

## **Änderung des Sturmflutrisikos der niedersächsischen Küste bei Klimawandel**

Stephan Mai<sup>1</sup>, Anne Elsner<sup>1</sup>, Volker Meyer<sup>2</sup> und Claus Zimmermann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover

<sup>2</sup>Geographisches Institut, Abt. Wirtschaftsgeographie, Universität Hannover

### **Summary**

Due to climate change a rise of tidal water levels and intensifying westerly winds, causing an increase in wave load, as coupled numerical simulations of tidal flow and waves reveal, has to be expected. As consequence of this increase in loads the safety of the coastal defence system decrease while the risk of flooding of coastal hinterlands increase. In order to quantify these changes a method of probabilistic failure and risk analysis is presented under consideration of the actually available data bases. An exemplary application of this method is given in order to evaluate the impact of climate change on coastal safety provided by sea dikes along the estuary Außenweser. The assessment revealed that a rise in water level of 50 cm will increase the risk due to storm surges up to 500 %. In comparison to that an increase of wind speed of 7 % will lead to an increase of risk of up to 30 %. The largest sensitivity with respect to water level rise is found for sea dikes with forelands while these show the lowest sensitivity with respect to an increase in wind speed. In order to cope with this increase of risk different strategies of risk minimisation, e.g. heightening of sea dikes or setting-up secondary dikes respectively, are given and evaluated with respect to their efficiency.

### **Zusammenfassung**

Der Klimawandel läßt an den deutschen Küsten einen Anstiegs der Tidewasserstände sowie eine Intensivierung der Westwinde, welche, wie gekoppelte numerische Simulationen von Tidedrömungen und Seegang zeigen, eine Zunahme der Seegangsbelastung mit sich bringt, erwarten. Als Folge dieser wachsenden Belastungen vermindert sich die Sicherheit der Küstenschutzanlagen, so daß das Sturmflutrisiko für das Küstenhinterland zunimmt. Zur Quantifizierung dieser Änderungen wird unter Berücksichtigung der derzeit verfügbaren Datenbasis das Konzept der probabilistischen Versagens- und Risikoanalyse vorgestellt und exemplarisch zur Beurteilung der Folgen des Klimawandels für den durch Deiche gewährleisteten Küstenschutz an der Außenweser eingesetzt. Die Analyse zeigte, daß mit einem um 50 cm erhöhtem Tidehochwasser eine Zunahme des Sturmflutrisikos um bis zu 500 % zu erwarten ist, wobei Küstenabschnitte mit Vorlanddeichen die größte Sensitivität gegenüber Wasserstandsanstieg aufweisen. Im Vergleich dazu führt eine Intensivierung der Westwinde um 7 % nur zu einer Risikozunahme um bis zu 30 %, wobei Küstenabschnitte mit Schardeichen die größte Sensitivität gegenüber einer Windzunahme aufweisen. Als Reaktion auf dieses erhöhte Risiko werden risikomindernde Anpassungsmaßnahmen, wie Deicherhöhungen sowie die Anlage zweiter Deichlinien, vorgestellt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt.

### **1 Einführung in den Risikobegriff**

Im Land Niedersachsen wird der Schutz des Hinterlands durch eine Vielzahl von Küstenschutzelementen gewährleistet (ZIMMERMANN/MAI 1998). Der Hauptdeich stellt an der deutschen Küste das bedeutendste Küstenschutzelement dar. Seine Bemessung erfolgt zur Zeit auf der Grundlage eines deterministischen Verfahrens, dem sog. a-b-c-d-Verfahren (AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE 2002). Eine Beurteilung der Folgen des Klimawandels für den Küstenschutz ist auf der

Grundlage dieses Verfahrens jedoch nicht möglich, sondern erfordert die Erweiterung des deterministischen Bemessungsverfahrens zu einem probabilistischen Bemessungsverfahren, wie es z.B. bereits in niederländische Regelwerke (VERGEER 1990) Einzug gehalten hat. Mit der Einführung der Probabilistik ist zunächst die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Unterbemessung von Hauptdeichen, sog. Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$ , möglich. Um (als wichtigen Schritt der Integration des Küstenschutzes in das Küstenzonenmanagement) neben der Wahrscheinlichkeit eines Deichversagens auch die mit dem Versagen verbundene Folgeschäden  $C_f$  durch Überflutung bei der Bemessung zu berücksichtigen, erfolgt schließlich die Erweiterung der probabilistischen Bemessung zur probabilistischen Risikoanalyse, deren zentrale Größe - das Risiko  $R$  - vereinfachend als

$$R = p_f \cdot C_f \quad (1)$$

definiert wird (PROBST 1994).

