

Gunilla KAISER, Oslo
Horst STERR, Kiel
Andreas KORTENHAUS, Braunschweig
Stefan REESE, Wellington, New Zealand
Hans-Jörg MARKAU, Eckernförde

Probabilistische Analyse von Sturmflutrisiken an der deutschen Nordseeküste

Summary

Vast low-lying areas at the German North Sea coast are affected by recurring storm surges. To mitigate flooding, a complex coastal protection and flood risk management system has been established over the last decades, which continuously needs to be further adapted to climate change conditions. Flood risk analysis can essentially contribute to coastal protection planning and risk management by providing information on the probability of flooding, its spatial distribution, and related damages. This paper deals with a methodology for probabilistic, micro-scale flood risk assessment for a coastal community in Schleswig-Holstein. The methodology and the results were compared to previous studies conducted in the area on different scales in order to assess the influence of scale on coastal flood risk analysis. The comparison showed that the results are strongly influenced by the assessment scale, the uncertainties of input parameters, and the selected vulnerability criteria. Probabilistic micro-scale assessments, combining the overall probability of flooding calculated by using a fault tree approach, scenario-based inundation simulations, and a local vulnerability assessment turned out to yield the most accurate and reliable spatial distribution of risk and are therefore indispensable for detailed flood risk analysis and advanced planning tools for local risk management.

1 Einleitung

Weltweit sind ausgedehnte Küstenniederungen von Sturmfluten und den damit verbundenen Überflutungsrisiken bedroht. Die sogenannte „Hollandflut“ im Jahre 1953, die über 2000 Menschenleben forderte, die Flutkatastrophe in Hamburg 1962, oder die Überflutung New Orleans durch Hurrikan Katrina, die einen Sachschaden in Höhe von ca. 125 Milliarden US Dollar verursachte (MUNICH RE 2006), haben gezeigt, welche Auswirkungen extreme Überflutungsereignisse in Küstenniederungen haben können. Neben dem Verlust von Menschenleben verursachen sie vor allem direkte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur sowie indirekte sozio-ökonomische Auswirkungen und Umwelteinwirkungen. Es ist davon auszugehen,

dass die bestehenden Risiken durch den anhaltenden Siedlungsdruck im Küstenraum sowie durch einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg zukünftig weiter zunehmen werden (NICHOLLS ET AL. 2008).

Diese weltweiten Risiken gelten entsprechend auch für den deutschen Küstenraum. So sind entlang der deutschen Nordseeküste rund 11.000 km² Küstenniederungen im Höhenbereich bis 5 m NN überflutungsgefährdet (STERR 2008). Sturmfluten mit Wasserständen von über 4 m über mittlerem Wasserspiegel (NN), meist verursacht durch starke West/Nord-West Winde, treten ca. 2–3 Mal pro Jahr auf. Sehr schwere Sturmfluten mit Wasserständen von über 5 m NN treten ca. ein Mal in 20 Jahren auf. Vor dem Hintergrund des vom Intergovernmental Panel on Climate Change projizierten globalen Meeresspiegelanstiegs und der Zunahme der Extremwetterlagen (MEEHL et al. 2007) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass auch die Gefährdung der deutschen Nordseeküste durch einen Anstieg des mittleren Tidehochwassers und eine mögliche Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und -intensität weiter zunimmt (STERR 2008; GÖNNERT u. FERK 1996; HOFSTED 1996; WOTH et al. 2006). Die Risiken werden verstärkt durch das Vorhandensein hoher materieller Werte im deutschen Küstenraum wie Häfen oder touristische Infrastruktur.

Die Besiedlungsgeschichte der ausgedehnten Küstenniederungen der Nordsee-region und das Ausmaß vergangener Katastrophen haben dazu geführt, dass umfangreiche Küstenschutz- und Risikomanagementkonzepte entwickelt und umgesetzt wurden, so dass heute der größte Teil der Nordseeküste durch Deiche und andere Bauwerke geschützt ist. Um sich jedoch auf Veränderungen im Klimawandel einzustellen, bedarf es einer ständigen Weiterentwicklung von Methoden und Maßnahmen zum Umgang mit der Gefährdung und zum Schutz der betroffenen Gebiete. Nicht zuletzt unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten wird in jüngster Vergangenheit zunehmend versucht, den rein technischen Küstenschutz aufzubrechen und dynamische, ganzheitliche Risikokonzepte zu entwickeln. Der genauen Abschätzung gegenwärtiger und zukünftiger Risiken sowie deren räumlicher Verteilung kommt dabei eine große Bedeutung zu. Die Risikoanalyse ist ein wichtiges Instrumentarium, welches es ermöglicht, die Gefährdung sowie den potentiellen Schaden durch ein Sturmflutereignis zu berechnen und damit das Risiko und dessen räumliche Verteilung zu quantifizieren. Eine auf diese Weise generierte Risikokarte ist beispielsweise eine wichtige Grundlage für die Küstenschutzplanung.

Im Folgenden wird ein Konzept zur Risikoanalyse von Sturmfluten vorgestellt. Anschließend werden die für die deutsche Nordseeküste auf mehreren Skalen durchgeführten Risiko- und Vulnerabilitätsanalysen dargestellt und deren Ergebnisse verglichen und diskutiert. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der jüngsten Studie, einer probabilistischen, mikroskaligen Risikoanalyse für die Gemeinde St. Peter-Ording in Schleswig-Holstein.

2 Konzeptioneller Rahmen einer Risikoanalyse für sturmflutgefährdete Küsten

Risikoanalysen von Überflutungen werden sowohl für Extremereignisse an Küsten, wie Sturmfluten oder Tsunamis, als auch an Flüssen und im Zusammenhang mit

langfristigen Überflutungen durch einen Meeresspiegelanstieg durchgeführt. Risiko wird innerhalb verschiedener Disziplinen häufig unterschiedlich definiert (SAMUELS et al. 2009). In der technisch-naturwissenschaftlichen Risikoanalyse ist die Definition $Risiko = Wahrscheinlichkeit \times Konsequenzen$ (HELM 1996; SAMUELS et al. 2009) gängig, da sie explizit einen probabilistischen Ansatz begründet. Eine Risikoanalyse von Sturmfluten beinhaltet dabei eine Gefährdungs- und eine Vulnerabilitätsanalyse sowie deren Verknüpfung zur Abschätzung des Risikos in quantitativer oder qualitativer Form (REESE 2003). Im Rahmen einer Gefährdungsanalyse gilt es, die Auftretswahrscheinlichkeit einer Überflutung zu ermitteln während die Vulnerabilitätsanalyse die Verwundbarkeit oder das „Schadenspotential“ des betroffenen Küstenabschnitts beschreibt.

Um das Überflutungsrisiko in seinem Ablauf besser erfassen zu können, erfolgt eine Aufteilung in drei Abschnitte (Risikoquelle – Risikopfade – Risikoempfänger) nach dem so genannten Source-Pathway-Receptor-Modell (KUNDZEWICZ u. SAMUELS, 1997). Diese Abschnitte werden einzeln betrachtet und im Folgenden genauer beschrieben.

Im ersten Teil der Risikoanalyse wird der Ursprung des Risikos, die Risikoquelle (Source), hier also die Sturmflut, beschrieben und zudem eine Auftretswahrscheinlichkeit ermittelt. Dabei sind die wesentlichen kennzeichnenden Parameter einer Sturmflut darzustellen und statistisch zu beschreiben wie z.B. der Wasserstand und die damit verbundenen Seegangs- und/oder Windparameter. Hierfür werden in der Regel Langzeitmessungen herangezogen, die dann statistisch ausgewertet werden. Ziel dieser Analysen ist es, eine Auftretswahrscheinlichkeit eines Wasserstandes oder eine kombinierte Wahrscheinlichkeit von Wasserstand und Seegangsparametern zu ermitteln.

