

**BELASTUNG DER SEEDEICHE
DURCH WASSERSTÄNDE UND WELLEN**

***LOADS ON DIKES
FROM WATER-LEVELS AND WAVES***

von
Stephan MAI
Nicole VON LIEBERMAN

ABSTRACT

Wave overtopping is the decisive failure mechanism of sea dikes at the German coasts and therefore it is design criterion. It is the result of tidal high water-levels and waves. These loads are presented for the coastline at the estuary of the rivers Jade and Weser and are used for an assessment of coastal safety within the framework of a probabilistic design. The recurrence interval being calculated to 1000 years for today's situation is the basis of a risk analysis presented by v. LIEBERMAN & MAI (2000).

ZUSAMMENFASSUNG

Der Wellenüberlauf stellt für die Haupt- bzw. Landesschutzdeiche der deutschen Küsten das maßgebende Versagens- und damit Bemessungsereignis dar. Dieser ergibt sich aus den Belastungen durch den Tidehochwasserstand und den Seegang. Für einen Küstenabschnitt am Jade-Weser-Ästuar werden diese Belastungen dargestellt und als Grundlage zur Beurteilung der Deichsicherheit auf der Basis einer probabilistischen Bemessung verwendet. Die für den heutigen Zustand ermittelte Wiederkehrzeit eines Deichversagens von 1000 Jahren stellt die Grundlage der durch v. LIEBERMAN & MAI (2000) dargestellten Risikoanalyse dar.

I N H A L T

1	PROBLEMSTELLUNG	30
2	VORGEHEN UND METHODE	31
3	ERMITTLUNG DER BELASTUNGEN	33
4	BEURTEILUNG DER SICHERHEIT	34
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	37
6	SCHRIFTTUM	37

1 Problemstellung

Deiche stellen an der deutschen Küste die vorherrschenden Küstenschutzelemente dar. Die Bemessung der Deiche ist im wesentlichen auf den Versagensfall des Wellenüberlaufs, welcher z.B. während der Sturmflutkatastrophen 1953 in den Niederlanden (ROELSE & BAKKAR, 1986) und 1962 in Deutschland (STARKE, 2000) die wesentliche Schadensursache war, ausgerichtet. Ihre Bemessung erfolgt in Niedersachsen nach dem Einzelwert- (AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993) und in Schleswig-Holstein nach einer Verfahrenskombination von statischem Verfahren, Vergleichswertverfahren und Einzelwertverfahren (PROBST, 2000). Bei Einzelwert- und Vergleichswertverfahren handelt es sich um rein deterministische Verfahren, während das statistische Verfahren in geringem Maße darüber hinausgeht und mit einer probabilistischen Bemessung der Stufe 1 vergleichbar ist (CUR, 1990). Die genannten Verfahren lassen jedoch keine Ermittlung der Wiederkehrzeit des Deichversagens zu, wie sie heute u.a. im Hochwasserschutz gefordert wird (WIEDEMANN, 2000). Die Ermittlung von Wiederkehrzeiten ist mit der probabilistischen Bemessung der Stufen 2 und 3 möglich (CUR, 1990). Für die Bewertung und Planung heutiger Küstenschutzmaßnahmen sollte jedoch das Risikomanagement (probabilistische Bemessung der Stufe 4) gewählt werden (PLATE, 2000).

Für das in Abbildung 1 dargestellte Untersuchungsgebiet an dem Jade- und Weser-Ästuar, dessen Küstenschutzsystem in v. LIEBERMAN & MAI (1999) und MAI & v. LIEBERMAN (2000) dargestellt ist, wurde im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Forschungsprojektes „Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung“ die Sicherheit vorhandener Küstenschutzsysteme mit Hilfe eines probabilistischen Verfahrens der Stufe 4 bewertet (MAI & v. LIEBERMAN, 1999). Die probabilistische Bemessung der Stufe 4 bzw. Risikoanalyse läßt sich in Gefährdungsermittlung, Risikobestimmung und Risikominderung/ -akzeptanz untergliedern (PLATE, 2000). Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Gefährdungsermittlung in eine statistische Beschreibung der auf das Schutzsystem wirkenden hydrologischen und meteorologischen Belastungen, eine Darstellung der dominanten Versagensmechanismen und die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit von Versagen untergliedert. Die Risikobestimmung beinhaltet die Quantifizierung der Folgeschäden bei Versagen sowie die Risikoberechnung als Produkt von Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschäden. Abbildung 2 stellt dieses Schema der Risikoanalyse im Überblick dar.