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wird der auch in der deterministischen als maßgebend angesehene Versagensmechanismus „Erosion der Binnenböschung nach Wellenüberlauf“ zugrunde gelegt, welcher in Abb. 1 dargestellt ist. Für diesen ergibt sich folgender Grenzzustand  $Z$ :

$$Z = h_D - Thw - R_n \quad (2)$$

$$R_n = \alpha_n \cdot \gamma_f \gamma_b \gamma_\theta \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi}} \cdot H_s T_m \tan(\alpha_d) \quad (3)$$

mit Deichhöhe  $h_D$ , Tidehochwasserstand  $Thw$ , von  $n$  % der Wellen nicht überschrittene Auflaufhöhe  $R_n$ , signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , mittlere Wellenperiode  $T_m$ , Deichneigung  $\alpha_d$ , Abminderungen zur Berücksichtigung von Böschungsrauigkeit, Bermen und schrägem Wellenangriff  $\gamma_f$ ,  $\gamma_b$ ,  $\gamma_\theta$  und dem vom zulässigen Wellenüberlauf abhängigen Parameter  $\alpha_n$ . Für weitere Versagensmechanismen finden sich die Grenzzustandsgleichungen bei VERGEER (1990) und bei KORTENHAUS und OUMERACI (2002). Da insbesondere Tidehochwasserstand und Seegang wahrscheinlichkeitsverteilte Größen sind, ist auch die Grenzzustandsvariable  $Z$  wahrscheinlichkeitsverteilt. Für die Versagenswahrscheinlichkeit gilt dann

$$p_f = \int_{-\infty}^0 p_Z(Z) dZ = \iint_{Z < 0} p_{Thw, R_n}(Thw, R_n) dR_n dThw \quad (4)$$

mit der Wahrscheinlichkeitsdichte  $p_Z(Z)$  der Grenzzustandsvariable bzw. der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte von Tidehochwasserstand und Wellenaufwurf  $p_{Thw, R_n}(Thw, R_n)$ .



Abb. 1: Stufen des Versagensmechanismus „Erosion der Binnenböschung nach Wellenüberlauf“

Der bei Versagen zu erwartende Überflutungsschaden berechnet sich aus der Integration der vom Grad des Versagens abhängigen Schadensdichte  $s_f(Z, x, y)$  im von Überflutung betroffenen Hinterland gemäß

$$C_f(Z) = \iint s_f(Z, x, y) dx dy \quad (5)$$

Die Schadensdichte folgt ihrerseits aus der nach Vermögensart  $i$  kategorisierten Wertdichte  $w_i(x,y)$  unter Verwendung eines von der Überflutungswassertiefe  $d(Z,x,y)$  abhängigen Schädigungsgrades  $\varphi(d(Z,x,y))$

$$s_f(Z, x, y) = \sum_i \varphi_i(d(Z, x, y)) \cdot w_i(x, y) \quad (6)$$

Aus (4) und (5) folgt schließlich eine erweiterte Definition des Risikos

$$R = \int_{-\infty}^0 p_Z(Z) C_f(Z) dZ \quad (7)$$

Eine beispielhafte Anwendung der in (2) bis (7) vorgestellten Risikoanalyse zur Abschätzung der Klimafolgen ist im folgenden für die Küste zwischen Bremerhaven und Cuxhaven gegeben.

## 2 Versagenswahrscheinlichkeit von Küstenschutzsystemen

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit nach (2) bis (4) erfordert eine langjährige Datenbasis der Belastungsgrößen. Während diese für die Wasserstände verfügbar ist, liegt sie für den Seegang nicht vor. Die Seegangsstatistik ist daher aus der Windstatistik mit Hilfe numerischer Seegangssimulation (MAI/ZIMMERMANN 2004) zu ermitteln (MAI/ZIMMERMANN 2003). Die Abb. 2 zeigt exemplarisch die aus Messungen ermittelte Wasserstands- und Windstatistik sowie die über numerische Seegangssimulationen ermittelte Statistik von Wellenhöhe und -periode. Als Grundlage einer Klimafolgenanalyse sind neben dem Status-Quo außerdem Szenarien infolge des Klimawandels geänderte Statistiken von Wasserstand, Wind und Seegang gegeben. Nutzt man diese zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit, so folgt aus dem Vergleich von Klimaszenario und Status Quo die Wirkung von Klimaänderungen. Die Abb. 3 gibt die relative Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit einzelner Deichabschnitte zwischen Bremerhaven und Cuxhaven infolge Wasserstands- bzw. Windanstieg wieder. Die Sensitivität des Küstenschutzes ist gegenüber dem prognostizierten Wasserstandsanstieg erheblich größer als gegenüber der prognostizierten Intensivierung des Windes. So nimmt die Versagenswahrscheinlichkeit infolge eines Wasserstandsanstiegs von 0,5 m um bis zu 500 % und infolge einer Intensivierung des Windes um 7 % um bis zu 30 % zu.