Der zweite Teil, die Risikowege (Pathways), beschreiben den Weg, durch den es zu einer Überflutung kommt, also zum Beispiel das Versagen eines Küstenschutz-elementes und die damit verbundene Versagenswahrscheinlichkeit unter der Bedingung, dass die im ersten Teil ermittelte Sturmflut mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit auftritt. Hierbei werden Versagenswahrscheinlichkeiten (von Küstenschutzsystemen) und Randbedingungen ermittelt, die zu einer Überflutung des Hinterlandes führen, also z.B. die Bruchentwicklung eines Deiches und die daraus in das Hinterland einfließende Wassermenge.

Der dritte Teil befasst sich mit den Risikoempfängern (Receptor), für die die Auswirkungen der durch die Sturmflut entstandenen Überflutung ermittelt werden. Dies umfasst eine Quantifizierung von betroffenen Personen und Eigentumswerten sowie in Abhängigkeit von der Wassertiefe im Überflutungsgebiet den tatsächlich zu erwartenden Schaden.

Abbildung 1 skizziert den konzeptionellen Rahmen einer Risikoanalyse für Sturmfluten anhand des Source-Pathway-Receptor-Modells (SPR Modell). Dabei wird aus der Überflutungswahrscheinlichkeit (aus „Risikoquelle“ und „Risikowege“) und den zu erwartenden Auswirkungen (aus „Risikoempfänger“) das Überflutungsrisiko berechnet. Wenn dieses Risiko mit einem akzeptierten Risiko verglichen wird, lässt sich ein Restrisiko ermitteln, das dann im Rahmen eines Risikomanagements optimiert, d.h. in der Regel verringert werden kann.

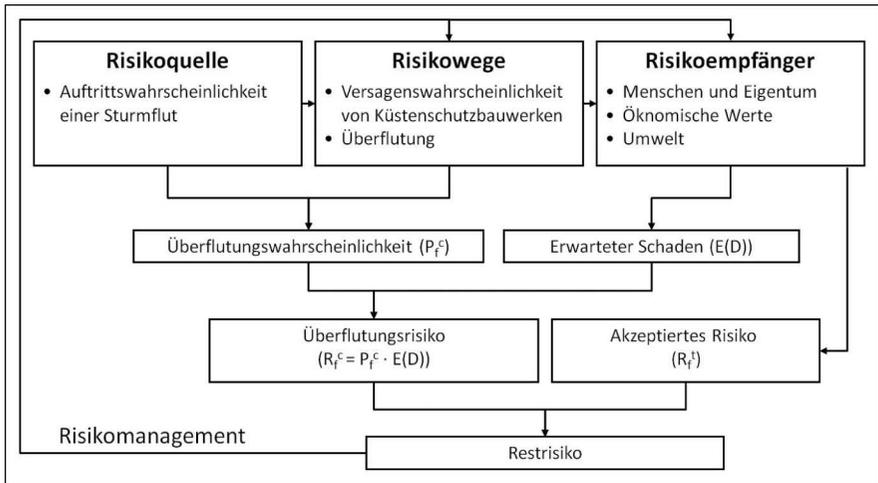


Abb. 1: Konzeptioneller Rahmen und Vorgehensweise bei einer Risikoanalyse von Sturmfluten nach dem SPR Modell (basierend auf KUNDZEWICZ u. SAMUELS 1997).

Eine Risikoanalyse lässt sich auf unterschiedlichen Maßstabsebenen sowie mit unterschiedlicher Auflösung der zugrundeliegenden Daten durchführen. Man unterscheidet hierbei die globale/nationale, die regionale sowie die lokale Maßstabsebene, die sich vorrangig anhand der Größe des Untersuchungsgebietes kennzeichnen lässt. REESE (2003) unterscheidet darüber hinaus makro-, meso- und mikroskalige Analysemethoden, die sich nach Detailgrad der zugrundeliegenden Daten und Aufwand für die Untersuchung voneinander abgrenzen lassen. Makroskalige Risiko- und Vulnerabilitätsanalysen werden überwiegend in globalen oder nationalen Studien verwendet und basieren aufgrund der Größe des Betrachtungsraumes auf stark aggregierten Daten. Mesoskalige Analysen hingegen berücksichtigen regionale Gegebenheiten wie beispielsweise Küstenschutzbauwerke und ziehen weniger stark aggregierte Basisdaten heran (z.B. Gemeindestatistiken). Mikroskalige Analysen werden auf lokaler Ebene durchgeführt und basieren auf einer lokal-spezifischen Analyse der Gefährdungssituation und der objektscharfen Abgrenzung der Schadenskategorien (vgl. Tabelle 1).

Auf globaler/nationaler Ebene wurden bisher vorrangig die durch einen Meeresspiegelanstieg gefährdeten Regionen betrachtet und die betroffene Bevölkerung, der gefährdete Flächenanteil, sowie das dort befindliche Schadenspotential ermittelt (HOOZEMANS et al. 1993; VAFEDIS et al. 2008). Diese Studien zielten meist auf einen großräumigen Länder- oder Regionenvergleich ab, für den es einer möglichst einheitlichen Datengrundlage bedarf. Für eine Abschätzung des Sturmflutrisikos und den daraus abzuleitenden, notwendigen Küstenschutzmaßnahmen bedarf es jedoch genauerer Untersuchungen hinsichtlich lokaler hydrographischer Bedingungen, Topographie, sozio-ökonomischer und ökologischer Werte sowie Anpassungsmöglichkeiten der betroffenen Küstenregion (STERR et al. 2003). In regionalen (HAMANN u. KLUG 1998; KLAUS u. SCHMIDTKE 1990; GORNITZ et al. 1994) und lokalen Studien (REESE et al. 2003; REESE 2003) erfolgte daher die Nutzung höher

auflösender Daten sowie die Einbeziehung lokaler Statistiken und Daten aus Feldmessungen und Geländekartierungen.

Die Wahl der Maßstabsebene für eine Risikoanalyse hängt damit unmittelbar von der Zielsetzung der Untersuchung ab.

Tabelle 1: Maßstabsabhängigkeit bei der Risikoanalyse

Räumliche Auflösung	Datengenauigkeit, Datengrundlage	Anwendung
Global/national	Makroskalig Wasserstandsszenarien, gering aufgelöstes Geländemodell, nationale Statistiken	Nationaler/internationaler Vergleich
Regional	Mesoskalig Wasserstandsszenarien, Küstenschutz, ergänzende Strukturen im Geländemodell, Gemeindestatistiken	Regionale Planung und Management
Lokal	Mikroskalig Hoch aufgelöstes Geländemodell, genaue Geometrie der Küstenschutzbauwerke, Versagensmechanismen, Schadensermittlung auf Basis einzelner Objektwerte	Planung einzelner Küstenschutzmaßnahmen, Evakuierungsplanung, Vorsorge, Bauvorschriften

3 Risikoanalysen für die deutsche Nordseeküste

3.1 Risiko- und Vulnerabilitätsanalysen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen

Da die Küstenniederungen Norddeutschlands seit jeher Überflutungsrisiken ausgesetzt sind, hat der Küstenschutz, insbesondere an der Nordseeküste, eine lange Geschichte. Insbesondere nach der schweren Sturmflut im Jahre 1962, die über 300 Menschenleben forderte, zu zahlreichen Deichbrüchen führte und Schäden in Höhe von mehreren hundert Millionen Euro verursachte, wurden umfangreiche Deicherhöhungen um bis zu 2 m vorgenommen. Dadurch verursachte die bisher höchste Sturmflut, mit 5,61 m NN am Pegel Husum 1976 nur geringe Schäden. Weitere Sturmfluten 1981 und 1999 übertrafen ebenfalls 5 m NN.