Inhalt dieses Beitrages, welcher auch Ergebnisse des vom Niedersächsischen Umweltministerium geförderten Projektes „Konzepte und Techniken im Küstenschutz im Land Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen“ (MAI, 1999) einbezieht, ist die Gefährdungsermittlung, während die Risikobestimmung in v. LIEBERMAN & MAI (2000) behandelt wird. Im Rahmen der Gefährdungsermittlung erfolgt neben der Beurteilung des derzeitigen Sicherheitsstandards der Küstenschutzsysteme auch eine Prüfung für den Fall eines, z.B. durch Klimaänderung bedingten, Wasser-

standsanstiegs (MAI ET AL., 1997a) oder einer Verstärkung der Winde (MAI & ZIMMERMANN, 2000).

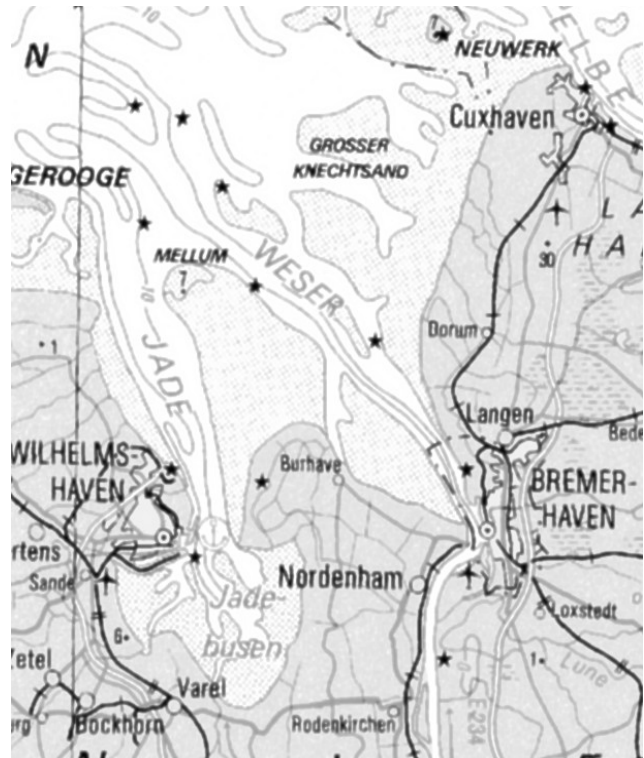


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet an Jade und Weser (aus LGN, 1998)
Area under Investigation