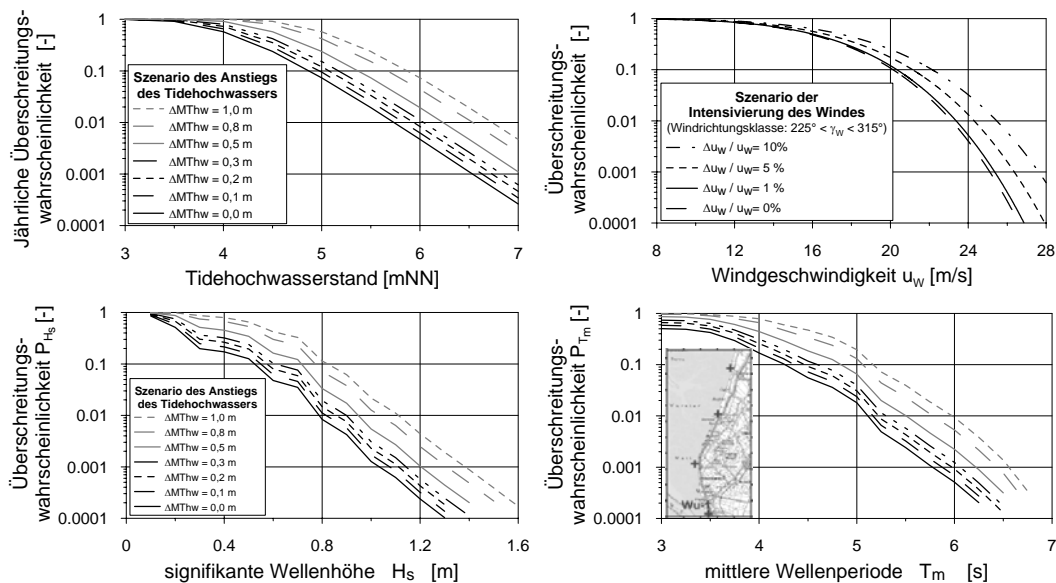


Abb.2: Aus Messungen abgeleitete Statistik des Tidehochwasserstands und des Windes (oben) sowie die über numerische Seegangssimulationen ermittelte Statistik von Wellenhöhe und -periode (unten) – Status Quo und Szenarien des Klimawandels

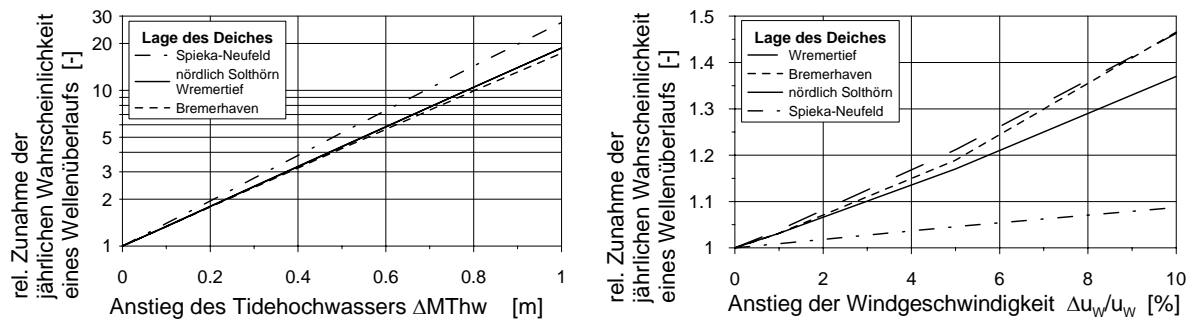


Abb. 3: Relative Zunahme der Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs an Hauptdeichen zwischen Bremerhaven und Cuxhaven als Folge eines Wasserstands- (links) und Windanstiegs (rechts) (MAI 2004)

In diesem Zusammenhang weisen Vorlanddeiche (speziell die mit vorgelagertem Sommerdeich) die größte Sensitivität gegenüber einem Anstieg des Wasserspiegels auf, während Schardeiche die größte Sensitivität gegenüber der Intensivierung des Windes besitzen.

### 3 Wertbestand im Küstenhinterland

Als Voraussetzung der Schadensberechnung ist zunächst eine Schadenspotentialanalyse durchzuführen. Hierbei wird der gesamte sozioökonomische Wertbestand im gefährdeten Küstenhinterland quantifiziert und räumlich verortet.

Für Untersuchungsgebiete regionaler Ausdehnung eignet sich dazu die folgende mesoskalige Vorgehensweise (MEYER/MAI 2003, MEYER/MAI 2004):

Die Quantifizierung der Schadenspotentiale erfolgt zunächst auf Gemeindeebene. Erhoben werden neben den Einwohnern die Wertkategorien Wohnkapital, Hausrats- und Pkw-Vermögen, Anlage-, Vorratsvermögen und Bruttowertschöpfung der Wirtschaftsbereiche sowie der Wert des Viehbestands, öffentlicher Freiflächen, Straßen und Bahnlinien und Bodenwerte. Wesentliche Quelle für diese Daten bilden vor allem amtliche Statistiken. In einigen Fällen, wie z. B. beim Anlagevermögen, welches nur auf Landesebene ausgewiesen wird, ist eine Abschätzung auf Gemeindeebene über Hilfsgrößen wie die Beschäftigtenzahl notwendig.

Die so erhobenen Schadenspotentiale werden in einem zweiten Schritt mit Hilfe digitaler Flächennutzungsdaten des ATKIS-Basis-DLM im GIS räumlich modelliert. Hierbei wird jede Wertkategorie einer oder mehreren ihrer entsprechenden Flächennutzungskategorien zugeordnet. So wird beispielsweise das Wohnkapital auf den Flächennutzungskategorien „Wohnbauflächen“ und „Flächen gemischter Nutzung“ verortet.

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise lassen sich Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Schadenspotentiale vor allem zwischen Siedlungsflächen, die Vermögenswertkonzentrationen von >50 EUR/qm in dörflichen und >100 EUR/qm in städtischen Bereichen aufweisen, und Siedlungsfreiflächen mit Wertkonzentration von zumeist <1 EUR/qm realitätsnah darstellen. Zwar lassen sich durchaus auch innerhalb der Siedlungsbereiche Flächen unterschiedlicher Wertkonzentrationen nachweisen; deren Heterogenität vor allem innerhalb großer Städte läßt sich mit der beschriebenen Methodik jedoch nur eingeschränkt berücksichtigen. So sind in den oben genannten ATKIS-Daten beispielsweise keine Informationen bezüglich der Bebauungsdichte, des Wohlstandsniveaus oder der Wirtschaftsstruktur enthalten.