Der gegenwärtige Küstenschutz, der in großen Teilen aus Deichen besteht, zielt vorrangig darauf ab, Überflutungen und Erosion zu verhindern. Risiko- und Vulnerabilitätsanalysen werden dabei ein zunehmend wichtiger Bestandteil der Küstenschutzplanung. Für die deutschen (hier im speziellen die schleswig-holsteinischen) Küsten wurden Vulnerabilitätsanalysen bereits auf unterschiedlichen Maßstabsebenen durchgeführt: (a) eine nationale Studie für alle Gebiete < 5m Geländehöhe (EBENHÖH et al. 1996), (b) eine regionale Studie für Schleswig-Holstein (HAMANN u. KLUG 1998; HOFSTEDT u. HAMANN 2000), sowie (c) eine lokale Studie für ausgewählte Gemeinden in Schleswig-Holstein (REESE et al. 2003; REESE 2003). In

diesen Studien wurde bewusst ein „downscaling“ Ansatz gewählt, um die Ergebnisse im Hinblick auf die unterschiedlichen Maßstabebenen zu untersuchen. Entsprechend des Betrachtungsraumes wurden verschiedene Untersuchungsräume gewählt (vgl. Abbildung 2).

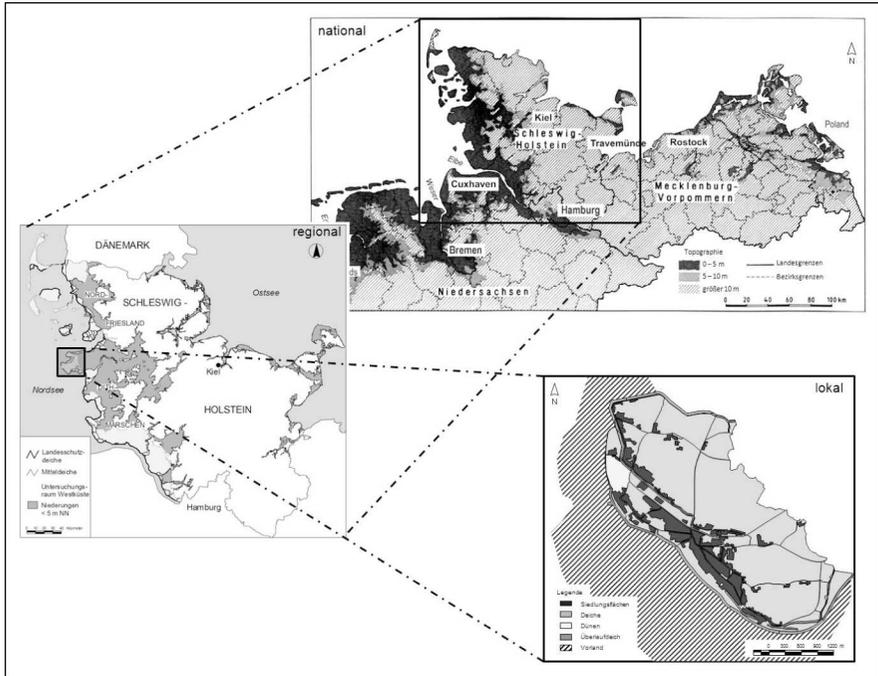


Abb. 2: Untersuchungsgebiete an den deutschen Küsten auf unterschiedlichen Maßstabebenen: national (Deutsche Küste), regional (Schleswig-Holstein), lokal (Gemeinde St. Peter-Ording), (eigene Darstellung, nach STERR 2008 sowie HAMANN und KLUG 1998)

Die nationale Studie untersuchte die gesamte deutsche Küste über ihre Länge von 3.700 km, von denen rund 1.590 km auf die flache, aus Marschen und Dünen bestehende, Nordseeküste entfallen (STERR 2008). Die Studie folgte der „Common Methodology“ der IPCC Coastal Zone Management Subgroup (CZMS), einer makroskaligen Methode zur Abschätzung der Vulnerabilität von Küstenzonen bei einem Meeresspiegelanstieg und wurde für die deutschen Küsten angewendet, um die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels für Küstenniederungen zu quantifizieren (STERR 2008). Die regionale Studie befasste sich ausschließlich mit den Küstenniederungen Schleswig-Holsteins, von denen etwa 24% (fast 4.000 km²) der Gesamtfläche als überflutungsgefährdet gelten (MLR 2001). Um einen für die Küstenschutzplanung benötigten höheren Detailgrad auf regionaler Ebene zu erhalten, nahmen HAMANN u. KLUG (1998) und COLIJN et al. (2000) im sogenannten „Bewertungsgutachten“ eine Bewertung des sozio-ökonomischen Schaden-

potentials für Schleswig-Holstein in einer mesoskaligen Studie vor und nutzten dabei höher aufgelöste Daten. Darüber hinaus wurde in einer lokalen Studie eine Methode zur mikroskaligen Vulnerabilitätsabschätzung (MERK Studie – Mikroskalige Evaluierung der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen) entwickelt und in ausgewählten Gemeinden Schleswig-Holsteins durchgeführt (REESE et al. 2003; REESE 2003). Hierbei wurden das ökonomische Schadenpotential und der Schaden für gegebene Szenarien auf Objekt-Ebene ermittelt.

Während in diesen Studien schwerpunktmäßig die Vulnerabilität bestimmt wurde, wurde in einer jüngsten, vierten Studie im Rahmen des EU-Projektes FLOODsite explizit das Risiko für die Gemeinde St. Peter-Ording im Rahmen einer probabilistischen, lokalen Studie ermittelt. Diese Studie (SPO-Studie) soll im Folgenden beschrieben werden.

Die Gemeinde St. Peter-Ording wurde ausgewählt, da sie mit rund 4.000 Einwohnern eine der größten Gemeinden an der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste darstellt. Mit mehr als 100.000 Gästen pro Jahr bildet der Tourismus einen wichtigen Wirtschaftszweig. Darüber hinaus hat die Gemeinde eine überregionale Funktion als Kurort mit einer Vielzahl an Krankenhäusern und Kurzentren. St. Peter-Ording liegt exponiert an der Westküste Eiderstedts und ist durch hohe Dünen sowie eine Deichlinie vor Sturmfluten geschützt. Das Untersuchungsgebiet ist 6.000 ha groß wobei ca. 4.000 ha aufgrund der Höhenlage < 5 m als überflutungsgefährdet betrachtet werden können. Die Gemeinde wird heute durch ein komplexes Küstenschutzsystem geschützt, bestehend aus einem Vorland, einem Dünengürtel (bis zu 18 m hoch), einer Hauptdeichlinie und einer zweiten Deichlinie. Der Hauptdeich ist 12,5 km lang und ca. 8 m hoch. Im Westen befindet sich ein niedrigerer, asphaltierter Überlaufdeich, der Wellenüberlauf zulässt.

3.2 Gefährdungsanalyse

Im Rahmen der Gefährdungsanalyse gilt es zunächst, das bei einem Szenario überflutete Gebiet zu ermitteln.

Sowohl in der nationalen als auch in der regionalen Studie wurden im Rahmen der Gefährdungsanalyse die 5 m-Höhenlinie herangezogen. Dabei wird angenommen, dass das Wasser infolge eines Deichbruches in das Hinterland einströmt und sich bis in eine Höhe von 5 m anstaut. In der regionalen Studie wurde zusätzlich die zweite Deichlinie berücksichtigt, da eine Ausbreitung des Wassers weiter ins Hinterland nur durch einen Deichbruch oder Überlauf erfolgen kann. In beiden Studien wurde hierfür ein deterministischer Ansatz gewählt, der die maximale Ausdehnung einer potentiellen Überflutung darstellt. Im Rahmen der lokalen (MERK) Studie wurde dieser Ansatz erweitert und es wurden für die jeweiligen Gemeinden potentielle Deichbruchstellen im Rahmen von Expertengesprächen ermittelt, von denen aus dann eine Überflutung vorangig anhand des Einströmvolumens, der Einström- und Auslaufdauer und der Höhenstruktur GIS-basiert modelliert wurde.

