hochwasserschutzsystems, um den Nachteilen einer konventionellen Fehlerbaumanalyse zu begegnen. Letztere beruht überwiegend auf dem „*engineering judgment*“ und ist damit subjektiv; das Ergebnis hängt in hohem Maße von Fachwissen und Kompetenzen des Analytikers ab, d. h. weiter entwickelte Fehlerbäume oder sonstige alternative Werkzeuge werden darüber hinaus benötigt, um die Dauer, zeitliche Abfolge und die tatsächlichen räumlichen und zeitlichen Verbindungen der Versagensmechanismen innerhalb eines Schutzelements und entlang der Hochwasserschutzlinie sowie innerhalb ganzer Hochwasserschutzsysteme zu berücksichtigen. Solche Tools werden wesentlich dazu beitragen, dass sich die konventionelle Analyse von der Kunst hin zur Wissenschaft weiter entwickelt, d. h. von einem fragilen und sehr empfindlichen Werkzeug hin zu einem robusteren und erschwinglichen Methodensatz für Anwender in der Praxis. In diesem Zusammenhang ist es geboten, die Machbarkeit integrierter systemdynamischer Modelle und GIS-Ansätze zu untersuchen, mit denen ein Modellierungsrahmen für die Abbildung der raum- und zeitabhängigen Prozesse und Wechselwirkungen entwickelt werden kann.

Zeitabhängige Fehlerbäume oder alternative Integrationstools müssen zudem auch Versagensmechanismen beinhalten, auf die sich die üblichen Grenzzustandsgleichungen kaum anwenden lassen (z. B. Versagen beweglicher Sperrwerke infolge menschlichen Versagens). Eine „Quantifizierung“ der Versagenswahrscheinlichkeit durch Einholen und Analyse von Expertenmeinungen beziehungsweise durch Simulationen kann hier die Verlässlichkeit der Ergebnisse verbessern. Besonders in Fällen, in denen die Belastungs- und Widerstandsparameter zeitabhängig sind und die Dauer der Versagensmechanismen sowie ihre zeitliche Abfolge und gegenseitige Abhängigkeit von Bedeutung sind, kann das Endergebnis einer konventionellen Fehlerbaumanalyse mit großen Unsicherheiten behaftet sein.

Räumliche Variabilität und Längeneffekte: Die unterschiedlichen Versagensmechanismen werden in der Regel durch Betrachtung eines repräsentativen Querschnitts jedes durch Segmentierung der Hochwasserschutzlinie definierten Abschnitts bewertet. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens nimmt also offensichtlich mit der Länge der Hochwasserschutzlinien zu, bedingt durch die räumliche Variabilität der Belastungs- und Widerstandsterme der Grenzzustandsgleichungen sowie durch die Tatsache, dass „jede Kette so stark ist wie ihr schwächstes Glied“ (*Längeneffekt*). Je höher die räumliche Variabilität (d. h. je kürzer die Autokorrelationsabstände) der Widerstandsparameter (z. B. Wellen und Wasserstände) und Widerstandsparameter (z. B. Bodeneigenschaften), desto größer der Längeneffekt. Der relative Einfluss der Belastungsparameter auf den Längeneffekt ist aufgrund ihrer größeren Heterogenität entlang der Hochwasserschutzlinie in der Regel deutlich höher als der Einfluss der Belastungsparameter, für die deutlich größere Korrelationsabstände charakteristisch sind. Die große Bedeutung dieser Faktoren wurde während

des Hurrikans Katrina deutlich, bei dem es zu einer Vielzahl von Brüchen als Folge von Schwachstellen entlang der Hochwasserschutzlinien in New Orleans kam. Die Versagensmechanismen, bei denen die Widerstandsparameter dominierend sind, haben darüber hinaus grundsätzlich eine entscheidende Wirkung auf den Längeneffekt, und zwischen einem einzelnen Abschnitt und der gesamten Schutzlinie kann sich die Versagenswahrscheinlichkeit um mehr als zwei Größenordnungen unterscheiden (VRIJLING et al. 2011). Ein konsistenter Rahmen für die Modellierung der durchgängigen räumlichen Variabilität von Bodenparametern mittels einer Zufallsfeldtheorie ist bereits vorhanden und hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung zugenommen, da die räumliche Variabilität von Böden eine der Hauptquellen für Schäden (Versagen) von Ingenieurbauten darstellt (VROUWENVELDER 2006). Durch Verwendung einer bedingten Wahrscheinlichkeit auf Basis von Szenarien kann eine diskrete räumliche Variabilität (z. B. Schwachstellen) in die Modellierung integriert werden (VRIJLING et al. 2011).

Die mit der räumlichen Variabilität der Widerstandsparameter entlang der Hochwasserschutzlinien (Heterogenität hinsichtlich Scherfestigkeit, hydraulischer Durchlässigkeit und Bodenschichtdicke; durch Übergänge oder Wühltiere verursachte Schwachstellen etc.) verbundenen großen Unsicherheiten sind nicht nur inhärent (aleatorisch), sondern auch dahingehend epistemisch, da sie aufgrund mangelnder Mess-/Beobachtungsdaten bestehen und im Laufe der Zeit stetigen und diskreten Veränderungen unterworfen sind. Sie stellen die größten Hürden für eine plausible Erklärung des Längeneffekts in der Zuverlässigkeitsanalyse kompletter Hochwasserschutzsysteme dar. Gezielte Lufterkundungen mittels Infrarot-Technologie und anderer geophysikalischer Messungen können ein erster Schritt bei der Detektion möglicher Schwachstellen sein. Langfristig bedarf es einer konsistenten und systematischen Monitoring-Strategie.

