

Stephan Mai und Nicole von Lieberman

## **Sturmflutgefährdung der Hafenstadt Bremerhaven: Eine Risikoanalyse**

### **1. Methode der Risikoanalyse**

In das natürliche Geschehen an der deutschen Nordseeküste und ihren Ästuaren wurde insbesondere seit dem 19. Jahrhundert mit Schutzbauten eingegriffen, um Siedlungen, landwirtschaftliche Flächen, Verkehrswege sowie Industrie- und Hafenanlagen dem Zugriff des Wassers zu entziehen. Die eingesetzten Bauwerke bzw. Küstenschutzelemente sollen hierbei einerseits funktionell die Naturvorgänge beeinflussen, andererseits konstruktiv den äußeren Belastungen durch Wasserstände, Seegang und Strömung standhalten. So wird nach DIN 4047-2 (NAW im DIN 1988) Küstenschutz als die „Maßnahmen zur Sicherung der Küsten des Festlandes und der Inseln gegen die zerstörerischen Einwirkungen des Meeres“ definiert.

Die einzelnen Elemente des Küstenschutzes können entweder entsprechend ihrer Ausprägung in flächige (z.B. Vorländer), lineare (z.B. Deiche) oder punktuelle Küstenschutzelemente (z.B. Sperrwerke) oder gemäß ihrer Funktion in Küstenschutzelemente des Erosionsschutzes (z.B. Buhnen), des Hochwasserschutzes (z.B. Deiche), der Binnenentwässerung (z.B. Schöpfwerke) oder in natürliche Elemente (z.B. Vorländer) unterteilt werden.

Wirken einzelne Elemente des Küstenschutzes in Kombination miteinander, werden sie als Küstenschutzsysteme bzw. tiefengestaffelter Küstenschutz bezeichnet. So ist beispielsweise die flächenhafte Wirkung der vorgelagerten Wattgebiete an der deutschen Nordseeküste für den Küstenschutz von großer Bedeutung. Das Wattenmeer mit seinen Außensänden, Wattflä-

chen, Inseln und Halligen wirkt als mehrfach gestaffelte Energieumwandlungszone zwischen dem seeseitigen Wattsockelrand und den Festlandsdeichen mit ihren Vorländern. Die geringen Wassertiefen über dem Watt erzwingen das Brechen des von der Nordsee einlaufenden Seegangs, der somit durch flächenhafte Brandung einen Teil seiner Energie abgibt und die Haupt- bzw. Landesschutzdeiche nur noch mit reduzierter Wellenhöhe erreicht (v. LIEBERMAN und MAI 1999a).

Die Zusammensetzung des Küstenschutzsystems bestimmt die Sicherheit des geschützten Küstenraums bzw. Hinterlands. Die Methodik der Risikoanalyse ermöglicht die Bestimmung der Sicherheit und stellt somit ein Instrument zur SchADVorsorge und -vermeidung im Küstenraum dar. Während für den Hochwasserschutz im Binnenland derartige Instrumente sehr weit entwickelt sind (z.B. LAWA 1995), existieren sie für die Bewertung von Sturmflutereignissen im norddeutschen Küstenraum noch nicht. Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens „Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung“ wird im Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover auf der Grundlage der Risikoanalyse beispielhaft für die Region Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten (Abb. 1) ein Instrument zur Vorsorge und Vermeidung von Sturmflutschäden entwickelt (MAI und v. LIEBERMAN 1999).

Abb. 1: Untersuchungsgebiet „Region Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten“



Quelle: Mai und v. Lieberman 2000a

Die Region „Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten“ mit dem Seehafen Bremerhaven stellt ein Beispiel einer Küstenregion mit sowohl starker wirtschaftlicher Nutzung (Seehafen, Industrie, Landwirtschaft, Tourismus) als auch mit zahlreichen unmittelbar angrenzenden Naturschutzflächen dar. Die dauerhafte Nutzung dieses Lebens- und Wirtschaftsraumes wird durch vielfältige und gestaffelte Maßnahmen der Küstensicherung, die insbesondere dem Schutz gegen erhöhte Wasserstände, gegen Seeegang und Strömungseinwirkung dienen, gesichert (v. LIEBERMAN und MAI 1999b). Der auf Grund dieser Schutzmaßnahmen erreichte Sicherheitsstandard hat zu einer hohen Besiedlungsdichte mit vielfältigen wirtschaftlichen Nutzungen und umfangreichen, sensiblen Infrastrukturen geführt.

Bei infolge von Klimaänderungen wachsenden Belastungen der Schutzsysteme, z.B. durch ein häufigeres und länger andauerndes Auftreten

von Extremfluten und Sturmereignissen, kann der erreichte Sicherheitsstandard nicht ohne weitere Maßnahmen der Küstensicherung und des Bevölkerungsschutzes aufrechterhalten werden. Angesichts hoher Kosten für den Küstenschutz, weiter steigenden Schadenpotentials und fortschreitender Flächennutzung, z.B. durch Gewerbegebiete, werden die Spielräume für Anpassungen geringer und das Schutzsystem, bestehend aus einzelnen Schutzelementen, weniger flexibel.

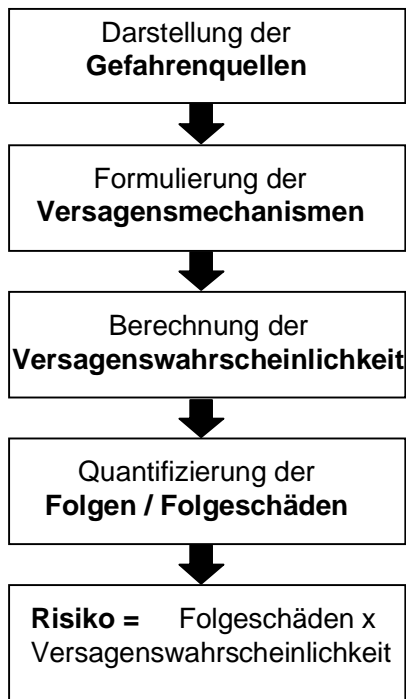
Die Risikoanalyse ermöglicht eine Quantifizierung des Sicherheitsstandards. Sie beinhaltet einerseits die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Schutzsystemen (engl. *failure probability*), andererseits die Quantifizierung der bei Versagen (engl. *failure*) auftretenden Folgeschäden. Das Produkt von Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschäden beschreibt dann das Risiko (engl. *risk*) als Maß der pro Jahr infolge des Versagens von Schutzsystemen zu erwartenden Kosten (Abb. 2).

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit ist zunächst eine Darstellung der Belastungen (Gefahrenquellen) sowie eine Beschreibung der Versagensmechanismen der Schutzelemente erforderlich. Allgemein erfolgt zur Beschreibung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Küstenschutzsystems zunächst die Definition einer Zuverlässigkeitsfunktion  $Z$  (engl. *limit state function, reliability function*), welche als Differenz der von den Bauwerkseigenschaften abhängigen Belastbarkeit  $R$  und der Belastung  $S$  definiert ist (PLATE 2000), d.h.

$$Z = R - S \quad (1)$$

Überschreitet die Belastung auf das Küstenschutzsystem die Belastbarkeit des Küstenschutzsystems, wird  $Z$  negativ ( $Z < 0$ ), und ein Versagen des Küstenschutzsystems tritt ein. Die Belastung  $R$  und die Belastbarkeit  $S$  sind i.d.R. wahrscheinlichs

Abb. 2: Elemente der Risikoanalyse



Quelle: Zimmermann und Mai 1998

verteilte Größen mit den Wahrscheinlichkeitsdichten  $p_{R(R)}$  und  $p_{S(S)}$ . Somit ist auch die Zuverlässigkeit  $Z$  eine wahrscheinlichkeitsverteilte Größe mit der Wahrscheinlichkeitsdichte  $p_{Z(Z)}$ . Die Wahrscheinlichkeit des Versagens  $p_{Z<0}$ , d.h. negativer Zuverlässigkeiten, ergibt sich dann durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichten

$$\frac{1}{T_{Z<0}} = p_{Z<0} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} dZ = \int_{-\infty}^{\infty} p_{R(R)} \int_R^{\infty} p_{S(S)} dS dR = \iint_{R-S<0} p_{R(R)} p_{S(S)} dR dS \quad (2)$$

Der Versagenswahrscheinlichkeit entspricht der Kehrwert der Wiederkehrzeit eines Versagens  $T_{Z<0}$ .

Bei der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit werden verschiedene Stufen (engl. *level*) unterschieden (CUR 1990):

Stufe III:

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit werden die vollständigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der wahrscheinlichkeitsverteilten Variablen eingeführt und der unter Umständen nicht-lineare Charakter der Zuverlässigkeitsfunktion berücksichtigt.

Stufe II:

Im Vergleich zur Stufe III werden einige Näherungen eingeführt, so werden die Zuverlässigkeitsfunktionen linearisiert und alle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen als normalverteilt angenommen.