Um die Verteilung der Schadenspotentiale auch innerhalb größerer Städte genauer darstellen zu können, wurde die o. g. Methodik weiterentwickelt, indem zusätzlich kleinräumige Geomarketingdaten

der Firma infas-Geodaten integriert wurden. Diese beinhalten auf Stimmbezirksebene sozioökonomische Informationen, wie z. B. die Einwohnerzahl, einen Kaufkraftindex, die Anzahl, Größe und Branchenzugehörigkeit von Betrieben sowie Anzahl und Typ der Gebäude in dem jeweiligen Stimmbezirk. Abb. 4 zeigt beispielsweise den Kaufkraftindex in den Stimmbezirken Bremerhavens.

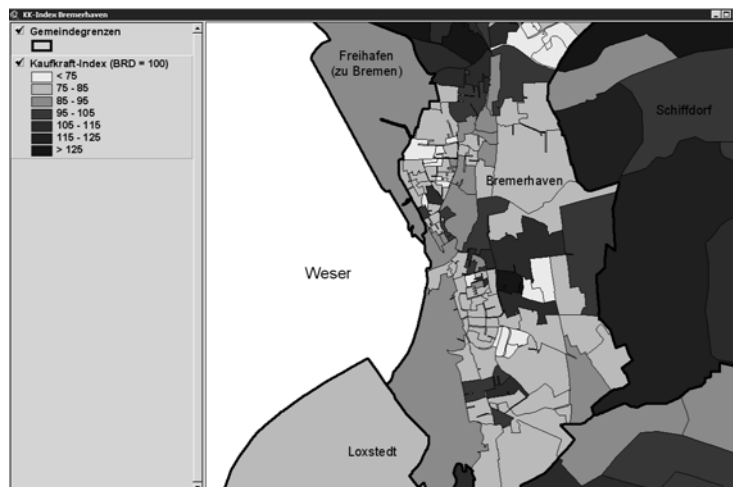


Abb. 4: Kaufkraftindex in den Stimmbezirken Bremerhavens

Diese Informationen werden innerhalb der zweiten Methodik genutzt, um die räumliche Modellierung mehrerer Wertkategorien zu verbessern:

Die Einwohnerzahlen auf Stimmbezirksebene ermöglichen neben einer exakteren Verteilung der Bevölkerung zudem eine genauere Verortung der damit verbundenen Wertkategorien Wohnkapital, Hausrat und Pkw-Vermögen. Letztere können zusätzlich mit Hilfe des Kaufkraftindex in ihrer Quantität angepaßt werden, je nachdem, ob es sich um „reiche“ oder „arme“ Stadtteile handelt.

Über die Angaben zur Anzahl, Größe und Branchenzugehörigkeit der Betriebe läßt sich die Beschäftigtenzahl innerhalb der Stimmbezirke zumindest grob abschätzen. Diese Hilfsgröße wird verwendet, um die Wertkategorien Wertschöpfung, Anlage- und Vorratsvermögen der Wirtschaftsbereiche besser verorten zu können.

Mit Hilfe der Informationen zur Bebauungsstruktur läßt sich zudem die durchschnittliche Geschößzahl und damit der Anteil der vornehmlich betroffenen Erdgeschosse in den Stimmbezirken abschätzen. Diese Information fließt zwar bislang nicht in die unten dargestellten Ergebnisse der Schadenspotentialanalyse mit ein, ermöglicht aber eine zusätzliche Einschätzung, welcher Anteil des Wertbestandes im Überflutungsfall tatsächlich betroffen wäre.

Abb. 5 zeigt die räumliche Verteilung aller Vermögenswerte(d.h. der Wertkategorien Wohnkapital, Hausrats-, Pkw-, Anlage-, Vorrats- und Viehvermögen sowie öffentliche Grünflächen ohne die linienhaften Vermögenswerte der Straßen und Bahnlinien sowie Bodenwerte.) in Bremerhaven, wie sie sich gemäß dieser weiterentwickelten Methodik ergibt. Abb. 5 zeigt zusätzlich die Veränderungen gegenüber den Ergebnissen der ersten Methodik. Die größten Veränderungen sind dabei in den städtischen Siedlungsbereichen zu beobachten: Hier werden vor allem die Innenstadt und zentrumsnahe Wohngebiete mit ihrer hohen Bebauungsdichte höher bewertet, aber auch einige Industriegebiete, die offensichtlich einen hohen Besatz an Betrieben aufweisen. Geringer bewertet werden hingegen zum einen weniger dicht bebaute Wohngebiete am Stadtrand Bremerhavens und zum anderen Industrie- und Gewerbegebiete die offenbar weniger intensiv genutzt werden. Mit Hilfe dieser räumlich differenzierten Ergebnisse kann die weiterentwickelte Methodik der Schadenspotentialanalyse somit einen Beitrag

leisten, mögliche Überflutungsschäden auch innerhalb größerer Städte (ohne mikroskalige Erhebung) genauer prognostizieren zu können.