Dabei ist zu bedenken, dass eine Nichtbeachtung oder unzureichende Berücksichtigung der oben genannten Aspekte (Zeitabhängigkeit und räumliche Variabilität der Versagensmechanismen und ihrer Interaktion, Einzelpunkt-Strukturen), wie dies in den heutigen Zuverlässigkeitsanalysen von Hochwasserschutzwerken üblich ist, in der Regel zu niedrigeren Prognosewerten für die Überflutungswahrscheinlichkeiten führt und somit zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite.

3.3 Risikoempfänger

3.3.1 Wichtigste Ergebnisse

Bei der Entwicklung und Umsetzung neuer Ansätze für die Ermittlung *tangibler und intangibler Schäden* sowie für ihre Zusammenführung in einer integrierten Risikoanalyse wurden substantielle Fortschritte erzielt.

Tangible Schäden: Hier wurden insbesondere neue Methoden entwickelt – für die mikroskalige Ermittlung direkter ökonomischer Schäden (aufgrund des physischen Kontakts von Objekten mit Wasser) auf Basis der aktuell gültigen Marktpreise und ihre mesoskalige Zusammenführung sowie für die Ermittlung indirekter ökonomischer Schäden (aufgrund der Unterbrechung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aktivitäten als Folge direkter Flutschäden).

Der Fokus richtet sich dabei auf die Wohnbebauung und die gewerblichen und industriellen Objekte, aber auch potenzielle Schäden an Infrastruktur und Landwirtschaft

werden berücksichtigt. Der wichtigste hydraulische Eingangsparameter für die Schadensberechnung ist die Überflutungstiefe, die aus der Modellierung der Flutwellenausbreitung mit MIKE21 bestimmt wird. Dieser Parameter wird für die Entwicklung von objektbasierten Wasserstands-Schadensfunktionen (Daten aus Inspektionen, Fotos und Bauplänen von Bauwerken) verwendet. Die Ausbreitungsmodellierung basiert (i) auf den von TP1 bereitgestellten Sturmflutszenarien und (ii) auf Daten zu Überlauf-/Überströmvolumen oder den von TP2 bereitgestellten Ausgangsbedingungen infolge von Deichbrüchen. Grundlage des Ansatzes auf Mikroebene ist in erster Linie die Schadensermittlung mit dem Flood Resilient Tool (FloReTo), das für Musterhaustypen (z. B. Wohnobjekte, die durch die Art der Bebauung, die Nutzung des Erdgeschosses und die Materialien der Gebäudehülle definiert sind) entwickelt wurde (UJEYL et al. 2011, 2012). Die berechneten Schäden und die Ausbreitungstiefen werden in einer GIS-basierten räumlichen Modellierung (s. Kapitel 4) mit Hilfe der entwickelten Wasserstands-Schadensfunktionen zusammengeführt. Zudem wird eine vergleichende Analyse mit gängigen mesoskaligen Methoden durchgeführt, um die Vorteile des vorgeschlagenen Ansatzes (z. B. für die Ableitung effizienter Maßnahmen zur Risikoreduzierung) herauszustellen.

Eine Literaturstudie zeigte, dass sich das von HALLEGATTE (2008) vorgelegte Modell Adaptive Regional Input-Output (ARIO) am besten als Ansatz zur Berechnung der indirekten ökonomischen Schäden infolge von Produktionsausfällen und Verlusten an Dienstleistungen im Wohnungswesen eignet. Seine Anwendung im Untersuchungsgebiet Hamburg machte die Zusammenhänge zwischen indirekten und direkten Schäden sichtbar. Es zeigte sich, dass die indirekten Schäden vernachlässigbar klein (oder sogar negativ) sind, wenn die direkten Schäden unter einem bestimmten Niveau bleiben, jedoch nichtlinear ansteigen, sobald die direkten Schäden dieses Niveau überschreiten. Diese Tatsache ist ein Indikator dafür, dass es für die Bewältigungskapazität ökonomischer Systeme einen Schwellenwert gibt. Für das Untersuchungsgebiet Hamburg wurde dieser Schwellenwert bei etwa 2,5 Mrd. Euro angesetzt (UJEYL und KOWALEWSKI 2012). Die entsprechenden von HALLEGATTE (2008) für Louisiana ermittelten Werte liegen bei 50 bzw. 200 Mrd. US-Dollar (Abb. 5).