Stufe I:

Hier wird vollständig auf die Einführung von Wahrscheinlichkeitsdichten verzichtet. Statt dessen wird der Mittelwert mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Eine Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten ist auf Stufe I nicht möglich.

Die nach Gleichung 2 zu berechnende Versagenswahrscheinlichkeit ist eine Komponente des Risikos. Neben ihr ist eine Quantifizierung der Folgeschäden  $C_{(Z)}$  in Abhängigkeit von dem Grad der Funktionseinschränkung des Küstenschutzsystems erforderlich. Das Risiko ergibt sich dann mit

$$\text{Risiko} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} \cdot C_{(Z)} dZ \quad (3)$$

Folgeschäden können entweder aus Nutzungseinschränkungen von Infrastrukturen, wie z.B. Fähranlegern während einer Sturmflut, oder aus der Zerstörung von Küstenschutzelementen infolge von Überflutungen des Hinterlandes resultieren. Zur Abschätzung der Folgeschäden ist zunächst das Gesamtschadenpotential der betrachteten Küstenregion, d.h. die Summe der im Hinterland durch Überflutung gefährdeten Vermögenswerte, zu ermitteln. Neben dem Gesamtschadenpotential ist es zur Berechnung der Folgeschäden erforderlich, den Grad der Schädigung

gung bei Überflutung zu bestimmen. Dieser ergibt sich einerseits aus dem Anteil der durch Überflutung betroffenen Flächen an der betrachteten Küstenregion und andererseits aus dem Grad der Zerstörung der Werte im durch Überflutung betroffenen Gebiet (MAI und v. LIEBERMAN 2000b).

## 2. Beschreibung der Versagenswahrscheinlichkeit

Küstenschutzsysteme mit Hauptdeich als wesentlichem Schutzelement weisen Versagensmechanismen von Erosion der Außenböschung bis Schiffsstoß auf (Abb. 3). Die zugehörigen Zuverlässigkeitsfunktionen wurden teilweise durch das CUR / TAW (1990) entwickelt. Der wesentliche Versagensmechanismus ist jedoch,

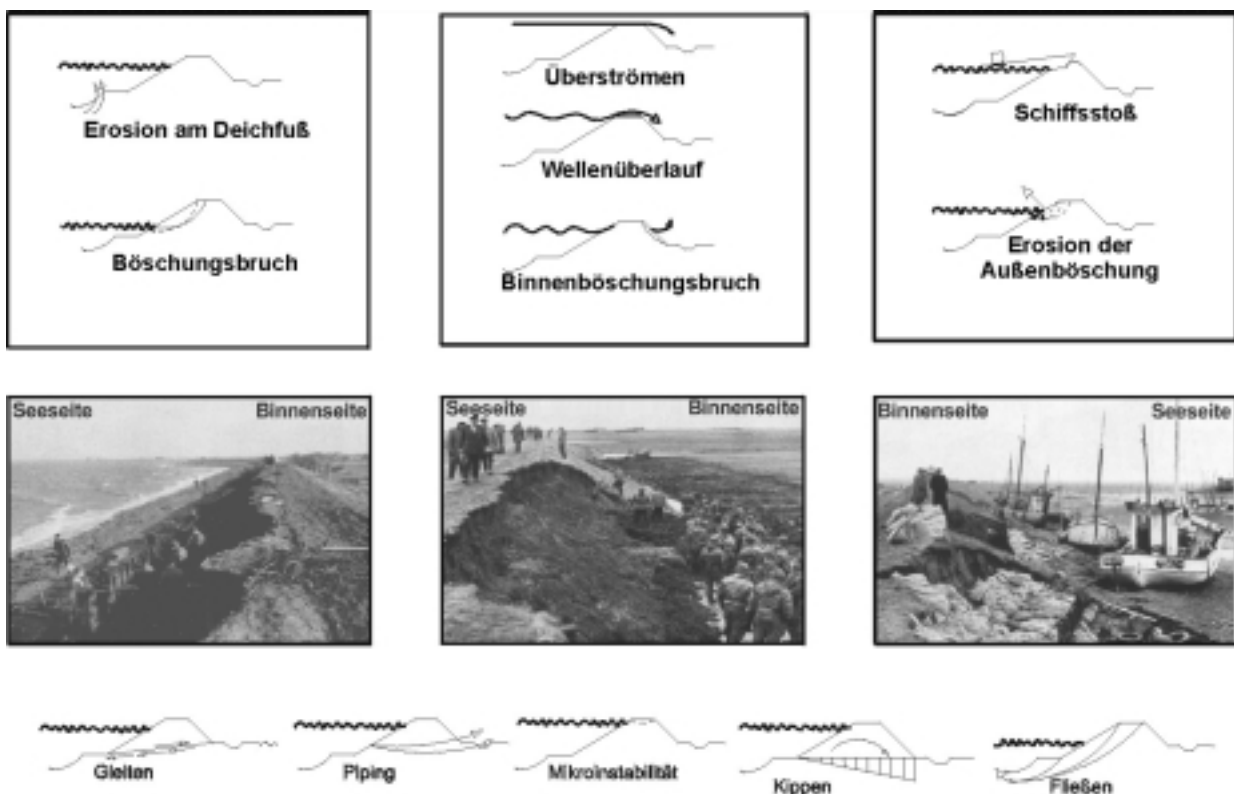
wie historische Sturmfluten zeigen, der Wellenüberlauf. Dieser Versagensmechanismus wird daher auch traditionell der Deichbemessung in Deutschland (AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE 1993), den Niederlanden (JORISSEN 2000) und Dänemark (LAUSTRUP 2000) zugrunde gelegt. Die Beschreibung des Wellenüberlaufs erfolgt entweder auf der Basis des Wellenaufbaus (CUR 1990)

$$Z = h_D - Thw - R_{98\%} \quad (4)$$

$$R_{98\%} = 0.75 \cdot \tilde{a} \cdot \frac{1}{n_D} \sqrt{g \cdot H_s} \cdot T_m \quad (5)$$

oder auf der Basis der Wellenüberlaufmenge (REEVE 1998)

Abb. 3: Versagensmechanismen von Seedeichen



Quelle: nach v. Lieberman und Mai 1999b

$$Z = Q_{\text{tol}} - Q_{\text{mean}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{mean}} = \gamma_{m,1} \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot e^{-\frac{1}{\gamma_{m,2}} \cdot \frac{(h_D - \text{Thw})}{H_s}} \quad (7)$$

mit

$h_D$	Deichhöhe
Thw	Tidehochwasserstand
$R_{98\%}$	Wellenauflauf
$\gamma$	dimensionsloser Parameter
$1/n_D$	Deichneigung
$g$	Erdbeschleunigung
$H_s$	signifikante Wellenhöhe
$T_m$	mittlere Wellenperiode
$Q_{\text{tol}}$	zul. mittlere Wellenüberlaufmenge
$\gamma_{m,1}, \gamma_{m,2}$	dimensionslose Parameter

Die zulässige mittlere Überlaufmenge  $Q_{\text{tol}}$  kann in Bezug auf die funktionelle Sicherheit mit  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  und in Bezug auf die strukturelle Sicherheit mit  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  angenommen werden (OUMERACI u.a. 1999). JORISSEN (2000) gibt zulässige Überlaufmengen in Abhängigkeit von der Deckschicht des Deiches mit  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  bis  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  an.

Auch der auf der Basis des Wellenaufbaus formulierte Ansatz nach Gleichung 4 läßt ebenfalls einen Wellenüberlauf zu, da 2% der Wellen die nach Gleichung 5 berechnete Auflaufhöhe überschreiten. Dies entspricht etwa einem mittleren Wellenüberlauf von  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  bis  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  (JORISSEN 2000). Da ein Schaden am Hauptdeich in der Regel nicht Folge eines kontinuierlichen mittleren Wellenüberlaufs ist, sondern aus dem Wellenüberlauf eines Einzelereignisses resultiert, ist in Gleichung 6 gegebenenfalls der maximale Wellenüberlauf einzusetzen (MAI und ZIMMERMANN 2000). Für diesen fehlen jedoch Angaben einer zulässigen Überlaufmenge. Die weitere Analyse erfolgt auf der Basis des Wellenüberlaufs.