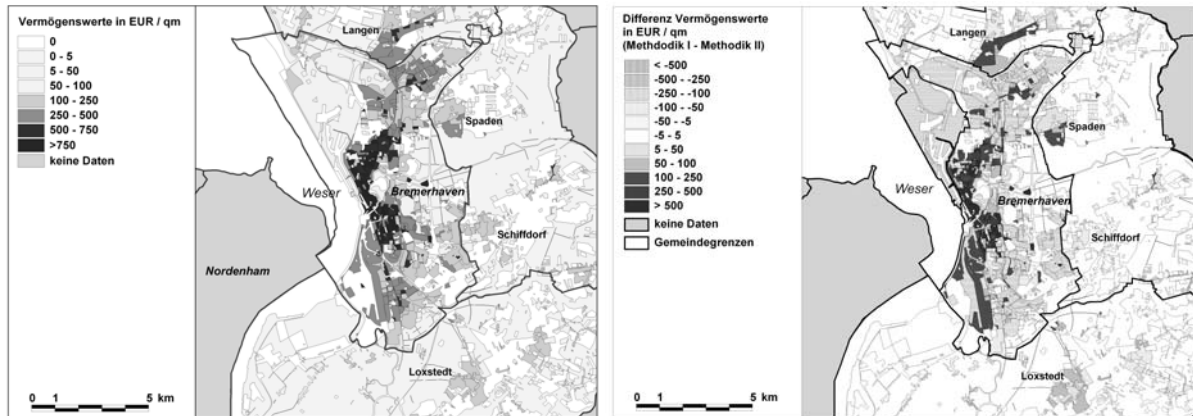


Abb. 5: Verteilung der Vermögenswerte in Bremerhaven nach Methodik II (links) und absolute Veränderungen der Verteilung der Vermögenswerte bei Methodik II gegenüber Methodik I (rechts)

#### 4 Überflutung bei Versagen des Küstenschutzsystems

Im Falle des Versagens eines Küstenschutzsystems führt die Überflutung des Hinterlandes zu einer Schädigung der Werte auf den betroffenen Flächen. Um die Höhe dieses Schadens abschätzen zu können, muß neben der Erfassung des vorhandenen Wertbestands im Hinterlandes ermittelt werden, welche Flächen aufgrund ihrer Lage von der Überflutung betroffen sein können. Diese Festlegung der gefährdeten Flächen kann heutzutage mittels zweidimensionaler numerischer Strömungssimulationen erfolgen. Diese Methodik ist zwar in ihrer Anwendung aufwendiger als die einfachere Methodik des Verschneidens von Geländehöhen mit einem maßgebenden Sturmflutwasserstand, hat jedoch den Vorteil, daß sowohl die Ausdehnung der ermittelten Überflutungsfläche als auch die Überflutungshöhen realitätsnäher sind. Zudem wird durch die Simulation der Prozeß des Überflutens festgehalten, wodurch Aussagen über Verweildauer und Vorwahrzeiten getroffen werden können. Wichtigste Basisdaten für die Durchführung der Simulation ist ein Geländemodell, welches neben den Geländehöhen auch die Bathymetrie sowie die Küstenschutzanlagen enthält. Weiter Eingangsparmeter sind die sich während einer Sturmflut im Verlauf der Tide ändernden Wasserstände, sowie Abflüsse in Flüssen.

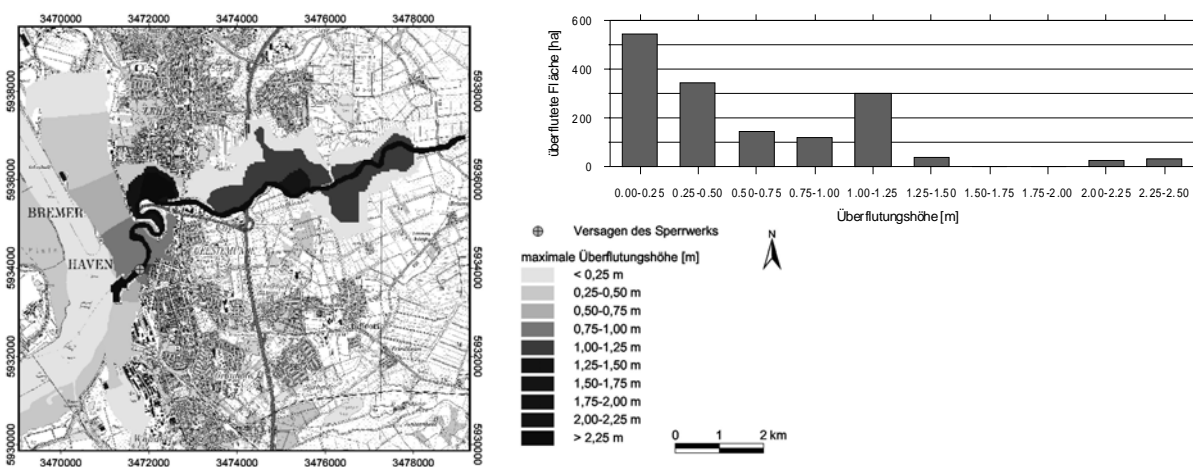


Abb. 6: Überflutungsausdehnung bei Versagen des Geeste-Sperrwerks mit der Verteilung der maximalen Überflutungshöhen. Berechnet für die Sturmflut vom 29.10.1996

Im vorliegenden Untersuchungsbeispiel wurde mit Hilfe der Simulation ermittelt, welche Flächen von einer Überflutung betroffen sein können, falls das Geeste-Sperrwerk während einer Sturmflut versagt und nicht zu schließen ist. Als Basis dient eine Geländemodell mit einer Rasterauflösung von 25 m, an dessen westlichem Rand die Tidekurve der Sturmflut vom 29.10.1996 für den Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm in den Flußlauf eingesteuert wird. Die Auswirkungen des Versagen des Geeste-Sperrwerks während einer Sturmflut zeigen die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse der Simulation. Die Überflutung, dargestellt mit den maximal während des Überflutungsprozesses erreichten Wasserstände, dringt entlang der Geeste ca. 8 km und entlang des Hafengebietes ca. 5 km weit ins Hinterland vor. Die Verteilung der Überflutungshöhen zeigt, daß auf der Hälfte der betroffenen Flächen Überflutungshöhen von bis zu 0,50 m erreicht werden. Höher steht das Wasser in der Nähe des Sperrwerks mit Überflutungshöhen von bis zu 1 m. Überflutungshöhen über 1 m finden sich entlang den Niederungen der Geeste, hier steht das Wasser in den Senkebereichen bis über 2 m.