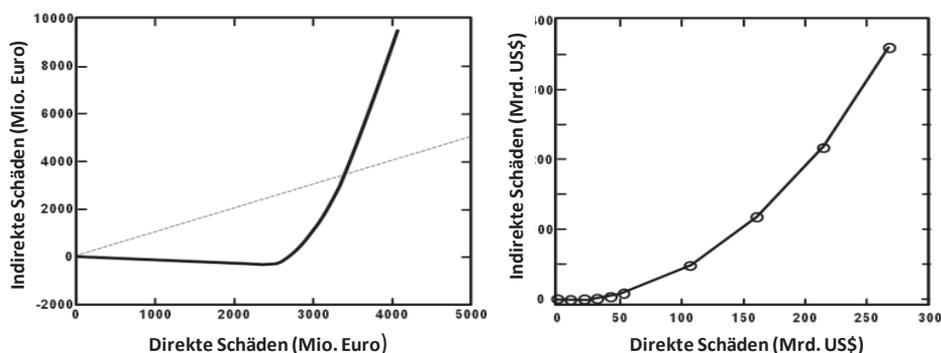


Abbildung 5: Indirekte ökonomische Schäden (Wertschöpfungsverluste) gegenüber direkten Schäden für Hamburg (UJEYL und KOWALEWSKI 2012, links) und für Louisiana (HALLEGATTE 2008, rechts).

Intangible Schäden: In einem umfassenden Wissensstandbericht (DASSANAYAKE und OUMERACI 2010) wurde aufgezeigt, welche Lücken die verfügbaren Methoden hinsichtlich (i) der Abschätzung der sozialen Schäden (Verlust an Menschenleben/Verletzungen und kulturelle Schäden) und Umweltschäden als Folge von Hochwasser und (ii) der Zusammenführung mit den tangiblen Schäden in einer Risikoanalyse aufweisen. Die Ergebnisse haben darüber hinaus insbesondere den Mangel an geeigneten Methoden für die Evaluierung der kulturellen und umweltbezogenen Schäden sowie ihre Integration mit anderen Schadenskategorien in der Risikoanalyse verdeutlicht. Aus diesem Grund wurde für die beiden Untersuchungsgebiete eine systematische Methodik entwickelt und umgesetzt, in deren Rahmen die intangiblen Schäden und ihre Integration mit den tangiblen Schäden ermittelt und ausgewertet werden (DASSANAYAKE et al. 2012; BURZEL et al. 2012).

In diesem Kontext kam das von PENNING-ROUSELL et al. (2005) vorgelegte Modell zur Bestimmung möglicher Todesopfer und Verletzungen durch Hochwasserereignisse zur Anwendung. Hierbei werden sowohl Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit als auch die Eigenschaften der gefährdeten Personen (Anzahl, Alter usw.) und Gebiete berücksichtigt. Da das Modell bis dato nur auf Flussüberschwemmungen angewendet wurde, wird aus Vergleichsgründen auch das von JONKMAN (2007) vorgelegte Modell eingesetzt.

Zur Bewertung der kulturellen Schäden wird jedoch eine neue Methode entwickelt, die auf den physischen Schäden durch Überflutung und den kulturellen Werten der Objekte basiert (DASSANAYAKE et al. 2011a). Für die Schätzung der direkten physischen Schäden an Kulturgütern werden Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit zugrunde gelegt. Der kulturelle Wert der verschiedenen Objektarten (denkmalgeschützte und nicht denkmalgeschützte Objekte) wird unter Einbeziehung ihrer historischen und gesellschaftlichen Bedeutung ermittelt. Die Ergebnisse werden gemäß einer fünfstufigen Skala von sehr niedrig (1) bis sehr hoch (5) in eine Matrix zur Bestimmung der kulturellen Schäden (Cultural Loss Assessment Matrix, CLAM) eingetragen. Die räumliche Analyse der sozialen Schäden wurde in ArcGIS für das Untersuchungsgebiet Hamburg erfolgreich durchgeführt (BURZEL et al. 2012).

Für die ökologischen Schäden wird ein in zwei Schritten durchgeführter Ansatz auf Grundlage der 2005 vom Millennium Ecosystem Assessment entwickelten Klassifizierung der Ökosystemdienstleistungen vorgeschlagen. Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden nur die Bereitstellungs-, Regulierungs- und Kulturdienstleistungen berücksichtigt, die unterstützenden Dienstleistungen werden ignoriert. Die Identifizierung der gefährdeten Ökosysteme und ihrer Dienstleistungen (1. Schritt) basiert auf der Analyse von den CORINE Land Cover-Daten und weiteren Informationen. Die Ermittlung der durch Flutwellenausbreitung bedingten (in Prozent gemessenen) Veränderungen (2. Schritt) erfolgt durch eine Betrachtung von Überflutungstiefe, Fließgeschwindigkeit, Überflutungsdauer und dem numerisch modellierten Salzgehalt. Der Ansatz wurde für das Untersuchungsgebiet Sylt bereits implementiert. Die räumliche Modellierung der Schäden erfolgt nach dem CRA-Ansatz (Cellbased Risk Assessment) (BURZEL und OUMERACI 2011).