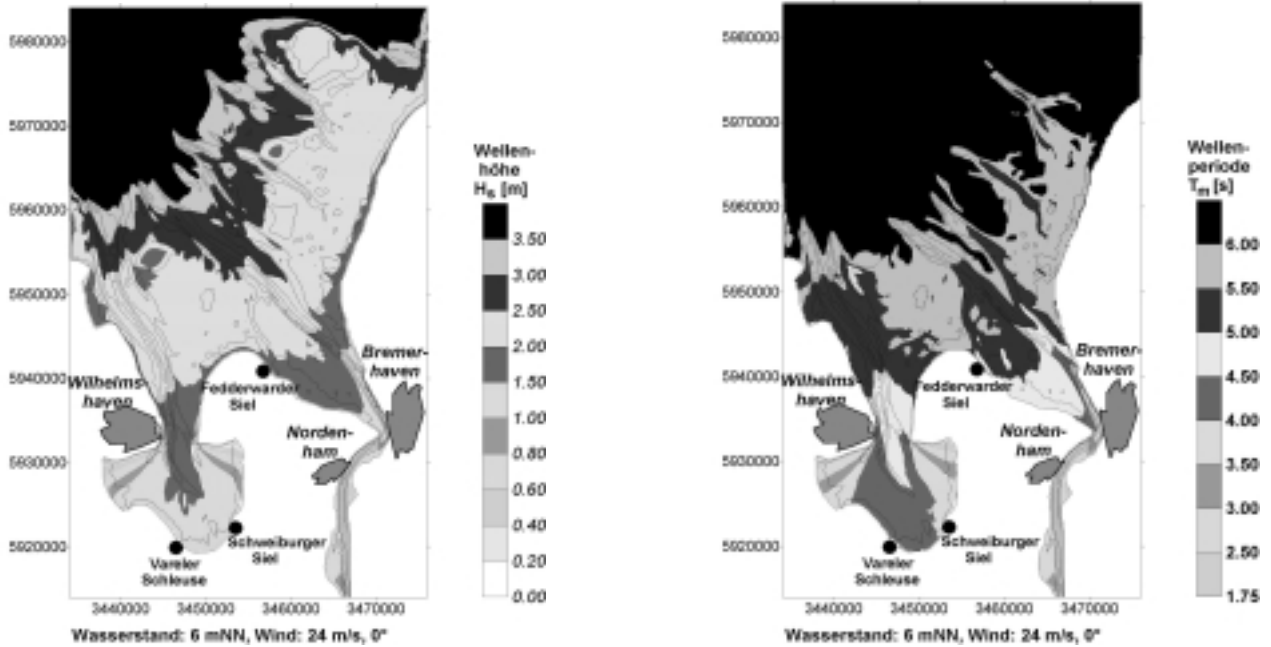
Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit nach Gleichung 4 ist insbesondere die Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsdichte der Umweltparameter am Deichfuß – Tidehochwasserstand Thw, signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode – erforderlich. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Bauwerksparameter wird vereinfachend als Dirac'sche  $\delta$ -Funktion angenommen.

Zur Ableitung der Wahrscheinlichkeitsdichte stehen für den Tidehochwasserstand langjährige Zeitreihen von Pegelaufzeichnungen zur Verfügung, während diese zur Ermittlung der Seegangparameter in der Regel nicht vorhanden sind. Die Seegangsstatistik ist daher aus der Windstatistik (Geschwindigkeit und Richtung) unter Berücksichtigung des Tidehochwasserstandes abzuleiten.

Dazu wird am nördlichen Rand des Modellgebietes (vgl. Abb. 1) der Seegang einem Windstreichdiagramm (*fetch-diagram*) entnommen (CERC 1984). Dies stellt, wie Vergleiche mit Ergebnissen der Seegangssimulationen der Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie BSH mit dem European-Shelf-Model zeigen, eine akzeptable Näherung dar (MAI und ZIMMERMANN 2000). Die Ausbreitung des Seegangs im Modellgebiet wird mit dem numerischen Modell Shallow Waves Nearshore SWAN simuliert. Die Überprüfung der Simulationsergebnisse und die Kalibrierung der Modellparameter ist großräumig mit Naturmessungen (MAI u.a. 2000) erfolgt und durch physikalische Versuche im Großen Wellenkanal GWK für küstennahe Schutzelemente, wie Sommerdeiche (MAI u.a. 1999) oder Vorländer (v. LIEBERMAN und MAI 2000b), ergänzt worden.

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel der Seegangsausbreitung im Modellgebiet bei Nordsturm. Es ist deutlich die starke Abnahme der signifikanten Wellenhöhe des Seegangs über den Wattge

Abb. 4: Seegangsausbreitung im Weser-Jade-Ästuar – numerische Simulation mit SWAN  
links: signifikante Wellenhöhe, rechts: mittlere Wellenperiode

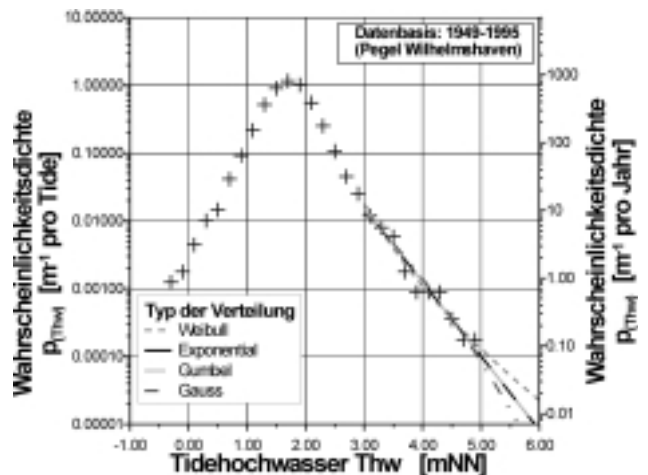


Quelle: Mai und v. Lieberman 2000a

bieten vor der Wurster Küste und vor Butjadingen erkennbar, während in den Fahrwassern der Jade und Weser der Seegang höher einläuft (Abb. 4, links). Ähnliches gilt auch für die mittlere Wellenperiode (Abb. 4, rechts). Die Ergebnisse der numerischen Simulationen für ausgewählte Gebiete der niedersächsischen Nordseeküste sowie des Weserästuars stehen in Form eines internet-basierten Seegangsatlases zur Verfügung.

Exemplarisch für die Verteilung der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen ist in Abbildung 5 die Wahrscheinlichkeitsdichte des Tidehochwasserstandes für einen 50-jährigen Datensatz von Pegelaufzeichnungen des Pegels Wilhelmshaven dargestellt und unter Annahme verschiedener Verteilungsfunktionen extrapoliert. Diese Extrapolation führt teilweise zu erheblichen Abweichungen der Wahrscheinlichkeitsdichte des Thw, was insbesondere auch bei Betrachtung der Thw bestimmter Jährlich

Abb. 5: Wahrscheinlichkeitsdichte der Thw und ihre Extrapolation für Extremwasserstände



Quelle: Mai und v. Lieberman 2000a

keit deutlich wird (MAI und v. LIEBERMAN 2000a). Aus den dargestellten Belastungen des Küstenschutzsystems ergibt sich nach Gleichung 2 die Versagenswahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs

Abb. 6: Funktionalitäten von BaSIS

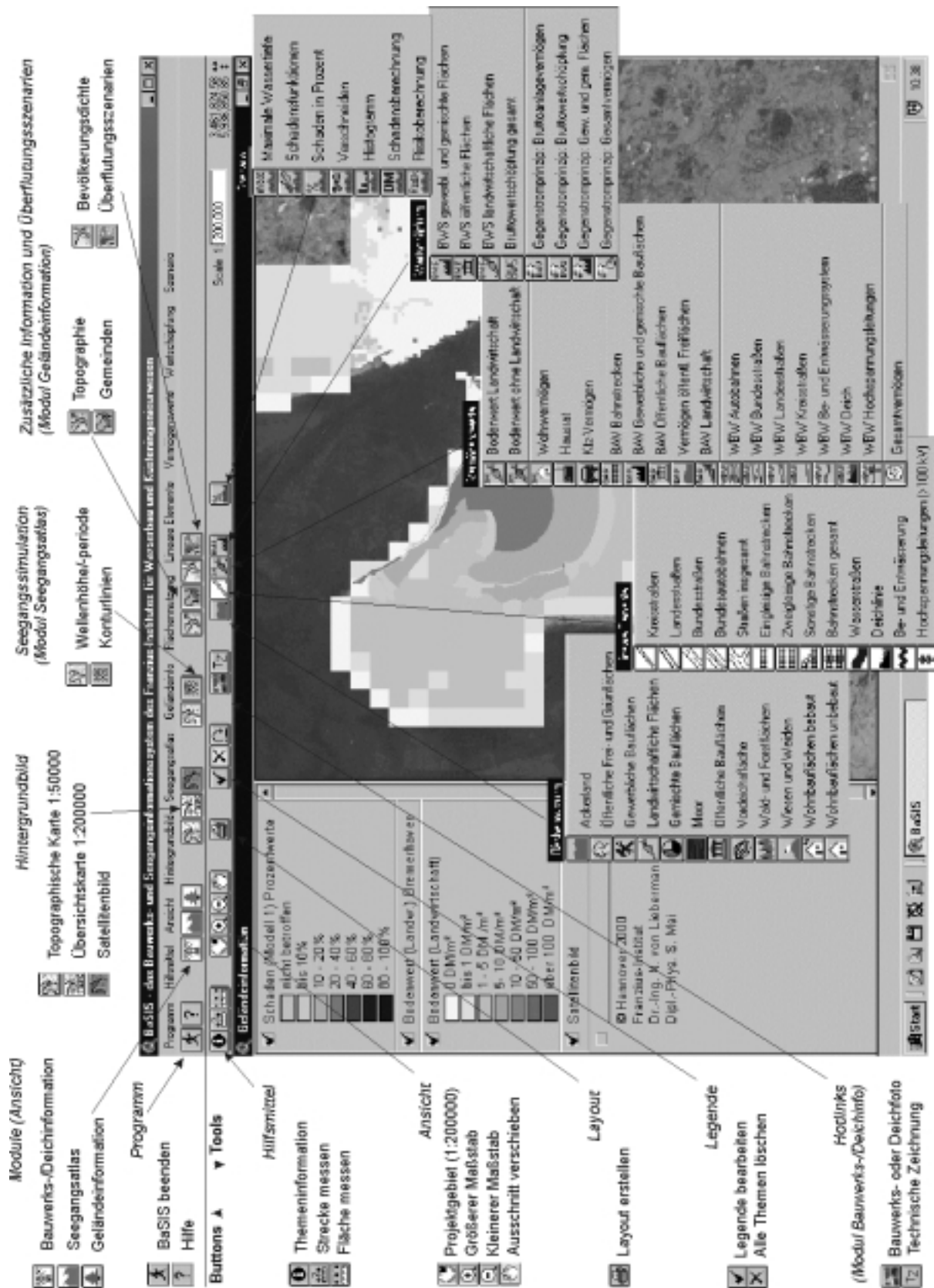
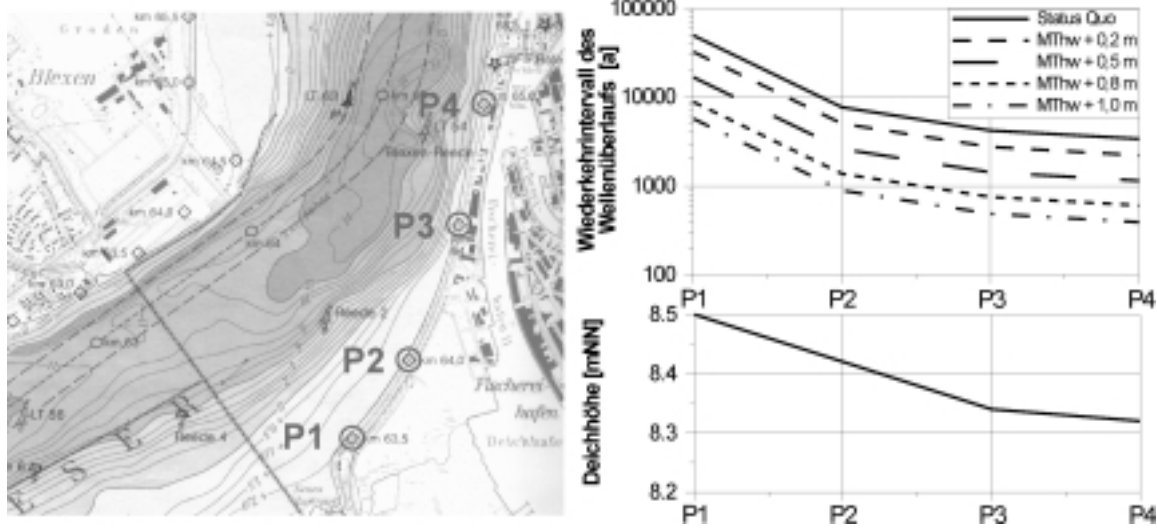


Abb. 7: Heutige Wiederkehrintervalle von Deichversagen des Küstenabschnitts Bremerhaven sowie Auswirkungen von Klimaänderungen



am Hauptdeich. Voraussetzung für die Berechnung ist neben der Kenntnis der Belastungen auch die Kenntnis der Bauwerkseigenschaften. Diese können z.B. dem Generalplan (BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS 1997) entnommen werden, wobei teilweise die tatsächlich vorhandenen Deichhöhen deutlich abweichen. Eine Zusammenstellung des aktuellen sowie des Planungszustandes für das Modellgebiet findet sich z.B. in dem im Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen entwickelten auf der Hypertext Mark-Up Language (HTML) basierenden Kataster der Küstenschutzbauwerke oder in dem am Franzius-Institut aufgebauten, auf der Anwendung ARCVIEW basierenden geographischen Informationssystem BASIS (Bauwerks- und Seegangsinformationssystem) (Abb. 6).

In Abbildung 7 wird für einen ausgewählten Deichabschnitt südlich Bremerhavens den heutigen Deichhöhen der einzelnen Profile P1 bis P4 die Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs zugeordnet. Diese beträgt zur Zeit entlang des Deichabschnitts 5.000 bis 50.000 Jahre. Im Vergleich dazu weisen benachbarte niedersächsische Deichabschnitte Wiederkehrzeiten von 400 bis 8.000 Jahren (Norder Land) bzw. von 400 bis 3.000 Jahren (Wanger Land) bzw. von

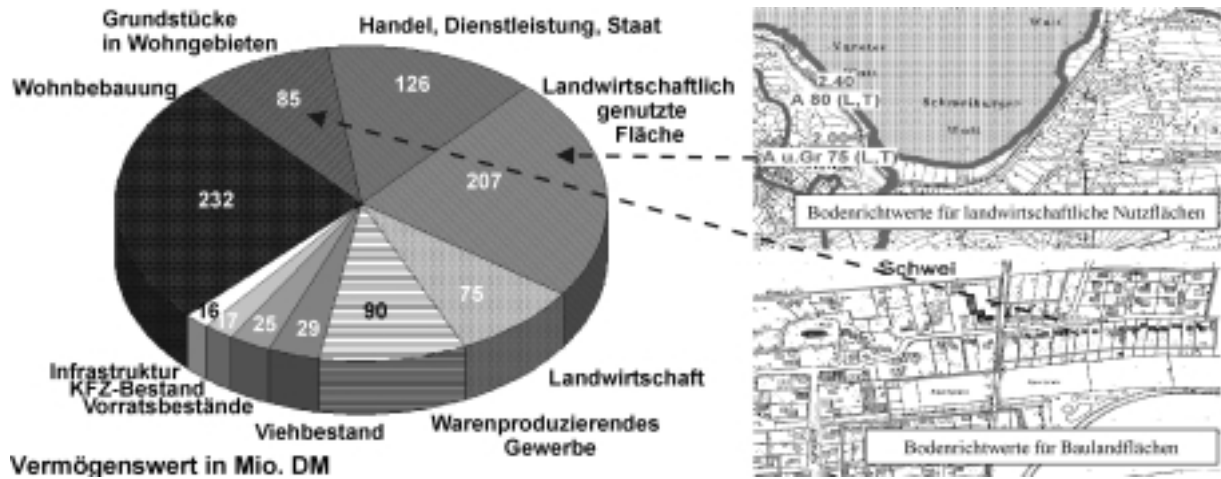
1.000 Jahren (Butjadingen) bzw. von 500 bis 6.000 Jahren (Land Wursten) auf (MAI und ZIMMERMANN 2000). LAUSTRUP (2000) gibt für die dänischen Nordsee-Deiche eine Wiederkehrzeit von 200 Jahren und JORISSEN (2000) für die niederländischen Deiche eine Wiederkehrzeit von 4.000 bis 10.000 Jahren an. Es ist jedoch festzustellen, daß die großen Abweichungen der Wiederkehrzeiten des Wellenüberlaufs an den Deichen der genannten Nordsee-Anrainerstaaten teilweise auf kleine Unterschiede in den Berechnungsverfahren zurückzuführen sind. Für den gesamten, dargestellten Deichabschnitt ist ebenso der Einfluß eines Anstiegs des MThw auf das Wiederkehrintervall eines Wellenüberlaufs dargestellt. Dieses nimmt auf etwa 10% bei einem Anstieg des MThw um 1 m ab.