Um das tatsächliche Risiko, welches eine Wahrscheinlichkeit beinhaltet, zu bestimmen, wurde im Rahmen der SPO-Studie erstmalig die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit aller Hochwasser- und Küstenschutzmaßnahmen und damit die

Auftrittswahrscheinlichkeit einer Überflutung für St. Peter-Ording berechnet. Hierfür wurde die Küstenschutzlinie in verschiedene Abschnitte unterteilt, die unabhängig voneinander behandelt werden konnten, so dass die Versagenswahrscheinlichkeit für jeden dieser Abschnitte berechnet werden konnte. Typischerweise dauern Sturmfluten nicht länger als 12 bis 24 Stunden, können aber den Wasserstand erheblich ansteigen lassen (bis zu 3,5 m an der Nordseeküste). Die Interaktion zwischen normalen Tiden (ein Tidenhub von 1–2 m ist typisch für die südliche Nordseeküste), Sturmfluten und Wellen sind für die Bestimmung des Wasserstandes an der Küste wesentlich. Tidewasserstandsdaten von hoher Qualität sind für einen Zeitraum von mehr als 70 Jahren an den Pegeln Husum und Büsum verfügbar. Die Vorstrandtopographie (Höhen von NN +1.5 m bis NN +3.7 m, aus digitalen Karten und Laserscandaten) spielt eine wesentliche Rolle bei der Bestimmung der Wellen am Bauwerksfuß und muss berücksichtigt werden. Im Falle von St. Peter-Ording führen die niedrigen Wasserstände über dem Vorland dazu, dass die Wellen über dem Vorland brechen und daher die maximalen Wellenhöhen an den Küstenschutzbauwerken begrenzt sind.

Die Risikopfade, die den Weg bezeichnen, auf dem sich das Risiko von der Quelle bis zum Empfänger bewegt, setzen sich in der Hauptsache aus mehr als 12 km Deichen (Gras- und Asphaltdeiche) und einer Dünenkette von mehr als 2,5 km Länge zusammen. Im Rahmen dieser Studie wurden jedoch nur die Deiche behandelt, da die Dünen wegen ihrer deutlich größeren Höhe und ihrem großen Volumen (mehrere Dünen hintereinander) als deutlich sicherer als die Deiche eingestuft wurden. Hochauflösende Laserscandaten wurden für die detaillierte Bestimmung der Deichhöhen (zwischen 6,22 m NN und 8,43 m NN) und die Unterteilung in verschiedene „homogene“ Abschnitte der Küstenschutzlinie verwendet. Dreizehn Abschnitte wurden identifiziert, wobei für jeden dieser Abschnitte über die Abschnittslänge konstante Parameter angenommen werden, d.h. dass sich Wasserstand, Seegang und Bauwerksparameter über diese Länge nicht ändern. Die Versagenswahrscheinlichkeit der Abschnitte (Deichversagen pro Jahr) wurde auf der Basis bekannter Versagensmechanismen (KORTENHAUS 2003) und Fehlerbäume sowohl für See- als auch für Flussdeiche (SCHÜTTRUPF u. OUMERACI 2004; HÜLS u. SCHWINGE, 2003) beschrieben und liegt üblicherweise in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-6} , d.h. einem Wiederkehrintervall von 10.000 bis 1.000.000 Jahren (vgl. auch BALAS et al. 2004 und VRIJLING 2001). Die Unsicherheiten der in den hier verwendeten Modellen eingehenden Parameter wurden dabei anhand von statistischen Verteilungsfunktionen aus der Literatur abgeschätzt.

Der Abschnitt mit der höchsten Deichbruchwahrscheinlichkeit wurde als der Abschnitt angenommen, in dem die tatsächliche Deichbruchstelle durch eine visuelle Inspektion und durch eine Diskussion mit den lokalen Behörden festgelegt wurde. Die Analyse der Küstenschutzlinie hat außerdem gezeigt, dass die niedrigste Stelle der Deiche schon bei relativ niedrigen Sturmflutwasserständen überläuft. Daher wurde ein Überflutungsszenario für einen Bemessungswasserstand von 5,30 m NN, Wellenüberlauf über den Asphaltdeich bei Ording und eine Deichbruchstelle im Süden des Untersuchungsgebietes angenommen (Überflutungswahrscheinlichkeit von $P_{\text{flooding}} = 9,6 \times 10^{-8}$ /Jahr, im Folgenden als Szenario Sc530 bezeichnet).

Zur Ermittlung der Überflutungsausdehnung auf lokaler Ebene kommen überwiegend numerische Modelle zum Einsatz. Ein Vergleich verschiedener Überflutungsmodelle (HALL et al. 2005; HORRITT u. BATES 2002) mit unterschiedlicher Genauigkeit hat gezeigt, dass eine möglichst genaue Simulation der Überflutung für die Ermittlung der Überflutungsflächen und damit auch für die darin auftretenden Schäden unverzichtbar ist. In der SPO-Studie wurde das numerische, nicht-lineare Flachwasser (NLSW-) Modell SOBEK für die Simulation von Überflutungen genutzt, welches im Rahmen des Projekts zur Verfügung gestellt wurde (<http://delftsoftware.wldelft.nl/>). SOBEK lieferte Überflutungstiefen, Geschwindigkeiten und die Dauer der Überflutung für jeden Punkt im Überflutungsgebiet (Abbildung 3). Für eine Überprüfung der Ergebnisse ist eine zusätzliche Validierung durchzuführen, wenn entsprechende Daten vorliegen.

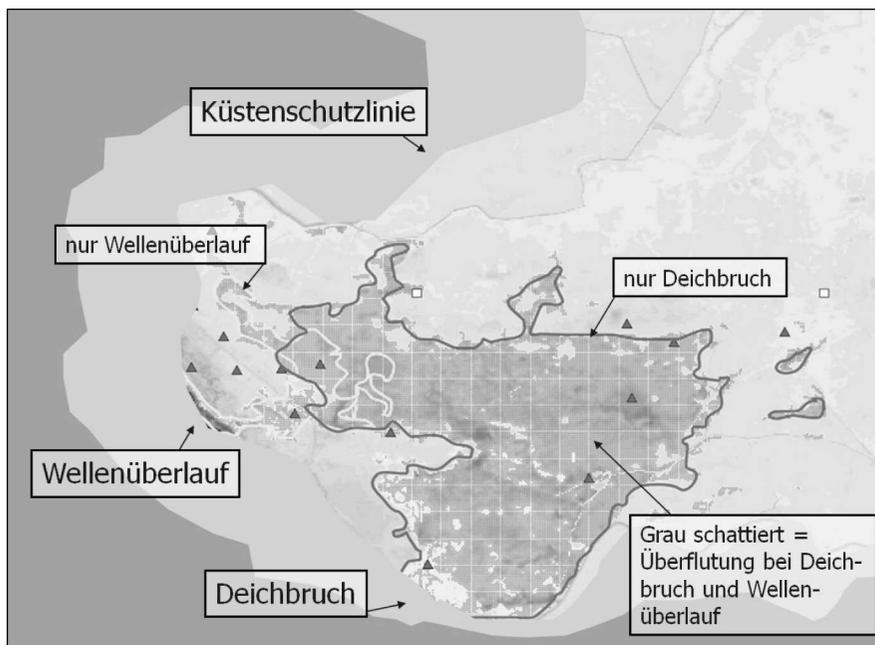


Abb. 3: Simulierte Überflutung für das Szenario Sc530 in St. Peter-Ording (eigene Darstellung)

Die Ausdehnung der Überflutung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Ergebnisse der Überflutungsmodellierung haben die Rolle von einigen Gefährdungsparametern aufgezeigt. Besondere Bedeutung haben dabei:

- Gräben und Kanäle hinter dem Deich, die einen Beitrag für die schnellere Ausbreitung des Wassers leisten,
- die zweite Deichlinie, die wesentlich für die Vermeidung weiterer Überflutung verantwortlich ist,
- Rauigkeiten (Manning-Beiwert) der Überflutungsflächen und
- die Breschenbreite, die die maximale und minimale Ausdehnung der Über-

flutung zwar nicht wesentlich beeinflusst (vgl. Abbildung 3), aber deutlich unterschiedliche Geschwindigkeiten bewirkt.