Integration tangibler und intangibler Schäden: Da die verschiedenen Schadenskategorien in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden (wirtschaftliche Schäden in Euro, Todesopfer und Verletzungen in Anzahl der Personen, Kulturschäden auf einer

fünfstufigen Skala und ökologische Schäden in Prozent) bedurfte es einer einheitlichen Vorgehensweise zur Zusammenführung aller Kategorien. Diese wurde im Rahmen einer auf GIS basierenden Multikriterienanalyse (MCA) entwickelt. Die Methode umfasst acht Arbeitsschritte (1 – Problemdefinition, 2 – Bewertungskriterien, 3 – Auswahl der räumlichen Einheiten und der Gittergröße, 4 – Bewertung der Kriterien 5 – Gewichtung der Kriterien, 6 – Entscheidungsregeln, 7 – Klassifizierung von Alternativen, 8 – Sensitivitätsanalysen) und folgende Zielsetzungen: (i) Zusammenführung aller tangiblen und intangiblen Schäden in einer einstufigen Skala von 0 bis 1, (ii) Aggregation der Schäden entsprechend ihrer relativen Bedeutung und (iii) Bestimmung der Schwere des Gesamtflutschadens innerhalb des Untersuchungsgebiets mit einer Wertung von 0 oder 1, die jeder GIS-Gitterzelle zugewiesen wird. Für den 6. Schritt wird aus den verschiedenen MCA-Ansätzen das Verfahren der Multi-Attribute-Utility-Theorie (MAUT) und für den 5. Schritt (Gewichtung der Kriterien) eine paarweise Vergleichsmethode ausgewählt (DASSANAYAKE et al. 2011b). Diese Methode wurde in den Untersuchungsgebieten umgesetzt und stellt eines der wichtigsten Ergebnisse des Teilprojekts „Risikoempfänger“ dar (DASSANAYAKE et al. 2012; BURZEL et al. 2012).

3.3.2 Wichtigste Lehren

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die *Ermittlung der direkten ökonomischen Schäden* auf einer Mikroebene und ihre Zusammenführung auf der Mesoskala zwar daten- und arbeitsintensiver, jedoch im Vergleich zur herkömmlichen mesoskaligen Ermittlung lohnender ist. Die Ergebnisse belegen darüber hinaus zweierlei: (i) Der Wert der direkten Schäden alleine ist als Indikator für die Schwere der Schäden und als Grundlage für Entscheidungen in Bezug auf Risikoreduzierungsmaßnahmen nicht ausreichend; (ii) Eine konsistente Berücksichtigung der indirekten ökonomischen Schäden und intangiblen Schäden sowie ihre einheitliche Aggregation sind für den Erfolg der integrierten Risikoanalyse von großer Bedeutung. Die Ergebnisse aus der *Ermittlung der indirekten ökonomischen Schäden* zeigen deutlich die Hauptschwierigkeiten in Bezug auf die Definition, Messung und Prognose dieser Kosten als Funktion der Einzelkosten und unterstreichen den Bedarf an fundierten Kenntnissen über die wichtigsten wirtschaftlichen Zusammenhänge und marktbezogenen Prozesse, die der Wiederherstellungs- und Wiederaufbauphase nach einem Extremflutereignis zugrunde liegen. Dazu gehören insbesondere Informationen zu ungewöhnlichen Solidaritäts- und Unterstützungsleistungen auf regionaler/nationaler/internationaler Ebene sowie zu weiteren lenkenden/politischen Prozessen, die in den aktuellen Ermittlungsverfahren nicht berücksichtigt werden (HALLEGATTE 2008). Ein besserer Überblick über die Zusammenhänge zwischen den Wirkungsweisen des Finanz-/Geschäftssektors und den Mechanismen von Naturkatastrophen kann zu einem besseren Verständnis der zugrunde liegenden maßgeblichen Prozesse und der Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Auswirkungen von Naturkatastrophen auf Basis makroökonomischer Daten beitragen.

Bei der *Ermittlung intangibler Schäden* werden die Schadenskategorien in unterschiedlichen Einheiten gemessen und dann zu einem Endergebnis zusammengefasst und für die Schwere der Sturmflutschäden wird pro GIS-Gitterzelle ein Wert auf einer Skala von 0 bis 1 angegeben. Es wäre wünschenswert, wenn außerdem sämtliche Schäden anhand einer monetären, auf dem Lebensqualitätsindex (LQI) basierenden Skala bewertet werden

könnten. Hiervon würde der Entscheidungsfindungsprozess auf Grundlage einer Kosten-Nutzen-Analyse profitieren, aber auch die auf dieser Analyse basierende Bewertung des Nutzens verschiedener Maßnahmen zur Risikoreduzierung. Ein erster vielversprechender Versuch in Richtung eines LQI-basierten Ansatzes zur Ermittlung des Werts eines statistischen Lebens (VSL) wurde bereits durchgeführt (DASSANAYAKE und OUMERACI 2012).