### 3. Ermittlung des Gesamtschadenpotentials

Zur Abschätzung der Folgeschäden ist zunächst das Gesamtschadenpotential der betrachteten Küstenregion, d.h. die Summe der im Hinterland durch Überflutung gefährdeten



Abb. 8: Ermittlung des Gesamtschadenpotentials (Vermögenswerte) mit Hilfe von Bodenrichtwerten



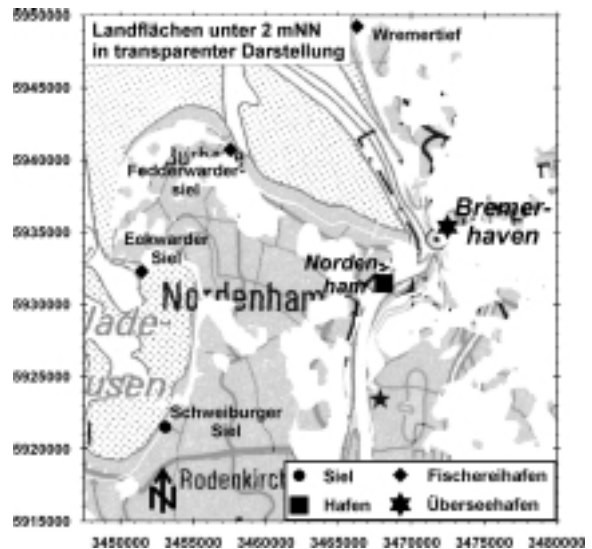
Quelle: v. Lieberman und Mai 2000a

Vermögenswerte sowie die Bruttowertschöpfung, zu ermitteln. Die Werte von Land und Boden als Teil des Gesamtschadenpotentials ergeben sich beispielsweise aus Karten der Bodenrichtwerte (Abb. 8) und durch Verschneidung der topographischen Karte mit theoretisch eintretenden Wasserständen.

Eine erste Approximation der Wasserstände bei Überflutung ergibt sich durch Verschneidung des Sturmflutwasserstandes mit der topographischen Höhe (Abb. 9). Diese statische Betrachtung berücksichtigt nicht den zeitlichen Verlauf der Überflutung und begrenzt somit die maximale überflutete Fläche.

Für die in Abbildung 9 dargestellte potentielle Überflutungsfläche wurden die vorhandenen Werte mit Hilfe eines mesoskaligen Ansatzes ermittelt. Hierzu wurden analog zehn flächenhafte Variablen (z.B. öffentliche Grünflächen, bebaute Wohnflächen), elf linienhafte Variablen (z.B. Bundesstraße, Hochspannungsleitung) sowie weitere räumlich differenzierte Variablen (z.B. Bodenrichtwerte, Beschäftigtenzahl) erfaßt.

Abb. 9: Potentielle Überflutungsflächen bei einem Wasserstand von 4 mNN (Zum Vergleich: Pegel Bremerhaven  $HHT_{w1976} = 5,19$  mNN)



Quelle: Mai und v. Lieberman 1999

Die Erfassung der Variablen erfolgte für die Städte Nordenham und Bremerhaven auf der Grundlage der Deutschen Grundkarte im Maßstab 1:5.000 (DGK5), für die übrigen Gebiete auf der Grundlage der topographischen Karte im Maßstab 1:25.000 (TK25).

Die Auswertung erfolgte in den Städten in Planquadraten von 200 m x 200 m und für das übrige Gebiet in Planquadraten von 1.000 m x 1.000 m. Die Gesamtheit der geschützten Werte (Gesamtschadenpotential) wurde auf der Grundlage der Statistiken und der Datenbank des NIEDERSÄCHSISCHEN INSTITUTS FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG E.V. (NIW, Stand 1998) erfaßt. Die Ergebnisse der Wertermittlung wurden in das BASIS aufgenommen.

Auf der Grundlage der flächenhaft und linienhaft ermittelten Daten wurden den einzelnen Größen Werte zugeordnet. Die Zuordnung erfolgte über Befragungen zu mittleren Kosten von Anlagen, z.B. DM 1.125,- pro Meter Bahnlinie o.ä., und veröffentlichten Richtwertkarten. So erfolgte eine Beurteilung der Werte der landwirtschaftlichen Nutzflächen und Bauflächen unter Zuhilfenahme von durch die Bezirksregierung Weser-Ems veröffentlichten Bodenrichtwerten (vgl. Abb. 8). Außerdem wurden die Gemeindestatistiken der Statistischen Landesämter auf die Planquadrate der Auswertung „heruntergebrochen“. Hierzu wurde ein Top down-Ansatz gewählt, der von einer Gleichverteilung der Zielvariablen auf die entsprechenden Flächennutzungsarten ausgeht.

Der Top down-Ansatz weist insbesondere in städtischen Regionen mit starker Konzentration einzelner Wirtschaftsbetriebe Ungenauigkeiten auf, welche auf die Annahme einer flächenmäßigen Gleichverteilung der Zielvariablen zurückzuführen ist. Einen besseren Bewertungsmaßstab stellt hier der Bottom up-Ansatz, der ausgewählte Objekte einer individuellen Bewertung auf Grundlage der Fläche des Betriebsgeländes, der Branchenzuordnung und der Beschäftigtenzahl unterzieht, dar. Dieser wurde für Betriebe mit mehr als 50 Beschäftigten (welche nur in den Städten Bremerhaven und Nordenham vorkommen) gewählt. Die Kombination des Top down-Ansatzes und des Bottom up-Ansatzes, wie hier angewendet, wird als Gegen-

stromprinzip bezeichnet. Die nach diesem Verfahren ermittelte Bruttowertschöpfung in den Städten Bremerhaven und Nordenham ist in Abbildung 12 dargestellt. Das Gesamtschadenpotential Bremerhavens beläuft sich auf 1,3 Mrd. EUR, für Butjadingen beträgt es 125 Mio. EUR.

#### **4. Ermittlung der Folgeschäden**

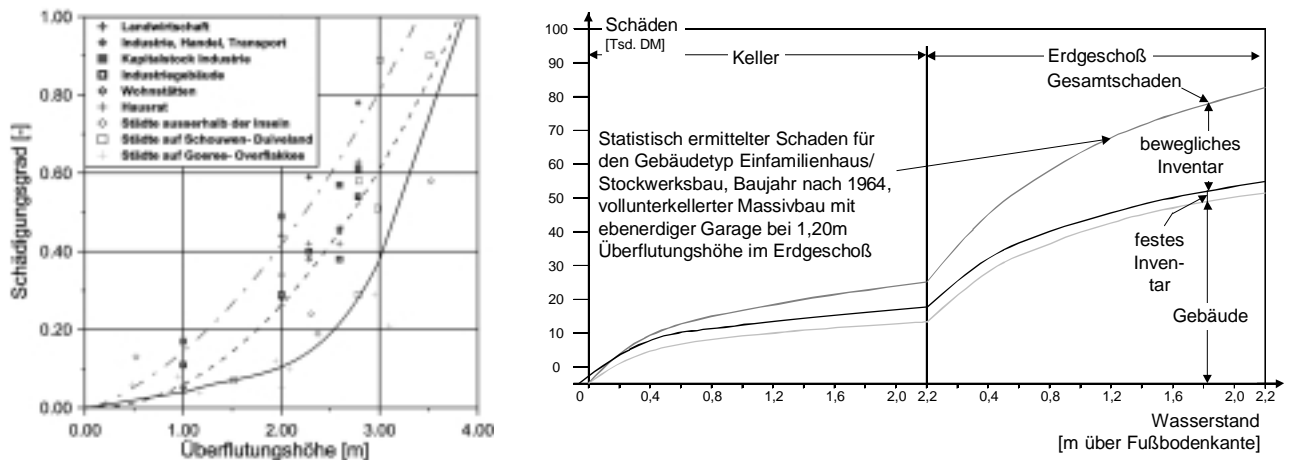
Neben dem Gesamtschadenpotential ist es zur Berechnung der Folgeschäden erforderlich, den Grad der Schädigung bei Überflutung, d.h. der Anteil der zerstörten Werte, zu bestimmen. Auf der Grundlage früherer Überflutungsereignisse leitet sich der Schädigungsgrad in Abhängigkeit zur Überflutungshöhe ab (Abb. 13). Die Überflutungshöhe wurde für verschiedene Schadens- und Sturmflutereignisse mit Hilfe des numerischen Simulationsprogramms MIKE21 ermittelt. Ergebnisse der Simulationen sind in den Abbildungen 14 und 15 für einen Deichbruch am Schweiburger Siel bzw. am Geestesperrwerk in Bremerhaven dargestellt. Der zeitliche Ablauf der verschiedenen Überflutungsszenarien ist als animierte Grafik im BASIS abrufbar.

Die aus den numerischen Simulationen für Bremerhaven resultierende Überflutungsfläche bei Deichbruch beträgt maximal rd. 13,36 km<sup>2</sup> bei Überflutungshöhen von 0 m bis 3 m. Gemäß Abbildung 13 (links) bedeutet dies, daß 0% bis 80% des Gesamtschadenpotentials der Stadt Bremerhaven in Höhe von 1,3 Mrd. EUR, d.h. rd. 520 Mio. EUR, geschädigt werden.