## 5 Monetarisierung der Überflutungsschäden

Die Berechnung des sich durch die Überflutung ergebenden Schadens erfolgt entsprechend (5) und (6) über die vorhanden Wertbestände auf den betroffenen Flächenen sowie dem Schädigungsgrad der Flächen. Der Schädigungsgrad einer Fläche ergibt sich dabei aus der Höhe der Überflutung auf ihr. Dieser Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad und Überflutungshöhe kann in Wasserstands-Schadensfunktionen beschrieben werden. Abb. 7 zeigt die für die durchgeführte Schadensanalyse verwendeten Schadensfunktionen aufgeteilt nach unterschiedlichen Wertkategorien.

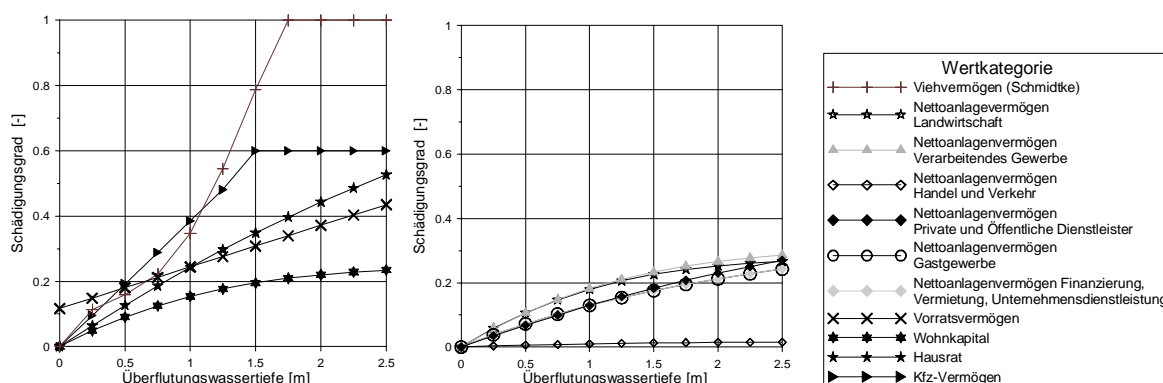


Abb. 7: Schadensfunktionen für die Berechnung des Schädigungsgrades einer überfluteten Fläche (nach OTTE ET AL. 2003)

Um den Schädigungsgrad einer Fläche bestimmen zu können, muß die maximale Überflutungshöhe, die sich während des Überflutungsverlaufs auf der Fläche einstellt, ermittelt werden. Hierzu wird aus den einzelnen Zeitschritten der Überflutungssimulation der jeweils höchste Überflutungswert einer Fläche herausgelesen, so daß als Ergebnis ein Raster mit den maximalen Überflutungshöhen entsteht. Diese maximalen Überflutungshöhen bilden zusammen mit den Vorhanden Vermögenswerten und den Schadensfunktionen die Basis der Schadensberechnung.

Die Schadensberechnung erfolgt automatisiert in dem GIS ArcView mit dem Tool "Loss-Calculator" (ELSNER ET AL. 2004). In der Analyse wird die gesamte überflutete Fläche zunächst auf ihre unterschiedlichen Nutzungsformen hin untersucht. Jeder dieser Nutzungsformen werden in einem zweiten Schritt die für den Wertbestand der Fläche relevanten Wertkategorien, z.B. Hausrat, Wohnkapital, Kfz für die Flächennutzung Wohnbaufläche, zugewiesen und darauf aufbauend die Einzelschäden dieser Wertkategorien berechnet. Hierzu wird mit Hilfe der Schadensfunktionen der Schädigungsgrad der

Fläche bezüglich der jeweiligen Kategorie ermittelt und dieser mit dem zugehörigen Vermögenswert multipliziert. Der Schaden einer bestimmten Flächennutzung ergibt sich damit aus der Aufsummierung der Einzelschäden, die sich für die Wertkategorien ergeben. Der Gesamtschaden der Überflutung berechnet sich aus der Summe aller, auf den einzelnen Flächen entstehender, Schäden.

Das Ergebnis einer Schadensanalyse ist in starkem Maße von der Auflösung der Eingangsdaten abhängig. Im Folgenden wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Methoden der Schadenspotenzialanalyse auf die Schadenshöhe auswirken. Dazu wurde die Schadensanalyse mit ansonsten gleichbleibenden Parametern mit unterschiedlichen Datensätzen für den ermittelten Wertbestand (siehe Kapitel 3) durchgeführt.