Zur *Bestimmung der Kriterienwerte und -gewichtungen* innerhalb der MCA sollte ein strukturiertes Verfahren entwickelt werden, das auch die Meinung von Experten und der betroffenen Bewohner von überflutungsgefährdeten Gebieten berücksichtigt. Die letzte Gruppe ist besonders auch für die Bestimmung der relativen Bedeutung der verschiedenen Schadenskategorien relevant. Die Vielzahl der Begriffe zur Charakterisierung der verschiedenen Schadenskategorien im Zusammenhang mit Extremereignissen sowie die Vielfalt der Ermittlungsmethoden und der zugrunde liegenden Annahmen, spiegeln nicht nur die Konfusion im Schrifttum wider, sondern erschweren auch die Wahl einer geeigneten Methode und die sinnvolle Gegenüberstellung oder Zusammenführung der veröffentlichten Ergebnisse erheblich. Die Wahl der geeigneten Methode und des geeigneten Detaillierungsgrads der Analyse hängen in erster Linie vom Zweck der Schadensermittlung (Versicherung, Risikoreduzierung usw.) ab. Die Schwierigkeiten werden durch die inhärente Multidimensionalität der Auswirkungen von Extremereignissen und ihrer erheblichen Umverteilungseffekte sowie durch die extrem großen, selten bewerteten Unsicherheiten noch verstärkt. Aus diesem Grund ist eine *Harmonisierung im Bereich der Risikoanalyse*, möglich zwischen den Disziplinen und grenzüberschreitend, dringend erforderlich. Eine Harmonisierung würde die Evaluierung der großen Unsicherheiten, die derzeit in allen integrierten Risikobewertungen den kritischsten Engpass darstellt, voraussichtlich erheblich vereinfachen. Der Hauptgrund für die bestehenden Unsicherheiten ist mangelndes Wissen über die Wechselwirkung zwischen der sozioökonomischen Dynamik und der Wirkungsdynamik von Naturkatastrophen. Weitere Gründe sind die schlechte Datenlage und uneinheitliche Bewertungsmethoden.

3.4 Integrierte Risikoermittlung

Das Gesamtprojekt wurde für die beiden Untersuchungsgebiete Ende 2012 abgeschlossen. Es beinhaltet auch die Einbindung der Ergebnisse aus den Teilprojekten 1 bis 3 in die Risikoanalyse, um unterschiedliche Szenarien für extreme Sturmfluten, die Risikobewertung und die abschließende Empfehlung möglicher Maßnahmen zur Risikoreduzierung zu ermöglichen. Einige Ergebnisse aus den entwickelten Integrationsmethoden sind unten zusammengefasst.

Zellbasierte Risikobewertung (CRA): Ein auf Grundlage des GIS entwickelter Ansatz dient als flexibler und robuster Rahmen für die räumliche Modellierung der verschiedenen Flutschadenskategorien und ihre Zusammenführung in der integrierten Risikoanalyse. Aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der Eigenschaften von Gefährdung und Vulnerabilität in den überflutungsgefährdeten Bereichen beider Untersuchungsgebiete ist das in der Vergangenheit häufig verwendete GIS-Gitterkonzept unzureichend (z. B. kann nur ein Attribut in einer Rasterdatei gespeichert werden). Aus diesem Grund wurde ein polygonbasiertes Konzept für die räumliche Risikoanalyse entwickelt, das die Vorteile der Raster- und Polygonkonzepte nutzt. Für die CRA-basierte Analyse wird der überflutungsgefährdete Bereich in gleichmäßige Polygone (Zellen) einer gegebenen Größe unterteilt, die primär

von der Größe des Untersuchungsgebiets und der Bewertungsskala abhängt. Diese Zellen bilden ein gleichmäßiges Gitter und werden daher als Gitterzellen bezeichnet. In den Untersuchungsgebieten wurde mit Auflösungen von 100 m, 50 m und 10 m gearbeitet. Umfangreiche Geoprocessing-Workflows wurden mit der Model Builder-Umgebung in ArcGIS in einer modularen Struktur entwickelt, wodurch eine hohe Flexibilität des Modells und seine Anpassbarkeit an alle Untersuchungsgebiete und Auflösungen gewährleistet sind.

Der CRA-Ansatz umfasst drei Schritte: (i) Umwandlung aller unregelmäßigen Eingangsdaten in den zugewiesenen Bereich, (ii) Anwendung des ausgewählten Modells auf alle Zellen innerhalb des Untersuchungsstandorts und (iii) Visualisierung der Ergebnisse auf räumlicher Basis. Der CRA-Ansatz kam für die Modellierung tangibler Schäden (direkter und indirekter ökonomischer Schäden) und intangibler Schäden (Menschleben und Verletzungen, Schäden an Kulturgütern und Umweltschäden) für verschiedene Szenarien erfolgreich zur Anwendung (siehe Abschnitt 3.3).

Integration tangibler/intangibler Schäden und GIS-Zuordnung. Der von DASSANAYAKE et al. (2011b) entwickelte Ansatz auf MCA-Basis für die Zusammenführung der unterschiedlichen Schäden (siehe Abschnitt 3.3 oben) sieht die Anwendung des CRA-Ansatzes zur Generierung von Überflutungskarten, Karten für die einzelnen und aggregierten Schadenskategorien sowie Risikokarten vor, in denen Überflutungskarten und Schadenskarten kombiniert sind (Abb. 6). Insbesondere die Risikokarten für die einzelnen Schadenskategorien sowie die für verschiedene Extremsturmflutszenarien aggregierten Risikokarten bilden die Grundlage für die Evaluierung des prognostizierten Risikos im Vergleich zum tolerierbaren Risiko und letztendlich für die Empfehlungen möglicher Risikoreduzierungsmaßnahmen für beide hier betrachteten Untersuchungsgebiete. Zu diesem Zweck wird ein konsistenter und transparenter Rahmen mit den erforderlichen Methoden und Werkzeugen zur Bewertung tolerierbarer Risiken benötigt.