#### **5. Ermittlung des Risikos**

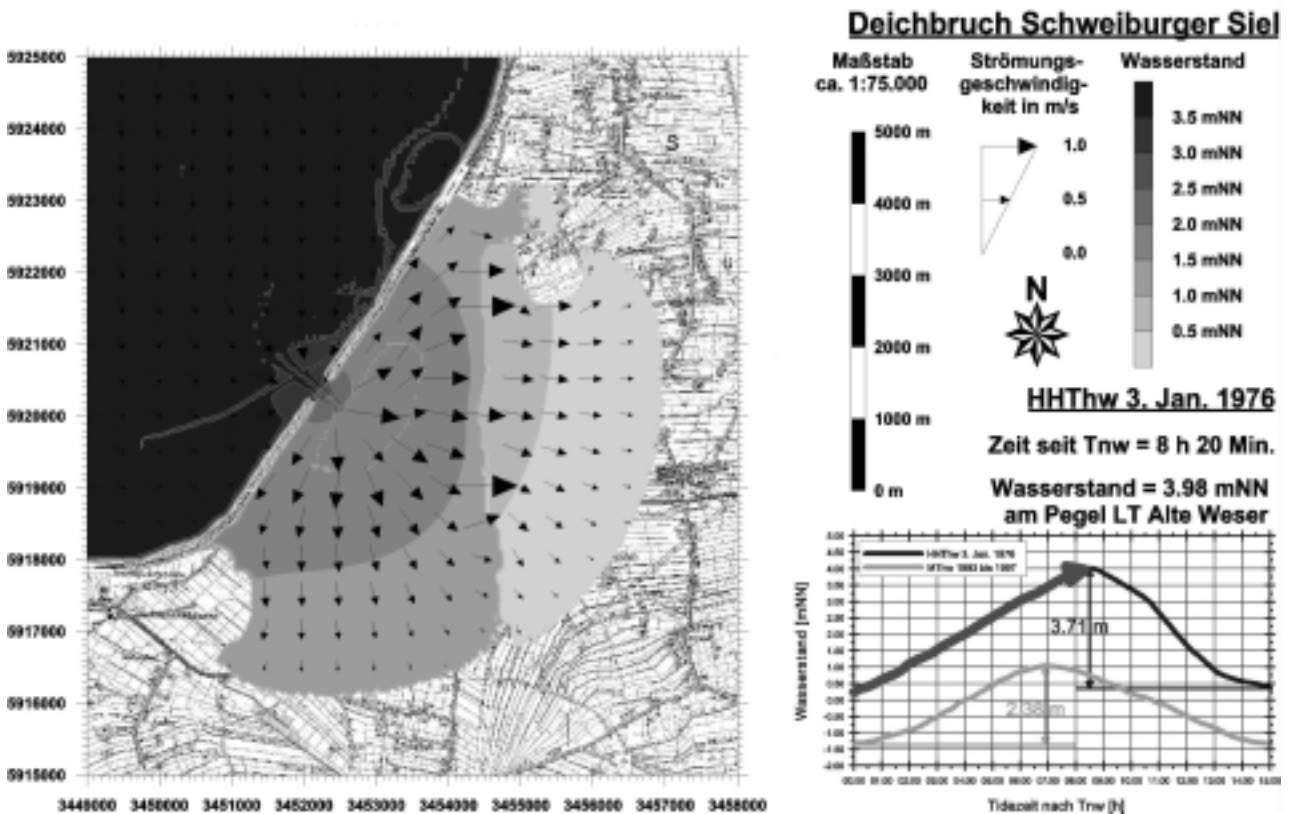
Für Bremerhaven ergibt sich mit der in Kapitel 3 ermittelten derzeitigen Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtschutzsystems von 0,002 1/a und dem in Kapitel 4 bestimmten Folgeschaden in Höhe von 520 Mio. EUR ein Risiko von

Abb. 10: Schädigungsgrade in Abhängigkeit von der Überflutungshöhe



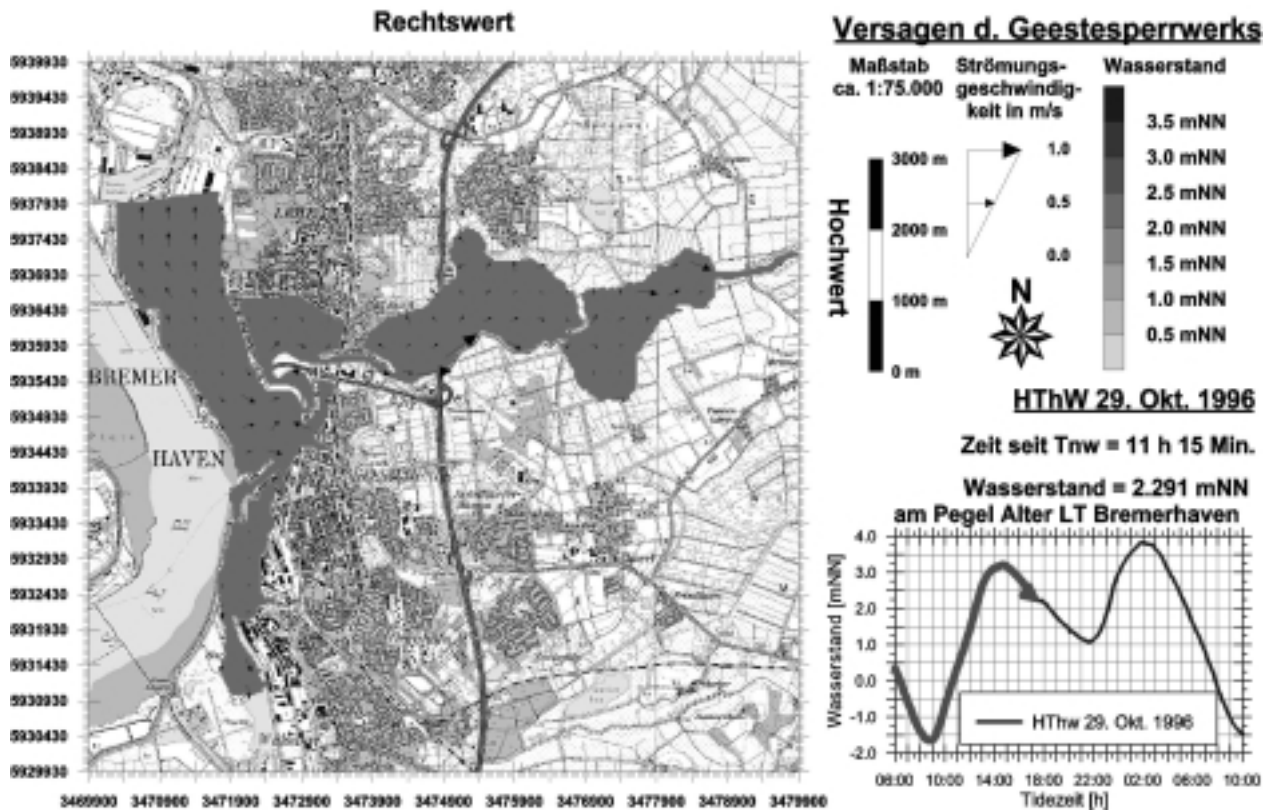
Quelle : CUR 1990 und Schmidtke 1995

Abb. 11: Überflutungsereignis am Schweiburger Siel



Quelle: v. Lieberman und Mai 2000a

Abb. 12: Überflutung des Hinterlandes (Stadtgebiet) von Bremerhaven bei Deichbruch



Quelle: v. Lieberman und Mai 2000a

104.000 EUR/a pro 500 m Deichlänge. Wird ein klimabedingter Wasserstandsanstieg von 0,80 m zugrunde gelegt, erhöht sich die Versagenswahrscheinlichkeit auf 0,0014 1/a, so daß das Risiko auf 728.000 EUR/a pro 500 m Deichlinie ansteigt. Im Vergleich dazu ergibt sich beispielsweise für den westlich benachbarten Küstenabschnitt Butjadingen ein aktuelles Risiko von rd. 51.000 EUR/a pro 500 m Deichlänge. So zeigt sich, daß die aktuelle Küstenschutzstrategie keine einheitliche Vorsorge im Sinne eines ausgeglichenen Risikos gewährleistet. Für die stärker gefährdete Region, hier Bremerhaven, sind ergänzende Schutzmaßnahmen, wie Deichverstärkungen bzw. ergänzende Sicherungsmaßnahmen, z.B. der Bau eines Sperrwerks, vorzusehen. Mit der Risikoanalyse steht ein Instrument zur Erfüllung dieser Vorsorgeaufgabe zur Verfügung.