Mit dem, nach Methodik I ermittelten, Wertbestand ergibt die Analyse ein von Überflutung betroffenes Vermögen von ca. 1,8 Mrd. € sowie einen Schaden in Höhe von ca. 211 Mio. Euro. Für die gleiche Überflutungsfläche fällt der Vermögensbestand um 40 % (2,5 Mrd. €) und der Schaden um 60% (341 Mio. Euro) höher aus, wenn der Wertbestand nach Methodik II erfaßt wird.

## 6 Sturmflutrisiko für das Küstenhinterland und Maßnahmen zur Risikominderung

Aus der Kombination der nach Kapitel 2 bzw. Kapitel 5 zu berechnenden Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschäden folgt gemäß (7) das Sturmflutrisiko. Beispiele der bei dieser Berechnung zu berücksichtigenden Abhängigkeit des Folgeschadens von der Versagensintensität sind für einen Deichabschnitt nördlich von Bremerhaven in Abb. 8 gegeben. Ein von 6 mNN auf 7 mNN erhöhter Scheitelwasserstand der Sturmflut bedeutet demnach eine Zunahme des Überflutungsschadens von 30 %, die Verdoppelung der Deichbruchweite von 150 m auf 300 m zieht eine Schadenzunahme um 50 % nach sich. Infolge des Klimawandels ist eine Risikozunahme zu erwarten, welche die in Abb. 3 dargestellte Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit etwa um 10 % übertrifft.

Eine Kompensation dieser durch den Klimawandel bedingten Risikozunahme ist einerseits durch Erhöhung des bestehenden Küstenschutzsystems (z.B. durch Deicherhöhung) zur Verminderung der Versagenswahrscheinlichkeit und andererseits durch Anlage zweiter Schutzlinien zur Verminderung des Überflutungsschadens möglich.

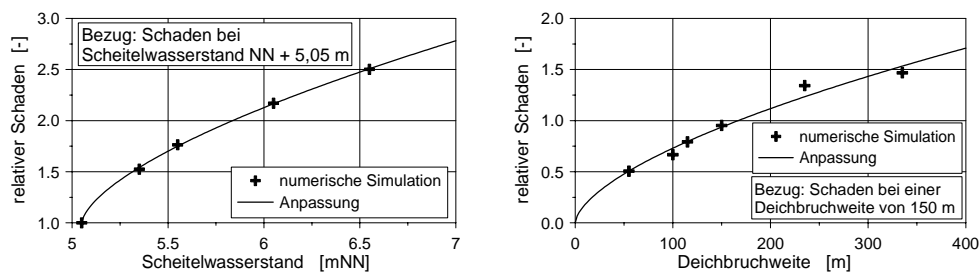


Abb. 8: Abhängigkeit des Folgeschadens von der Versagensintensität: Schadenzunahme bei wachsendem Scheitelwasserstand (links) bzw. bei wachsender Deichbruchweite (rechts)

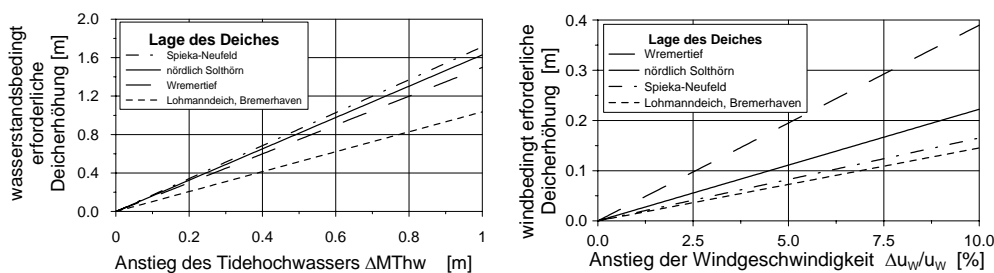


Abb. 9: Erforderliche Deicherhöhung zur Kompensation der wasserstands- (links) und windbedingten (rechts) Risikozunahme (MAI 2004)