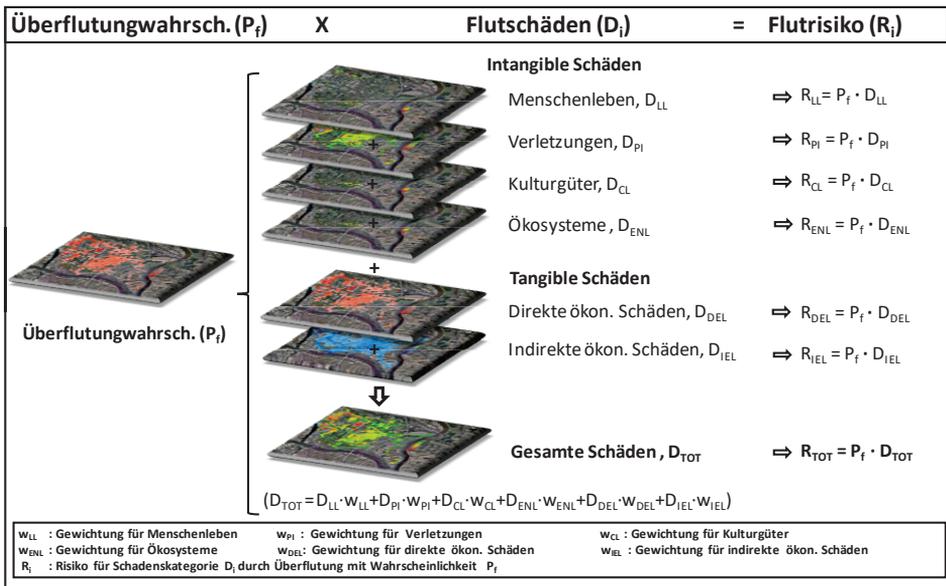


Abbildung 6: Risiko im Zusammenhang mit den verschiedenen Schadenskategorien und ihre Zusammenführung in der integrierten Risikoanalyse (modifiziert aus DASSANAYAKE et al. 2012a).

4 Abschließende Bemerkungen

Eines der Hauptmerkmale des XtremRisk-Projekts, das 2008 initiiert und Ende 2012 abgeschlossen wurde, ist der Detaillierungsgrad bei der Analyse der Risikoquellen (z. B. Effekt nichtlinearer Wechselwirkungen von extremen Sturmflut Komponenten), der Risikowege (z. B. Versagensmechanismen von Hochwasserschutzelementen und Versagenswahrscheinlichkeiten) und der Risikoempfänger (z. B. Berücksichtigung unterschiedlicher Kategorien von tangiblen und intangiblen Flutschäden). Im Rahmen der verfügbaren Kenntnisse/Modelle und der verfügbaren Zeit/Ressourcen für weitere und neue Entwicklungen wurde für diesen Detaillierungsgrad ein (innerhalb des Projektzeitrahmens praktisch umsetzbares) Höchstmaß eingehalten. Wir gehen daher davon aus, dass die vorliegende Untersuchung eine der am weitesten prozessbasierten integrierten Risikoanalysen von durch Sturmfluten verursachten Überflutungen in Küstenregionen darstellt. Dabei erfolgten die beispielhaften Anwendungen in zwei Untersuchungsgebieten, die als repräsentativ für eine offene Küste und ein urbanes Ästuar-Gebiet ausgewählt wurden. Der hohe Detaillierungsgrad war erforderlich, nicht nur, um die Defizite heutiger Kenntnisse/Modelle und Prioritäten für die weitere Forschung zu identifizieren, sondern auch, um zu erkennen, wo, wie und in welchem Maße Vereinfachungen im gesamten Risikoanalyseprozess möglich sind, ohne die wesentlichen Aspekte aus dem Blick zu verlieren. Diese Studie trägt möglicherweise außerdem dazu bei, die Ergebnisse vereinfachter oder ganzheitlicher Ansätze besser einzuschätzen, wie beispielsweise die Ergebnisse des Verbundprojekts HoRisk (SCHÜTTRUMPF et al. 2012) und des EU-THESEUS-Projekts (NARAYAN et al. 2013; ZANUTTIGH et al. 2013).