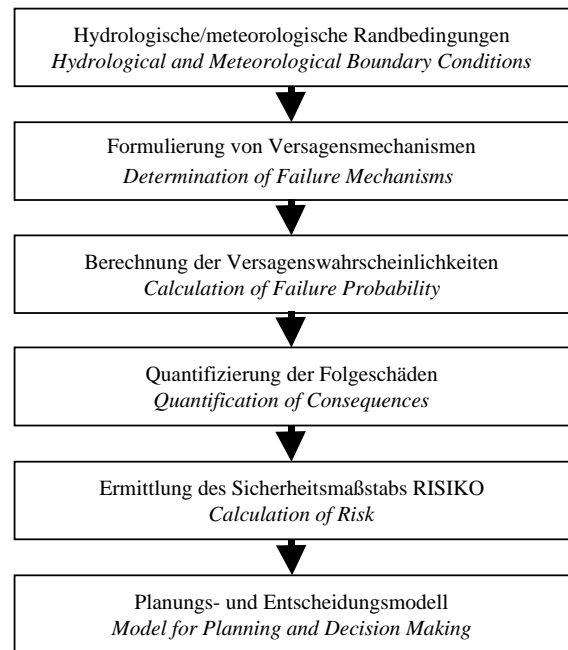


Abb. 2: Ablauf der Risikoanalyse
Approach and Method of a Risk Analysis

2 Vorgehen und Methode

Die Prüfung des Küstenschutzsystems auf ein mögliches Versagen läßt sich für die verschiedenen Versagensmechanismen auf einen Vergleich der von den Bauwerkseigenschaften abhängigen Belastbarkeit mit der Belastung zurückführen (PLATE, 2000). Dies erfolgt im allgemeinen durch Definition einer Zuverlässigkeitsfunktion (*reliability function*) bzw. einer Grenzzustandsgleichung (*limit state function*):

$$Z(\bar{u}, \bar{v}) = R(\bar{u}) - S(\bar{v}) \quad (1)$$

mit

$Z(\bar{u}, \bar{v})$: Zuverlässigkeitsfunktion

$R(\bar{u})$: Belastbarkeit, Fkt. der Bauwerkseigenschaften \bar{u}

$S(\bar{v})$: Belastung, Fkt. der Umweltbedingungen \bar{v}

Im Falle des Versagens wird die Zuverlässigkeitsfunktion negativ, d.h. $Z(\bar{u}, \bar{v}) < 0$. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens $p_{Z<0}$ ergibt sich daher gemäß:

$$p_{Z<0} = \int \dots \int_{Z<0} p_{\bar{u}, \bar{v}}(\bar{u}, \bar{v}) d\bar{u} d\bar{v} \quad (2)$$

mit

$p_{\bar{u}, \bar{v}}(\bar{u}, \bar{v})$: Wahrscheinlichkeitsdichte für jede

Kombination von Belastung und Belastbarkeit.

Küstenschutzsysteme mit Hauptdeich als wesentlichem Schutzelement weisen Versagensformen von Erosion der Außenböschung bis Schiffsstoß auf (v. LIEBERMAN & MAI, 1999). Die zugehörigen Zuverlässigkeitsfunktionen wurden teilweise durch das CUR / TAW (1990) entwickelt. Der wesentliche Versagensmechanismus ist jedoch, wie historische Sturmfluten zeigen, der Wellenüberlauf (s.o.). Dieser Versagensmechanismus wird daher (auch bei der traditionellen) Deichbemessung in Deutschland (AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993), den Niederlanden (JORISSEN, 2000) und Dänemark (LAUSTRUP, 2000) zugrunde gelegt. Seine Beschreibung erfolgt entweder auf der Basis des Wellenaufbaus (CUR, 1990)

$$Z = h_D - Thw - R_{98\%} \quad (3)$$

$$R_{98\%} = 0.75 \cdot \gamma \cdot \frac{1}{n_D} \sqrt{g \cdot H_s} \cdot T_m \quad (4)$$

oder auf der Basis der Wellenüberlaufmenge (REEVE, 1998)

$$Z = Q_{tol} - Q_{mean} \quad (5)$$

$$Q_{mean} = \gamma_{m,1} \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot e^{-\frac{1}{\gamma_{m,2}} \cdot \frac{(h_D - Thw)}{H_s}} \quad (6)$$

mit

h_D : Deichhöhe

Thw : Tidehochwasserstand

$R_{98\%}$: Wellenaufbau

γ : dimensionsloser Parameter

$1/n_D$: Deichneigung

g : Erdbeschleunigung

H_s : signifikante Wellenhöhe

T_m : mittlere Wellenperiode

Q_{tol} : zulässige mittlere Wellenüberlaufmenge

$\gamma_{m,1}$: dimensionsloser Parameter

$\gamma_{m,2}$: dimensionsloser Parameter

Die zulässige mittlere Überlaufmenge Q_{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 (siehe Abb. 3). 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 Gl. 3 läßt ebenfalls einen Wellenüberlauf zu, da 2% der Wellen die nach Gl. 4 berechnete Aufbaufhöhe 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 Gl. 5 ggf. der maximale Wellenüberlauf einzusetzen (MAI & ZIMMERMANN, 2000). Für diesen fehlen jedoch Angaben einer zulässigen Überlaufmenge. Die weitere Analyse erfolgt auf der Basis des Wellenüberlaufs.