3.3 Vulnerabilitätsanalyse

Im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse wird das erwartete Schadensausmaß bestimmt und quantifiziert. Die durchgeführten Studien unterscheiden sich hier vorrangig in der Anzahl der Schadenskategorien und der Genauigkeit der zugrundeliegenden Daten.

Im Rahmen der nationalen und der regionalen Studie wurden die betroffene Bevölkerung und das Schadenspotential anhand von Statistiken ermittelt. In der lokalen Studie (MERK-Studie) wurde eine Methode zur mikroskaligen Wertermittlung entwickelt (REESE 2003) und mit Hilfe von Geländekartierungen, Befragungen und Statistiken die Objekt-genauen Werte für 15 Schadensklassen erfasst (s. Tabelle 2). Auf diese Weise konnte das exakte Schadenspotential für die jeweils spezifischen Überflutungsräume (darunter St. Peter-Ording) erhoben werden. Da jedoch im Falle einer Überflutung nicht das gesamte Schadenspotential betroffen ist, wurde mit Hilfe von Wasserstand-Schaden-Funktionen der tatsächliche Schaden bei einem bestimmten Wasserstand ermittelt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass diese Funktionen das Verhältnis zwischen dem Wasserstand an einzelnen Objekten und dem zu erwartenden Schaden darstellen (REESE 2003). Die SPO-Studie baut im Wesentlichen auf die MERK-Studie auf, wurde jedoch in einigen Punkten weiterentwickelt.

Die betroffene Bevölkerung wurde ebenso über die Gemeindestatistik erfasst und räumlich anhand der Gebäude verteilt. Darüber hinaus wurden saisonale Veränderungen in der Bevölkerungszahl berücksichtigt. Bis dato wurden lediglich die betroffene Bevölkerung quantifiziert, nicht jedoch deren Verwundbarkeit. Um eine Aussage über die Verwundbarkeit der betroffenen Menschen zu erlangen, wurden zunächst Vulnerabilitätsfaktoren für St. Peter-Ording bestimmt. Hierzu wurden folgende Bevölkerungsstrukturen räumlich erfasst (nach MEYER et al. 2009): (1) Personen mit einem Alter von > 70 Jahren und Kinder mit einem Alter von < 8 Jahren, da davon auszugehen ist, dass diese Personen im Falle einer Katastrophe besonders anfällig sind, (2) zentrale Einrichtungen wie Schulen, Kindergärten, Altersheime, Jugendhäuser und Kliniken, da diese Einrichtungen im Falle einer Überflutung besonders gefährdet und im Rahmen einer Evakuierungsplanung speziell zu berücksichtigen sind, und (3) Einwohner, die in Zonen höchsten Risikos direkt hinter dem Deich leben, wo Wasserstand und Fließgeschwindigkeit am höchsten sind. Die Erfassung der tangiblen Schäden erfolgte durch eine objektbasierte Abschätzung der monetären Werte auf Gebäudeskala, die im Falle einer Überflutung betroffen wären. Hier wurde in einem ersten Schritt eine Schadenspotentialanalyse durchgeführt, um alle potentiell gefährdeten Werte zu erfassen (Abbildung 4). Basierend auf der MERK Datenbank, die alle Werte für St. Peter-Ording enthält, wurden in der SPO Studie aus den 15 Schadenskategorien vier Haupt-Schadenskategorien ausgewählt: (a) Gebäude, (b) privates Inventar, (c) Ausrüstungsvermögen und (d) Bruttowertschöpfung, da eine Analyse der Datenbank gezeigt hatte, dass diese vier Schadenskategorien in allen Untersuchungsgebieten des MERK-Projektes über 90% des gesamten ökonomischen Schaden-

potentials ausmachen. Es ist daher davon auszugehen, dass diese repräsentativ für Küstengemeinden in Schleswig-Holstein sind. Eine Reduktion der Vulnerabilitätsanalyse auf diese vier Schadenskategorien erscheinen daher sinnvoll, da dadurch die Analyse vereinfacht und dennoch die mikroskalige Herangehensweise beibehalten wird. Die Werte für die vier Schadenskategorien wurden dann, nach einer aus dem MERK Projekt abgeleiteten, standardisierten Methode (vgl. REESE 2003) ermittelt. Eine Grundlage für die Wertermittlung stellte dabei das Amtliche Liegenschaftskataster (ALK) dar, aus dem digitale Grundrisse einzelner Gebäude sowie deren Nutzung und Größe entnommen werden konnten. Für Gebäude- und Inventarwerte konnten dann Mittelwerte aus der MERK Datenbank abgeleitet werden. Um die Bruttowertschöpfung zu ermitteln, wurde die Größe gewerblicher oder industrieller Flächen aus der ALK entnommen und die Beschäftigten/m² aus der MERK Datenbank abgeleitet. Diese wurden dann mit Statistiken zur Bruttowertschöpfung/Beschäftigtem aus statistischen Daten kombiniert. Das Ausrüstungsvermögen ließ sich ebenfalls aus der MERK Datenbank ableiten, für die es mit Hilfe von Interviews erhoben worden war (vgl. REESE 2003).

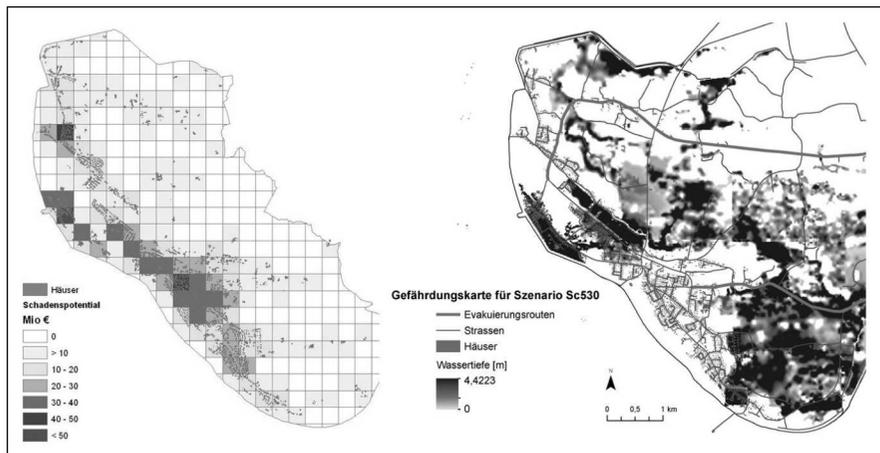


Abb. 4. Schadenspotential für St. Peter-Ording (links) und Überflutungskarte mit Wassertiefen für das Szenario Sc530 sowie Evakuierungsrouten (rechts) (eigene Darstellung)

Auf Basis des Überflutungsszenarios Sc530 und des berechneten Schadenpotentials konnten dann die Schäden mittels Wasserstand-Schaden-Funktionen für verschiedene Szenarien ermittelt werden.

3.4 Risikoabschätzung

Eine Abschätzung des Risikos erfordert eine Berechnung der tatsächlichen Auftretswahrscheinlichkeit einer Überflutung, die maßgeblich von der Versagenswahrscheinlichkeit der Bauwerke (Deiche) abhängt. Eine solche Versagenswahrscheinlichkeit wurde ausschließlich in der SPO-Studie durchgeführt.