Die ultimative Herausforderung wird darin bestehen, nicht nur die weiter oben identifizierten entscheidenden Wissenslücken zu schließen, sondern auch den gesamten Prozess der Risikoanalyse zu vereinfachen, soweit dies in vernünftigem Maße durchführbar ist, das heißt ohne Auslassen wesentlicher Aspekte. So können den Anwendern und weiteren zukünftigen Entscheidungsträgern (z. B. bei Umsetzung der Europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie) verständliche und erschwingliche Methodensätze und Tools für die integrierte Risikoanalyse angeboten werden. Um die Ergebnisse der Verbundprojekte XtremRisk, HoRisk und THESEUS bestmöglich zu nutzen, wird für 2015 die Auflage eines neuen F&E-Projekts geplant, dessen ultimatives Ziel die Entwicklung eines Living Decision Support System (LDSS) mit einer modular aufgebauten Struktur für die in der Ingenieurpraxis relevanten drei Entscheidungsebenen ist: Durchführbarkeit, Voruntersuchung und Detailstudie. Das prospektive Ergebnis ist ein flexibles und belastbares Tool für integrierte Hochwasserrisikoanalysen im Küstenraum. Sein Anwendungsbereich umfasst risikobasierte Bemessung, Sicherheitsbeurteilung und Monitoring/Wartung von Hochwasserschutzsystemen sowie effizientes Flutrisikomanagement in Küsten- und Ästuargebieten. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf Schäden an sogenannten kritischen Infrastrukturen im Küstenraum liegen. Solche komplexen Systeme sind im Allgemeinen für Ereignisse und Bedrohungen wie Sturmfluten und Überschwemmungen im Küstenbereich bemessen, die mit Hilfe der vorhandenen Modellierungstools vorhersagbar und mit den relevanten Bemessungsstandards kompatibel sind. Bei schwer vorhersagbaren Ereignissen mit einer extrem niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit ist jedoch ein vollkommener Schutz weder technisch noch ökonomisch durchführbar, mit der Folge, dass solche Ereignisse im Regelfall zu katastrophalen Schäden und

Verlusten führen, wenn keine konsistenten und robusten Gegenmaßnahmen vorgesehen sind. Die Wirksamkeit der verschiedenen Gegenmaßnahmen ist vom Komplexitätsgrad des betrachteten Systems und seinen Bestandteilen (Teilsystemen) sowie seiner Einbettung in größere Systeme auf regionalem, nationalem und internationalem Maßstab abhängig. Eine Rolle spielen dabei auch Art, Größe und Frequenz des Extremereignisses, Art und Bedeutung der kritischen Infrastruktur, Art und relative Bedeutung möglicher Kaskadeneffekte, Kategorien und Größenordnungen potenzieller Schäden (wirtschaftliche, soziale und umweltbezogene Schäden) und die jeweils vorherrschende Risikokultur (Risikoakzeptanz). Kritische Infrastrukturen, die in ihre Umgebung eingebettet sind, sind insofern hochkomplexe und nichtlineare Systeme, als das gemeinsame Verhalten ihrer Bestandteile Eigenschaften hervorbringt, die sich kaum - wenn überhaupt - aus den Eigenschaften der einzelnen Bestandteile ableiten lassen. Das hat wesentlichen Einfluss auf den konzeptionalen und theoretischen Rahmen für die Entwicklung der Wissensbasis, Methoden, Modellierungsansätze und weiteren Analysetools/-techniken, um die grundsätzliche Funktionsweise komplexer Systeme zu verstehen, mit denen das Risiko bei unerwarteten Extremereignissen minimiert werden soll. In Verbindung mit den Resultaten der oben genannten abgeschlossenen und weiteren verwandten Projekte wird dies die Basis für das neue dreistufige LDSS bilden. Dabei ist noch zu klären, ob dieses System innerhalb eines agentenbasierten Modellierungsansatzes (ABM) oder in einem konventionelleren Rahmen entwickelt wird. In beiden Fällen wären Synergien aus einer transnationalen Partnerschaft und Zusammenarbeit wünschenswert.

5 Danksagung

Das Projekt XtremRisK wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert und unter dem Management des Projektträgers Jülich (Fördernummer 03F0483A) durchgeführt. Die Autoren danken auch den zuständigen Behörden LSBG und HPA für ihre Unterstützung beim Untersuchungsgebiet in Hamburg und dem LKN für die Unterstützung im Untersuchungsgebiet auf Sylt.

6 Schriftenverzeichnis

- BUIJS, F. A.; HALL, J. W.; SAYERS, P. B. and VAN GELDER, P. H. A. J. M.: Time-dependent reliability analysis of flood defences. In: Reliability Engineering and System Safety 94, 1942-1953, 2009.
- BURZEL, A. and OUMERACI, H.: Development of a Framework for the Spatial Modelling of Extreme Risks and the Consideration of Risk Acceptance: Progress Report. Leichtweiß-Institute, TU Braunschweig, 2011.
- BURZEL, A.; DASSANAYAKE, D. R. and OUMERACI, H.: Spatial Modelling of tangible and intangible Losses in Integrated Risk Analysis – Results of the XtremRisK Proc. 2nd European Conference on FLOODrisk Management, Rotterdam, 2012.
- DASSANAYAKE, D. R. and OUMERACI, H.: Framework and Methods for the Evaluation of Intangible Losses and their Integration in Coastal Flood Risk Analysis. State of the Art Report. Leichtweiß-Institute, TU Braunschweig, 80 p, 2010.