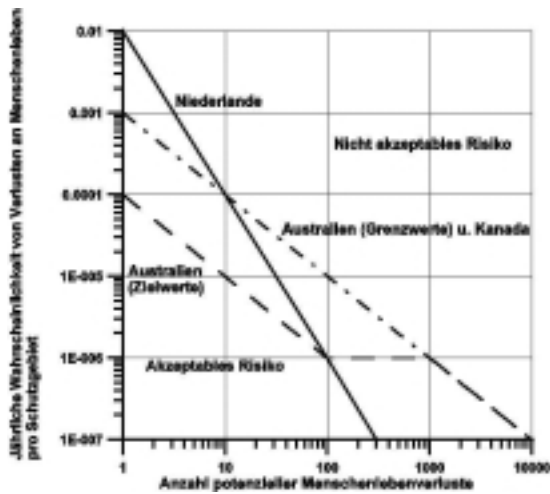
Neben monetären Schadenfolgen können auch monetär schwer bzw. nicht bewertbare Größen,

wie mögliche Verluste an Menschenleben, in die Risikoanalyse einbezogen werden. Es liegt dann mit einer monetären Bewertung der Folgen des Versagens von Küstenschutzsystemen im Vergleich zu den Investitionen in den Küstenschutz und der Beurteilung der Verluste an Menschenleben ein Mehrzielentscheidungsproblem vor. Eine mögliche Lösung dieses Problem stellt die Minimierung der Summe aus Investitionskosten und Risiko unter Einhaltung des akzeptablen Risikos des Verlustes an Menschenleben dar (Abb. 13).

## 6. Möglichkeiten der SchADVorsorge und -vermeidung

Aspekte der SchADVorsorge umfassen einerseits eine gezielte Flächennutzung des Hinterlandes, andererseits den Ausbau des Küsten

Abb. 13: Akzeptables Risiko von Verlusten an Menschenleben



Quelle: nach Göttle u.a. 1999

schutzsystems. Die Risikoanalyse bietet die Möglichkeit, verschiedene Flächennutzungskonzepte und Ausbauzustände des Küstenschutzsystems quantitativ zu bewerten, insbesondere können verschiedene Schutzstrategien – Objektschutz oder Gesamtschutz – unter Kostengesichtspunkten verglichen werden. Die Risikoanalyse findet so Eingang in die Generalplanung des zukünftigen Küstenschutzes. Hierbei werden die Handlungsoptionen des Zurückweichens (d.h. die Aufgabe bestimmter Küstenregionen), des Vordringens (d.h. die seewärtige Verlagerung der bestehenden Küstenschutzlinie) und der Verteidigung (d.h. der Anpassung der bestehenden Küstenschutzlinie) einander gegenübergestellt.

Ein Beispiel eines geänderten Schutzkonzeptes zeigt die Abbildung 14. Hier wurden zur Reduzierung der Sturmflutwasserstände an den Deichen der Unterweser drei Sturmflutentlastungspolder am rechten Weserufer vorgesehen (v. LIEBERMAN u.a. 2000).

Mit Hilfe numerischer Simulationen wurde die Wirkung der örtlichen Lage der Polder, der Höhenlage der Schwelle der Polderöffnungen sowie der Breite der Öffnung untersucht. Vergleiche

Abb. 14: Lage der in der Unterweser untersuchten Sturmflutentlastungspolder



Quelle: v. Lieberman u.a. 2000

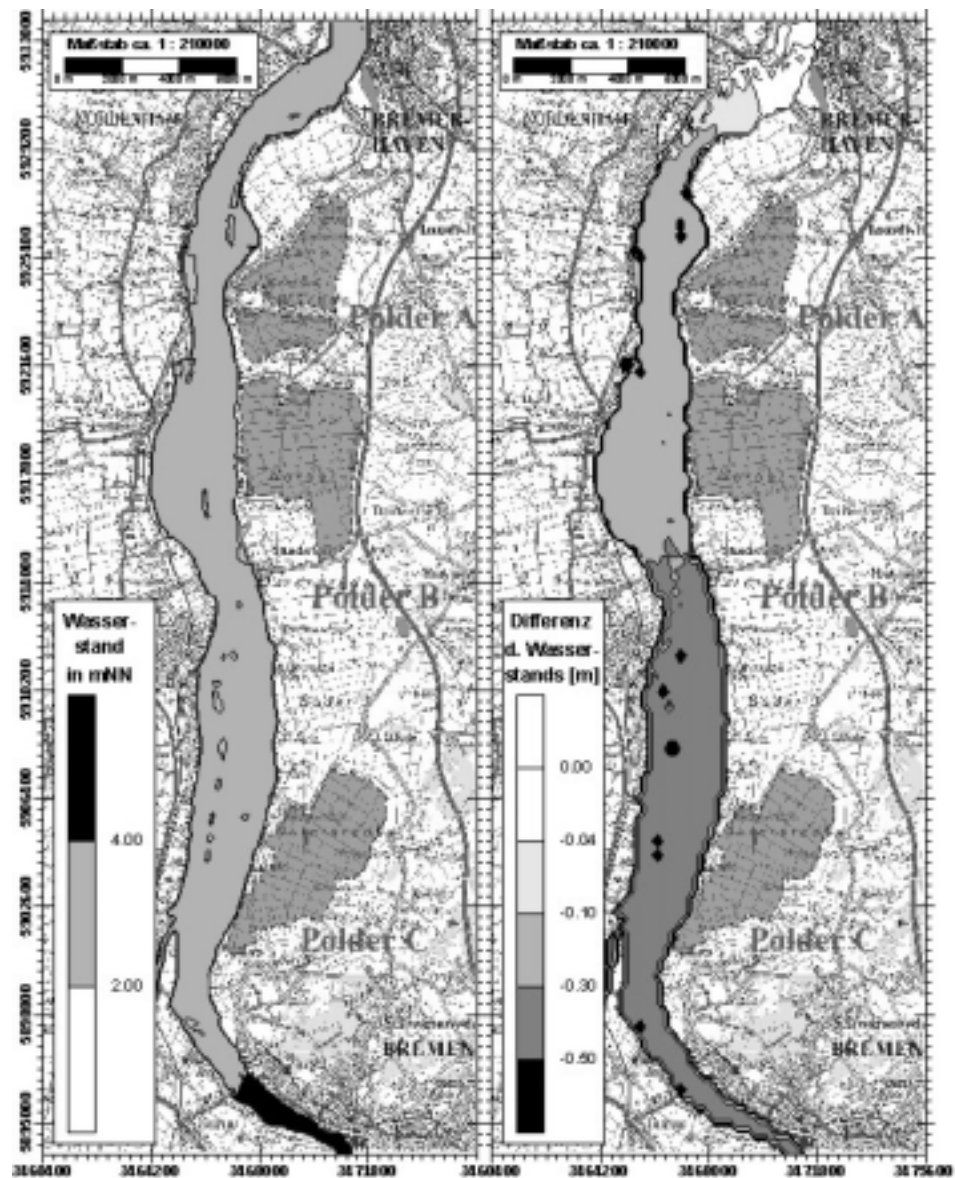
der Scheitelwasserstandsdifferenzen und deren zeitlichen Verläufe mit der des Ist-Zustandes ohne Polder verdeutlichen, daß durch die drei Überlaufpolder in der Unterweser im günstigsten Fall Wasserstandsabsenkungen von 60 cm und bei zwei aufeinanderfolgenden Sturmfluten von 40 cm bewirkt werden (Abb. 15).

Polderlösungen können z.B. im Fall klimatisch bedingter Wasserstandserhöhungen eine Küstenschutzmaßnahme zur Sicherung der im Hinterland gelegenen Siedlungen darstellen, falls

Küstenschutzmaßnahmen, wie Deicherhöhungen, z.B. aus bautechnischen Erwägungen, nicht realisiert werden können. Es ist damit auch in Zukunft möglich, den derzeitigen Sicherheitsstandard bezogen auf den Maßstab Risiko zu gewährleisten.

Eine weitere Alternative zum Schutz der Weserregion stellt der Bau eines Sturmflutsperrwerkes dar (KÖNIG u.a. 2000). Hier lassen sich verschiedene Sperrwerksstandorte hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit und ihrer risikomindern

Abb. 15: Maximaler Wasserstand und maximale Differenz der Scheitelwasserstände der Variante mit allen Poldern bei einer Überfallhöhe = 1,5 m und einer Öffnungsbreite = 500 m



den Wirkung vergleichen (Abb. 16). Es zeigt sich, daß die Anlage eines Sperrwerks bei Bremerhaven mit möglichst geringen Schließzeiten sowohl hinsichtlich der Umweltverträglichkeit als auch hinsichtlich der Risikominimierung eine optimale Lösung der drei Varianten darstellt. Durch die genannte Maßnahme verkürzt sich die im Untersuchungsgebiet vorhandene und zu unterhaltende Deichlinie um rd. 100 km. Den durch das Sperrwerk entstehenden Investitionskosten von rd. 250 Mio. EUR, welche über 80 Jahre abzuschreiben sind, steht eine Verminderung des Risikos von 2 Mio. EUR/a gegenüber, so daß volkswirtschaftlich ein derartiger Sperrwerksbau sich nicht begründen läßt.