	Nationale Studie	Regionale Studie SH	MERK-Studie	SPO-Studie
Maßstabsebene	makro	meso	mikro	makro
Untersuchungsraum	Deutsche Küste	Küste Schleswig-Holsteins	einzelne Gemeinden in Schleswig-Holstein	Gemeinde St. Peter-Ording
Datengenaueigkeit	gering (aggregiert)	mittel (aggregiert)	hoch (objektbasiert)	hoch (objektbasiert)
Ermittlung überflutungsgefährdeter Gebiete	Gebiete < 5m	Gebiete zwischen 1. und 2. Deichlinie oder < 5m	Deichbruchszenario, Berechnung Einströmvolumen, Einström- und Auslaufdauer, GIS-basierte Überflutungsmodellierung	Deichbruchszenario, Versagensmechanismen, 2D numerische Überflutungssimulation
Geländemodell	5m Höhenlinie, 1 : 200.000	DGM50	DGK5 (+ Punktmessungen)	DGM5
Datengrundlage Schadenspotential	amtliche Statistiken	amtliche Statistiken	amtliche Statistiken, Versicherungen, Kartierung, Befragungen	amtliche Statistiken, Versicherungen, Kartierung, Befragungen (abgeleitet)
Schadenskategorien	<ul style="list-style-type: none"> • Einwohner • landwirtschaftliche Flächen • Siedlungsflächen • Infrastruktur • Gebäude • Vorratsvermögen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einwohner • Beschäftigte • Gästebetten • Inventar • Kraftfahrzeuge • landwirtschaftliche Flächen • Viehvermögen • BWS • Vorratsvermögen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einwohner • Beschäftigte • Gästebetten • Gebäude • Inventar • Grundstückswerte • Kraftfahrzeuge • Verkehrsflächen • Windkraftanlagen • landwirtschaftliche Flächen • Viehvermögen • Wald- und Forstflächen • Freizeitflächen • BWS • Ausrüstungsvermögen • Vorratsvermögen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einwohner • Gebäude • Inventar • BWS • Ausrüstungsvermögen • Kritische Infrastruktur • Vulnerable Personen • Einwohner in der Risikozone
Schadenschätzung	Wasserstand bei 1m Meeresspiegelanstieg (2.100), Deichversagen möglich	Deichversagen möglich	Wasserstand, Definition von Szenarien für Deichversagen, Berechnung Einströmvolumen Wasserstand-Schaden-Funktionen für monetäres Schadenspotential	Wasserstand, Versagenswahrscheinlichkeit der Küstenschutzwerke Überflutungssimulation Wasserstand-Schaden-Funktionen für monetäres Schadenspotential

Ergebnisse																						
	Nationale Studie	Regionale Studie SH	MERK-Studie	SPO-Studie																		
Fläche (km²) Überflutungs- gebiet	4.000 (< 5m) (SH)	1.786 bis 2. Deich- linie 3.722 < 5m	szenarienbasiert	szenarienbasiert																		
Betroffene Bevölkerung	633.000 (SH)	320.321 (SH) 4.072 (SPO)	Szenario I: 1.271 (von 6.311 Haupt- und Neben- wohnsitz) Szenario II: 1.954 (von 6.311 Haupt- und Neben- wohnsitz)***	2.065 + Touristen 513 Pers/Tag*, (von 4.100 Haupt- wohnsitz + 3.000 Ne- benwohnsitz + Tou- risten 513 Pers/Tag*) > 70 Jahre: 245 (von 639 Personen) < 8 Jahre: 52 (von 181 Personen) kranke Menschen: 1.048 (von 1.231) Betten in Kliniken** 2 (von 6) Schulen/ Kindergärten 4 (von 5) Kliniken Einwohner in der Risikozone: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Zone</th> <th>Ein- wohner</th> <th>Tou- risten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 - 50m</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>50 - 100m</td> <td>151</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td>100 - 250m</td> <td>448</td> <td>112</td> </tr> <tr> <td>250 - 500m</td> <td>755</td> <td>188</td> </tr> <tr> <td>500 - 1.000m</td> <td>711</td> <td>176</td> </tr> </tbody> </table>	Zone	Ein- wohner	Tou- risten	0 - 50m	0	0	50 - 100m	151	37	100 - 250m	448	112	250 - 500m	755	188	500 - 1.000m	711	176
Zone	Ein- wohner	Tou- risten																				
0 - 50m	0	0																				
50 - 100m	151	37																				
100 - 250m	448	112																				
250 - 500m	755	188																				
500 - 1.000m	711	176																				
Schadenspoten- tial Mrd. €	62 Mrd. € (SH)	47,06 Mrd. € (SH) 767 Mio. € (SPO)	2,143 Mrd. €	1,658 Mrd. €																		
Monetärer Schaden	-	-	55,6 Mio. € (ScI), 70,5 Mio. € (ScII)	57,6 Mio. €																		
Auftrittswahr- scheinlichkeit	-	-	-	1 : 10,4 Mio. Jahren																		

* Dezember, gleichmäßige Verteilung der Bevölkerung über St. Peter-Ording

** Nutzung variiert im Jahresverlauf, zwischen 573 im Dezember und voller Nutzung im Sommer

*** Szenario I/II: 100/200 m Deichüberlauf

Tab. 2: Risiko- und Vulnerabilitätsstudien für die deutsche Küste auf unterschiedlichen Maßstabsebenen (verändert nach HOFSTEDÉ u. HAMANN 2000; REESE 2003; REESE et al. 2003; STERR 2008)

Es wurden hierfür verschiedene Szenarien berechnet, die jeweils mit verschiedenen Deichbruchstellen oder Bereichen von Wellenüberlauf einhergehen. Die daraus resultierenden Überflutungssimulationen, die jeweils Informationen zu Wassertiefe,

Fließgeschwindigkeit und Dauer der Überflutung für jeden Grid-Punkt enthalten, wurden daraufhin in einem Geographischen Informationssystem (GIS) mit den Ergebnissen der Vulnerabilitätsanalyse verknüpft, um den daraus entstandenen Schaden mit einer Wahrscheinlichkeit zu belegen.

Das hier beschriebene Szenario Sc530 mit einem Deichbruch im Süden sowie einem Überlaufen des Überlaufdeiches (Abbildung 4) tritt demnach mit einer Wahrscheinlichkeit (Wiederkehrintervall) von 1:10,4 Mio. Jahren auf und verursacht einen Schaden von 57 Mio. Euro sowie die Gefährdung von rund 2000 Einwohnern und durchschnittlich rund 500 Touristen (Tabelle 2).

3.5 Vergleich der Studien

Im Vergleich haben die Studien auf unterschiedlichen Maßstabsebenen teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse gezeigt, die vorrangig auf die Auflösung der zugrundeliegenden Daten zurückzuführen sind. Aufgrund der unterschiedlich großen Untersuchungsräume lassen sich nicht alle Zahlen direkt vergleichen. So können beispielsweise die Werte für ganz Deutschland nicht mit denen für St. Peter-Ording verglichen werden. Eine Umrechnung der Werte aus der nationalen Studie auf km²-Werte ist nicht möglich, da die Besiedlungs- und Wertedichte in Schleswig-Holstein sehr unterschiedlich verteilt ist und sich vorrangig auf dichter besiedelte Gebiete konzentriert. Tabelle 2 (siehe oben) gibt eine Übersicht über die vier durchgeführten Studien und deren Ergebnisse.