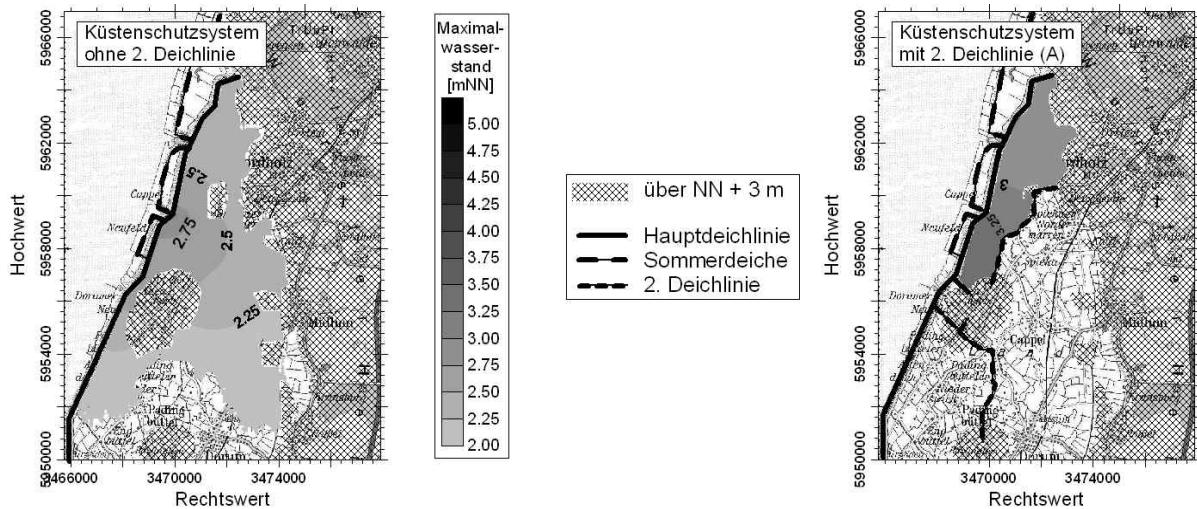


Abb. 10: Minderung des Überflutungsschadens durch Anlage zweiter Deichlinien

Für die Deichstrecke zwischen Bremerhaven und Cuxhaven ergeben sich zur Beibehaltung des aktuellen Risikos die in Abb. 9 dargestellten erforderlichen Deicherhöhungen. So ist infolge eines Wasserstandsanstiegs von 0,5 m der Deich um bis zu 0,9 m und infolge einer Intensivierung des Windes von 7 % um bis zu 0,3 m zu erhöhen.

Die durch die Anlage einer zweiten Deichlinie erreichbare Reduzierung der Überflutungsfläche ist exemplarisch in Abb. 10 wiedergegeben. Bei der Beurteilung der Wirksamkeit zweiter Deichlinien ist jedoch zu berücksichtigen, daß mit der Reduzierung der Überflutungsfläche um 70 % eine Erhöhung der Überflutungswassertiefe um 140 % verbunden ist. Dennoch ist für das hier gegebene Beispiel eine Schadensreduzierung um ca. 65 % zu erwarten. Die Anlage der zweiten Deichlinie könnte somit die infolge eines Wasserstandsanstiegs von 0,25 m zu erwartende Risikozunahme kompensieren.

Die Methodik der probabilistischen Risikoanalyse eignet sich also nicht nur als Werkzeug zur Analyse der Folgen des Klimawandels auf den Küstenschutz, sondern unterstützt auch die Entscheidungsfindung über die optimale Strategie zur Risikominderung.

## 7 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“ ([www.krim.uni-bremen.de](http://www.krim.uni-bremen.de)) durch das Teilprojekt „Klimaänderung und Küstenschutz“ (Projektkennzeichen: 01 LD 0014) erarbeitet worden.

## 8 Literatur

- AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE: EAK 2002 - Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. In: Die Küste, Heft 65, Heide i. Holstein, 2002, 589 S.
- ELSNER, A./ MAI, S./ ZIMMERMANN, C.: Risikoanalyse - ein Element des Küstenzonenmanagements. In: Coastal Reports, Heft 1, 2004, S. 137-147.
- KORTENHAUS, A./ OUMERACI, H.: Probabilistische Bemessung für Seedeiche. In: LWI Bericht, Nr. 877, Leichtweiß-Institut, Braunschweig, 2002, 221 S.
- MAI, S.: Klimafolgenanalyse und Risiko für die Küstenzone. Am Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover angenommene Dissertation, Hannover, 2004, 234 S.

- MAI, S./ ZIMMERMANN, C.: Risk Analysis - Tool for Integrated Coastal Planning. In: Proc. of the 6th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC, Colombo, Sri Lanka, 2003, CD-ROM.
- MAI, S./ ZIMMERMANN, C.: Veränderung der Seegangsbedingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung. In: Coastal Reports, Heft 1, 2004, S. 93-100.
- MEYER, V.: Methoden der Sturmflut-Schadenspotenzialanalyse an der deutschen Nordseeküste. Am Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover eingereichte Dissertation. Hannover, 2004, 210 S.
- MEYER, V./ MAI, S.: Verfahren zur Berechnung der Schäden nach Deichbruch an der niedersächsischen Küste. In: Essener Geographische Arbeiten, Band 35, Essen, 2003, S. 169-178.
- MEYER, V./ MAI, S.: Überflutungsschäden im Küstenhinterland nach Deichbruch. In: Wasserwirtschaft, Heft 11, Wiesbaden, 2004 (im Druck).
- OTTE, C./ YU, I. / ELSNER, W.: 2. Zwischenbericht des Teilprojekts 5 - "Regionalökonomische Risiko- und Reaktions-Analyse des Klimawandels" (REcoACT) des Projektvorhabens "Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste" (KRIM), Universität Bremen, 2003 (unveröffentlicht).
- PROBST, B.: Überlegungen für einen Küstenschutz der Zukunft. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 75, 1994, Hannover, S. 52 – 68.
- VERGEER, G. J. H.: Probabilistic Design of Flood Defences. In: CENTER FOR CIVIL ENGINEERING RESEARCH AND CODES (CUR) Report, Heft 141, Gouda, Netherlands, 1990, S. 154.
- ZIMMERMANN, C./ MAI, S.: Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Nr. 6, Hamburg, 1998, S. 67-70.

### **Address**

Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Phys. Stephan Mai  
Dipl.-Geogr. Anne Elsner  
Prof. Dr.-Ing. Claus Zimmermann  
Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen  
Nienburger Str. 4  
30167 Hannover  
Germany

Dipl.-Geogr. Volker Meyer  
Universität Hannover, Geographisches Institut, Abt. Wirtschaftsgeographie  
Schneiderberg 50  
30167 Hannover  
Germany

E-mail: Stephan.Mai@mbox.fi.uni-hannover.de  
Anne.Elsner@fi.uni-hannover.de  
meyer@wigeo.uni-hannover.de  
Claus.Zimmermann@fi.uni-hannover.de