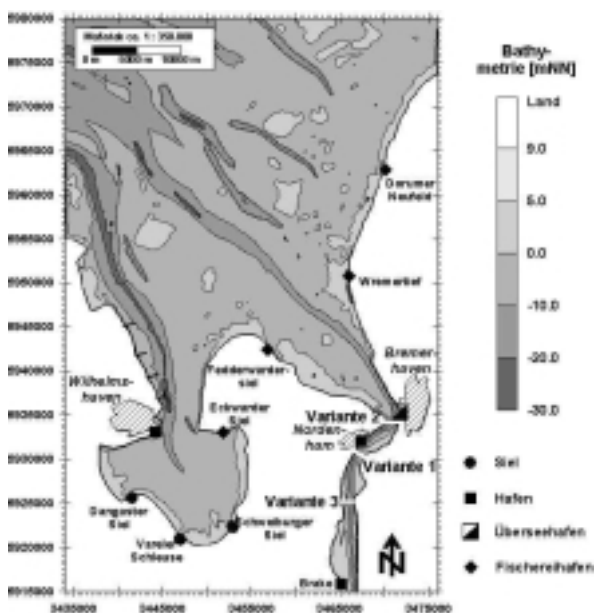
Neben dem Ausbau der Küstenschutzanlagen kann durch gezielte Flächennutzung Schadensvorsorge betrieben werden. So können auf der Basis der Risikoanalyse Vorrangflächen für in Planung befindliche Wohn- und Gewerbestandorte ermittelt und den einzelnen Flächen ein Sicherheitsstandard (z.B. die Wahrscheinlichkeit von Überflutung) zugewiesen werden. Dem Nutzer obliegt es dann, entweder das Schadenpotential durch zusätzlichen Objektschutz zu

reduzieren oder eine Versicherung gegen Sturmflut- und Hochwasserschäden abzuschließen. Zusammengefaßt beinhaltet die Schadensvorsorge eine Anpassung der Küstenschutzsysteme, eine gezielte Flächennutzung sowie Versicherungen (KRON 2000). Des weiteren bieten Katastrophenschutz und Warnsysteme eine ergänzende Möglichkeit zur Schadenvermeidung (HEISS 2000 / NAGUS im DIN 1996). Als Grundlage für eine Schadenvermeidung und -beurteilung stehen öffentlichen Interessenvertretern und staatlichen Entscheidungsträgern sowie der Versicherungswirtschaft die beschriebenen Informationen zu Küstenschutzanlagen und zur Flächennutzung in dem als Teil dieser Arbeit entwickelten Geographischen Informationssystem (BASIS, Abb. 6) zur Verfügung. Ebenso werden u.a. die o.g. Handlungsoptionen hinsichtlich verschiedener Zielvorstellungen dargestellt und damit transparent gemacht.

## 7. Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit zur Risikoanalyse von Hochwasserereignissen im Küstenraum liegt für die deutschen Küsten ein neuer Ansatz zur Beurteilung der Schadensituation vor. Sie ermöglicht eine verbesserte Einschätzung der Risiken durch die Versicherer von Elementarschäden. Anhand eines exemplarisch für den sturmflut- und hochwassergefährdeten Küstenraum „Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten“ entwickelten Informationssystems BASIS wird die Nutzbarkeit der Risikoanalyse bei Entscheidungsprozessen zur Vermeidung und Verminderung von Hochwasserschäden dargestellt und für einzelne konzeptionelle Küstenschutzmaßnahmen, wie die Anlage von Sturmflutentlastungspoldern oder eines Sturmflutsperrwerkes, erläutert. Die benutzerfreundliche Darstellung im Informationssystem fördert die Risikoperzeption der Bevölkerung und schafft Akzeptanz für organisatorische oder institutionelle Investitionen zur Verminderung des Sturmflutrisikos.

Abb. 16: Untersuchung verschiedener Sperrwerkstandorte in der Unterweser





## 8. Danksagung

Wir danken der Stiftung Umwelt und Schadensvorsorge der SV Gebäudeversicherung, Stuttgart, für die finanzielle Unterstützung zur Vorbereitung dieses Beitrags.

## 9. Literatur

Ausschuß für Küstenschutzwerke, Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, EAK, Die Küste, H. 55, 1993.

Bezirksregierung Weser-Ems, Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems, 1997.

Centre for Civil Engineering Research and Codes (CUR), Probabilistic Design of Flood Defences, Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW), Report 141, 1990.

Coastal Engineering Research Center (CERC), Shore Protection Manual (SPM), Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 4. Aufl., H. 1, Washington, 1984.

Göttle, A., Deindl, K., Rothmeier, F., Ausweisung von Überschwemmungsgebieten in Bayern, Internationales Symposium „Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft – Niederschlag und Abfluß“, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, H. 5, 1999.

Heiß, G., Katastrophenschutz, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000.

Jorissen, R. E., Coastal Flood-Risk Management in the Netherlands, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000.

König, G., Schuchardt, B., v. Lieberman, N., Zur Akzeptanz verschiedener langfristiger möglicher Küstenschutzstrategien an der Unterweser: Eindrücke aus dem Projekt Klimaänderung und Unterweserregion (KLIMU), 2000 (in Vorbereitung).

Kron, W., Auftreten und Versicherbarkeit von Elementarereignissen, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000.

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz, 1995.

Lastrup, C., Probabilistic Design for Coastal Defence in Denmark, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000.

v. Lieberman, N., Mai, S., Küstenschutz an der Unterweser vor dem Hintergrund von Naturraum und Nutzung, Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Heft 35, 1999a.

v. Lieberman, N., Mai, S., Sturmflutschutz des Natur- und Wirtschaftsraumes zwischen Jade und Weser - eine Beurteilung der Deichsicherheit, Tagungsband der 16. Jahrestagung des Arbeitskreis Meere und Küsten (AMK), Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, 1999b.

v. Lieberman, N., Mai, S., Risikopotenziale für Nutzflächen und Infrastruktur, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000a.

v. Lieberman, N., Mai, S., Applicability of Wave Models over Forelands, Proc. Int. Conf. Hydroinformatics, 2000b.

v. Lieberman, N., Mai, S., Ohle, N., Auswirkungen von Sturmflutentlastungspoldern an der Unterweser, 15. Deutscher Hydrographentag, Bremerhaven, 2000.

Mai, S., Zimmermann, C., Konzepte und Techniken im Küstenschutz im Land Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 84, 2000.

Mai, S., v. Lieberman, N., Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 1999.

Mai, S., v. Lieberman, N., Belastung der Seedeiche durch Wasserstände und Wellen, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000a.

Mai, S., v. Lieberman, N., Risk Assessment of Coastal Defences - An Application at German Tidal Inlets - Proc. of the International Symposium on Flood Defence, 2000b.

Mai, S., Ohle, N., Zimmermann, C.: Applicability of Wave Models in Shallow Coastal Waters, Proc. of the 5th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Cape Town, South Africa, 1999.



- Mai, S., v. Lieberman, N., Fittschen, T., Bartels, K.: See-  
gang in der Weser vor Bremerhaven - Ein Vergleich  
von Naturmessung und numerischer Simulation, HAN-  
SA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 2000 (im Druck).
- Mai, S., Zimmermann, C., Risk Analysis of Coastal Pro-  
tections at Tidal Coasts, Proc. of the 2nd Int. Conf. Port  
Development & Coastal Environment, PDCE, Varna,  
Bulgaria, 2000.
- Normenausschuß Grundlagen des Umweltschutzes (NA-  
GUS) (NAW) im DIN (Deutsches Institut für Nor-  
mung), Umweltmanagementsysteme – Spezifikation mit  
Anleitung zur Anwendung, DIN EN ISO 14001, Okto-  
ber 1996.
- Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN (Deut-  
sches Institut für Normung), Landwirtschaftlicher Was-  
serbau – Begriffe, Hochwasserschutz, Küstenschutz,  
Schöpfwerke, DIN 4047-2, November 1988.
- Oumeraci, H., Kohlhase, S., Kunz, H., Weiss, D.: Be-  
rechnungsansätze für Wellenauflauf und Wellenüberlauf  
an Seedeichen, HTG und DGGT Sprechtag, 18.11.1999.
- Plate, E.J., Risikoanalyse im Hochwasser- und Küsten-  
schutz, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasser-  
bau und Küsteningenieurwesen der Universität Hanno-  
ver, H. 85, 2000.
- Reeve, D.E., Coastal Flood Risk Assessment, Journal of  
Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, No. 5,  
1998.
- Schmidtke, R.F., Sozio-ökonomische Schäden von  
Hochwasserkatastrophen, Darmstädter Wasserbau-  
Mitteilungen, H. 40, 1995.
- Zimmermann, C., Mai, S., Analyse von Küstenschutzsys-  
temen unter Risikoaspekten, HANSA-Schiffahrt-  
Schiffbau-Hafen, Nr. 6, 1998.