Beim Vergleich des überflutungsgefährdeten Gebietes fällt auf, dass sich das Gebiet in der regionalen Studie bei Betrachtung der 2. Deichlinie als Grenze einer möglichen Überflutungsausdehnung im Vergleich zur 5 m Höhengrenze in der nationalen Studie halbiert. Im Falle eines Deichbruches der 2. Deichlinie würde sich das Gebiet zwar dennoch wieder entsprechend vergrößern, jedoch zeigt dies auf, dass die Berücksichtigung von Bauwerken und Küstenschutzanlagen von großer Bedeutung ist, da die Wahrscheinlichkeit eines Deichbruchs das tatsächliche Risiko beeinflusst (vgl. auch STERR 2008; REESE 2003). Vergleicht man weiterhin das Überflutungsgebiet der lokalen Studien, ist festzustellen, dass das überflutungsgefährdete Gebiet, das mit einer 2D Simulation berechnet wurde, eine etwas andere Ausdehnung aufweist als das Überflutungsgebiet der MERK Studie. Dies liegt zum einen an variierenden Eingabegrößen, zum anderen daran, dass numerische Modelle Geländeunebenheiten, Rückstaueffekte und Ausbreitung des Wassers in Gräben besser abbilden können. Darüber hinaus ermöglicht eine numerische Modellierung die Simulation der Überflutung über Raum und Zeit. Insbesondere für die Evakuierungsplanung spielt dies eine große Rolle. So konnte für die Gemeinde St. Peter-Ording ermittelt werden, mit welcher Geschwindigkeit und Wassertiefe die Evakuierungsrouten erreicht werden und wo mögliche Inseln für eine vertikale Evakuierung zu finden sind (Abbildung 4).

Hinsichtlich der Gefährdungsanalyse ist nur in der SPO-Studie ein probabilistischer Ansatz verfolgt worden, der die Überflutungswahrscheinlichkeit anhand der Auftretenswahrscheinlichkeiten von Wasserstand und Seegang am Deichfuß und einer vollständigen Fehlerbaumanalyse ermittelt. So lässt sich für das Überflutungsszenario eine Wahrscheinlichkeit ermitteln und damit nur in dieser Studie auch ein Risiko quantifizieren. Im Vergleich hierzu haben die anderen Studien entweder die

Küstenschutzwerke gar nicht berücksichtigt oder aber Deichbruchszenarien auf Grundlage von Expertenwissen angesetzt, ohne die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten ermitteln zu können.

Vergleicht man die betroffene Bevölkerung, so ergibt sich mit zunehmender Auflösung eine deutliche Abnahme der betroffenen Bevölkerung, was darauf zurückzuführen ist, dass Bevölkerungsstatistiken Daten anhand von Verwaltungsgrenzen festlegen, die nicht mit dem Überflutungsgebiet übereinstimmen. Hierzu ist eine Verortung der Menschen, z. B. anhand von Wohngebieten notwendig. Vergleicht man darüber hinaus die lokalen Studien, wurde in der SPO-Studie ein etwas höherer Wert für die betroffene Bevölkerung ermittelt, was auf die unterschiedliche Ausdehnung der Überflutung zurückzuführen ist. Zudem ließen sich in der SPO-Studie zusätzlich besonders gefährdete Menschen lokalisieren.

Das monetäre Schadenspotential nimmt dagegen mit zunehmender Auflösung zu, was darauf zurückzuführen ist, dass die Werte auf Basis einzelner Objekte berechnet wurden und einige der betroffenen Schadenskategorien nicht in statistischen Daten der regionalen Ebene erfasst sind.

Hieraus lässt sich folgern, dass für die konkrete Planung von beispielsweise Bauwerken sehr genauere Informationen über die räumliche Verteilung des Risikos notwendig sind, um kostenintensive Baumaßnahmen effizient zu gestalten. Mikroskalige Methoden können diesen Detailgrad erreichen, so dass es möglich ist, die tatsächliche Situation auf lokaler Ebene zu erfassen. Da diese Methoden jedoch einen hohen Datenaufwand erfordern und zudem aufgrund der lokal-spezifischen Faktoren, die in die Risikoanalyse einfließen, nur bedingt übertragbar sind, empfiehlt es sich, sich auf wesentliche Schadensklassen zu beschränken und Schlüsselindikatoren für die Vulnerabilität zu entwickeln. In der SPO-Studie konnte hierzu ein erster Ansatz entwickelt werden. Eine Quantifizierung des Risikos mit einer Benennung der Eintrittswahrscheinlichkeit ist aufgrund der komplexen Prozesse am Küstenschutzelement sehr aufwändig. Jedoch wird dessen Berücksichtigung hier als erforderlich erachtet, da nur die Kenntnis der Auftrittswahrscheinlichkeit einer Überflutung eine Bewertung und Einordnung des Risikos ermöglicht und damit eine Entscheidungsgrundlage für Maßnahmen bildet.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die deutschen Küsten sind in der Vergangenheit vielfach von schweren Sturmfluten getroffen worden. Um diesen Bedrohungen gegenwärtig und zukünftig zu begegnen, sind heute große Küstenabschnitte durch Deiche geschützt. Der projizierte Meeresspiegelanstieg, die zunehmende Besiedelung und Nutzung von Küstenräumen, wissenschaftliche und technische Weiterentwicklungen im Küstenschutz, Umweltveränderungen und nicht zuletzt Kosten-Nutzen Aspekte erfordern jedoch eine ständige Anpassung des Küstenschutzes hin zu einem nachhaltigen Küstenrisikomanagement. Um die Mittel für den Küstenschutz zielgerichtet und effizient einzusetzen und ein mögliches Restrisiko z.B. im Falle des Versagens von Küstenschutzwerken quantifizieren zu können, ist eine möglichst genaue Analyse der räumlichen Verteilung des Risikos von großer Bedeutung.

Hierfür wurden bereits zahlreiche Methoden entwickelt und verschiedene Studien durchgeführt. Die Ergebnisse der hier vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass der Untersuchungsmaßstab einen großen Einfluss auf die Quantifizierung des Risikos hat. Die Ermittlung des Sturmflutrisikos, das sich regional und lokal unterscheidet, und das spezifische Management dieses Risikos erfordern detaillierte naturräumliche und sozio-ökonomische Kenntnisse, die aus mikroskaligen, lokalen Analysen gewonnen werden können.

Die Ergebnisse der lokalen Gefährdungsanalyse für St. Peter-Ording haben gezeigt, dass die Überflutungswahrscheinlichkeit für die einzelnen Deichabschnitte in einer Größenordnung von $P_f = 10^{-4}$ bis 10^{-6} pro Jahr liegt, während das im Detail untersuchte Überflutungsszenario (Wellenüberlauf am Überlaufdeich und Deichbruch im Süden des Gebietes) nur mit einer Wahrscheinlichkeit von $P_f = 9,6 \times 10^{-8}$ /Jahr auftritt. Sensitivitätsanalysen haben darüber hinaus den Einfluss der Eingangsparameter für die Versagenswahrscheinlichkeit gezeigt, wobei hier vor allem der Wasserstand und die Seegangparameter von großer Bedeutung sind. Bei makro- und mesoskaligen Studien fehlt noch ein praktikables Vorgehen zur Abschätzung der Überflutungswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung des vorhandenen Küstenschutzes.

Die bisherigen Studien lassen jedoch noch einige Fragen unbeantwortet. So gilt es hinsichtlich der Gefährdungsanalyse noch zu klären, wie (a) kombinierte Wahrscheinlichkeiten z.B. von Wasserstand und Seegangparametern in die Studie einbezogen werden können und welchen Einfluss sie auf die Überflutungswahrscheinlichkeit haben; (b) die Korrelation der gewählten Abschnitte, d.h. aller am Prozess des Deichversagens beteiligter Seegangs- und Bauwerksparameter, quantifiziert und berücksichtigt werden kann; und (c) die szenarienbasierte Gefährdungsanalyse sinnvoll und praktikabel auf weitere Szenarien erweitert werden kann. Im Hinblick auf die Vulnerabilitätsanalyse gibt es bisher wenige Informationen dazu, wie sich Ökosysteme und deren potentielle Beeinträchtigung in die quantitative Risikoanalyse einbinden lassen. Nicht zuletzt, um der EU Flood Directive (Directive 2007/60/EC) gerecht zu werden, sollten Aspekte des Risikomanagements verstärkt berücksichtigt werden. Dies umfasst beispielsweise Frühwarnaspekte oder die Verbesserung des Risikobewusstseins der Bevölkerung zur Minderung der Vulnerabilität und damit zur Reduzierung des Risikos.