- DASSANAYAKE, D. R.; BURZEL, A.; KORTENHAUS, A. and OUMERACI, H.: Evaluation of cultural losses due to coastal floods. XtremRisK Progress Report. Leichtweiß-Institute, TU Braunschweig 38 p, 2011a.
- DASSANAYAKE, D. R.; BURZEL, A. and OUMERACI, H.: Integration of Tangible and Intangible Flood Losses: A GIS Based Multicriteria Analysis (MCA) Approach. XtremRisK Progress Report. Leichtweiß-Institute, TU Braunschweig, 40 p, 2011b.
- DASSANAYAKE, D. R.; BURZEL, A. and OUMERACI, H.: Intangible Flood Losses: Methodologies for their Evaluation and Integration in Flood Risk Analysis. Proc. 2nd European Conf. on FLOODrisk Management, Rotterdam, 2012a.
- DASSANAYAKE, D. R. and OUMERACI, H.: Value of statistical life based on life quality index. Progress Report. Leichtweiß-Institute, TU Braunschweig, 2012b.
- GÖNNERT, G. and SOSSIDI, K.: A new approach to calculate extreme storm surges: Analyzing the interaction of storm surge components. In: BENASSAI, G.; BREBBIA, C. A. and RODRIGUEZ, G. R. (Eds.): Coastal Processes II. Southampton, 139-150, 2011.
- GÖNNERT, G.; THUMM, S. and GERKENSMEIER, B.: Empirical analyses of extreme storm surges – Results of the XtremRisK project. Proc. 2nd European Conf. on FLOODrisk Management, Rotterdam, 2012.
- GÖNNERT, G. and GERKENSMEIER, B.: A 2-method-concept to approach extreme storm surge events – Combination of deterministic empirical and numerical methods. Proc. 10th Intern. Conf. Hydroinformatics, Hamburg, Germany, 2012.
- HALLEGATTE, S.: An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. In: Risk Analysis, Vol. 25, No. 3, 779-799, 2008.
- KORTENHAUS, A. and OUMERACI, H.: Flood risk analysis and management in Europe – The way ahead. Proc. of the 31st Intern. Conf. Coast. Eng. (ICCE), ASCE, Hamburg, Germany, 2008.
- MACAL, C. M and NORTH, M. J.: Tutorial on agent-based modelling and simulation Journal of Simulation 4, 151-162, 2010.
- NARAYAN, S. et al.: The SPR systems model as a conceptual foundation for rapid integrated risk appraisals: Lessons from Europe. In: Coastal Engineering 87, 15-31, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.021>
- NAULIN, M.; KORTENHAUS, A. and OUMERACI, H.: Reliability Analysis and Breach Modelling of Flood Defences in an Integrated Risk Analysis – Results of the XtremRisK Project. Proc. 2nd European Conf. on FLOODrisk Management, Rotterdam, 2012.
- OUMERACI, H.: Sustainable coastal flood defences: Scientific and modelling challenges towards an integrated risk-based design concept. Proc. First IMA Intern. Conf. on Flood Risk assessment, University of Bath, UK, 9-24, 2004.
- PENNING-ROWSELL, E. C.; FLOYD, P.; RAMSBOTTOM, D. und SURENDRAN, S.: Estimating Injury and Loss of Life in Floods: A Deterministic Framework. Natural Hazards 36, 43-64, 2005.
- SCHÜTTRUMPF, H.; BACHMANN, D.; GIER, F.; GRIMM, C. and WÖFFLER, T.: Vulnerability and Risk Assessment of the coastal zone in a changing environment. 26th Umbrella Symposium for the Development of Joint Cooperation Ideas “Sustainable Urban Development” 2012, Haifa, Israel, 2012.

- TAYEL, M. and OUMERACI, H.: Prediction of extreme storm surge water levels using recurrent artificial neural networks. Proc. 10th Intern. Conf. Hydroinformatics, Hamburg, Germany, 2012.
- TAYEL, M. and OUMERACI, H.: A hybrid approach using hydrodynamic modelling and artificial neural networks for extreme storm surge prediction (submitted this issue), 2014.
- UJEYL, G. and KOWALEWSKI, J.: Estimating Direct and Indirect Damages from Storm Surges: The Case of Wilhelmsburg/Hamburg. Proc. 10th Intern. Conf. Hydroinformatics, Hamburg, Germany, 2012a.
- UJEYL, G.; FRÖHLE, P. and PASCHE, E.: Evaluating direct damages of residential and commercial assets on a micro scale – Results of the XtremRisK Project. Proc. 2nd European Conf. on FLOODrisk Management, Rotterdam, 2012b.
- VROUWENVELDER, A. C. W. M.: Spatial effects in reliability analysis of flood protection systems. IFED Forum 2006, Lake Louise, Canada, 2006.
- WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN, J.: Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas: a stochastic storm surge model. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2925-2939, 2011.
- WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN, J.: Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 495-510, 2012a.
- WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN, J.: Statistical assessment of storm surge scenarios within integrated risk analyses – Results of the XtremRisK project. Proc. 2nd European Conf. on FLOODrisk Management, Rotterdam, 2012b.
- ZANUTTIGH, B. et al.: THESEUS decision support system for coastal risk management, Coast. Eng., 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.11.013>
- ZIO, E.: Reliability engineering: Old problems and new challenges. In: Reliability Engineering and System Safety 94, 2, 125-141, 2009.