Im Hinblick auf den Klimawandel bekommt der Zeitfaktor eine Bedeutung, denn langfristig wird sich nicht nur die Sturmflutsituation verändern, sondern auch die Gesellschaft und die Gestaltung des Küstenraumes. Da die hier vorgestellten Studien zur Risikoanalyse den Ist-Zustand erfassen, müssen diese langfristig angepasst werden. Hierfür bedarf es einer Weiterentwicklung standardisierter, vereinfachter und übertragbarer Methoden, die es ermöglichen, veränderte Risiken aufzuzeigen.

Die probabilistische, mikroskalige Studie hat gezeigt, dass das Risiko auf lokaler Ebene bestimmt werden kann, auch wenn der entsprechende Datenaufwand (Beschaffung, Bearbeitung, etc.) groß ist und in vielen Fällen die praktische Machbarkeit deutlich überschritten wird. Allerdings sind nur auf dieser Maßstabsebene konkrete Risikomanagementmaßnahmen planbar, die ansonsten auf der Basis von Szenarien und/oder Erfahrungswerten abgeleitet werden müssten.

Literatur

<http://delftsoftware.wldelft.nl/>

- BALAS, C.E.; L. BALAS u. A.T. WILLIAMS 2004: Risk assessment of revetments by Monte Carlo simulation. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Maritime Engineering, 157/2, S. 61–70.
- COLIJN, F., M. HAMANN, S. REESE u. T. ROHR 2000: Wertermittlung für die potenziell sturmflutgefährdeten Gebiete an den Küsten Schleswig-Holsteins. Teil II. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für ländliche Räume, Landwirtschaft, Ernährung und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein.
- EBENHÖH, W., H. STERR u. F. SIMMERING 1996: Potential impacts of climate change and accelerated sea-level rise on the German North Sea and Baltic Sea coasts. Case study based on the Common Methodology of the IPCC. Oldenburg. Germany.
- GÖNNERT, G. u. U. FERK 1996: Sturmfluten – natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe. In: Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, 18, S. 13–31.
- GORNITZ, V., R.C. DANIELS, T. WHITE u. K.R. BIRDWELL 1994: The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level rise in the U.S. Southeast. In: Journal of Coastal Research, 12, S. 327–338.
- HALL, J.W., S. TARANTOLA, P.D. BATES u. M.S. HORRITT 2005: Distributed sensitivity analysis of flod inundation model calibration. In: Journal of Hydraulic Engineering, 131/2, S. 117–126.
- HAMANN, M. u. H. KLUG 1998: Wertermittlung für die potentiell sturmflutgefährdeten Gebiete an den Küsten Schleswig-Holsteins. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für ländliche Räume, Landwirtschaft, Ernährung und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein.
- HELM, P. 1996: Integrated Risk Management for Natural and Technological Disasters. Tephra, 15/1, S. 4–13.
- HOFSTEDDE, J. 1996: Meeresspiegelanstieg und Küstenschutz. In: BWK-Schriften, 5, S. 39–48.
- HOFSTEDDE, J. u. M. HAMANN 2000: Wertermittlung sturmflutgefährdeter Gebiete in Schleswig-Holstein. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, 85, S. 106–112.
- HOOZEMANS, F.M.J., M. MARCHAND u. H.A. PENNEKAMP 1993: A Global Vulnerability Analysis: Vulnerability Assessment for Population, Coastal Wetlands and Rice Production on a Global Scale. Delft, The Netherlands: Delft Hydraulics.
- HORRITT, M.S. u. P.D. BATES 2002: Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. In: Journal of Hydrology, 268, S. 87–99.
- HÜLS, W. u. G. SCHWINGE 2003: Eine erste Analyse über Ursachen örtlicher Deichbrüche am Beispiel der Muldedeiche zwischen Eilenburg und Wurzen. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau. In: Geotechnik, 26/2, S.114–118.
- KORTENHAUS, A. 2003: Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- KLAUS, J. u. R.F. SCHMIDTKE 1990: Bewertungsgutachten für Deichbauvorhaben an der Festlandküste -Modellgebiet Wesermarsch. Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.). Kurzfassung des Untersuchungsberichtes. Bonn.
- KUNDZEWICZ, Z. u. P.G. SAMUELS 1997: Real-time Flood Forecasting and Warning. Conclusions from Workshop and Expert Meeting. Proceedings of Second RIBAMOD Expert Meeting, no. EUR-18853-EN, Published by DG XII, European Commission, Office for Official Publications of the Europ. Communities. Padova, Italy.

- MEEHL, G.A., T.F. STOCKER, W.D. COLLINS, P. FRIEDLINGSTEIN, A.T. GAYE, J.M. GREGORY, A. KITOH, R. KNUITTI, J.M. MURPHY, A. NODA, S.C.B. RAPER, I.G. WATTERSON, A.J. WEAVER u. Z.-C. ZHAO 2007: Global climate projections. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR u. H.L. MILLER. (Hrsg.): *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MEYER, V., S. SCHEUER u. D. HAASE 2009: A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. In: *Natural Hazards*, 48, 1, S. 17–39.
- MLR 2001 – Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein 2001: *Generalplan Küstenschutz – integriertes Küstenmanagement in Schleswig-Holstein*. Kiel.
- MUNICH RE 2006: The 1906 earthquake and hurricane Katrina. Similarities and differences – implications for the insurance industry. München.
- NICHOLLS, R., P.P. WONG, V. BURKETT, C.D. WOODROFFE u. J. Hay 2008: Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment. *Sustainability Science*, 3, S. 89–102.
- REESE, S., H.J. MARKAU. u. H. STERR 2003: Mikroskalige Evaluation der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen – MERK. Unveröffentlichter Bericht.
- REESE, S. 2003: Die Vulnerabilität des Schleswig-holsteinischen Küstenraumes durch Sturmfluten. In: *Berichte des Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel*, 30, Büsum.
- SAMUELS, P., B. GOULDBY, F. KLIJN, F. MESSNER, A. VAN OS, P. SAYERS, J. SCHANZE u. H. UDALE-CLARKE 2009: *Language of Risk – Project definitions (second edition). FLOOD-site – Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies*, Report no.: T32-04-01, HR Wallingford, UK.
- SCHÜTTRUMPF, H. u. H. OUMERACI 2004: Learning from sea dike failures. In: *PIANC, Bulletin. Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC)*, S. 117.
- STERR, H., R.J.T. KLEIN u. S. REESE 2003: Climate change and coastal zones. An overview of the state of the art on regional and local vulnerability assessments. In: GIUPPONI, C. u. M. SHECHTER (Hrsg.): *Climate change in the Mediterranean*. Cheltenham, UK, S. 245–278.
- STERR, H. 2008: Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. In: *Journal of Coastal Research* 24/2, S. 380–393.
- VAFEIDIS, A.T., R.J. NICHOLLS, L. MCFADDEN, R.S.J. Tol, J. HINKEL, T. SPENCER, P.S. GRASHOFF, G. BOOT u. R.J.T. KLEIN 2008: A New Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise. In: *Journal of Coastal Research*, 24/4, S. 917–924.
- VRIJLING, J.K. 2001: Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. Elsevier Science Ltd., *Reliability Engineering and System Safety* 74/3, S. 337–344.
- WOTH, K., R. WEISSE u. H. VON STORCH 2006: Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. In: *Journal of Ocean Dynamics*, 56, S. 3–15.