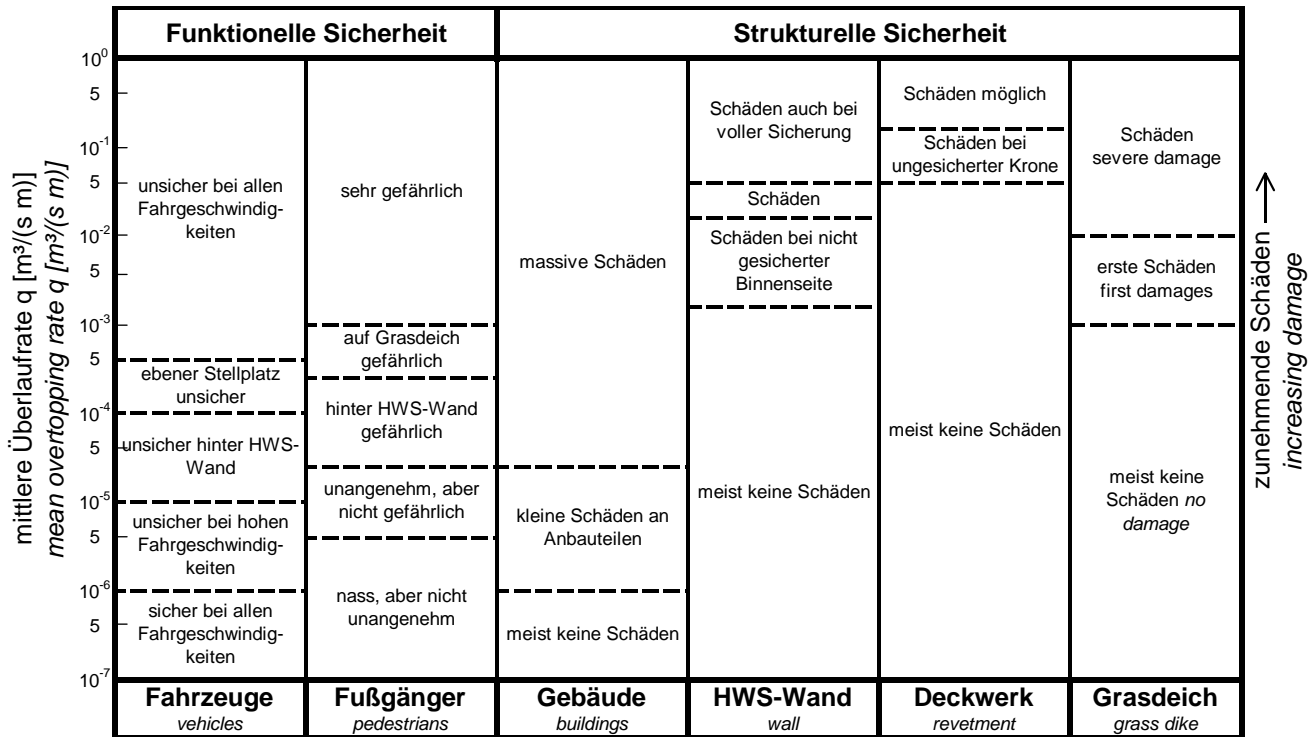


Abb. 3: Sicherheit bei Wellenüberlauf in Abhängigkeit von der mittleren Überlauftrate (OUMERACI ET AL., 1999)
Safety in case of Wave Overtopping as a Function of Overtopping Rate

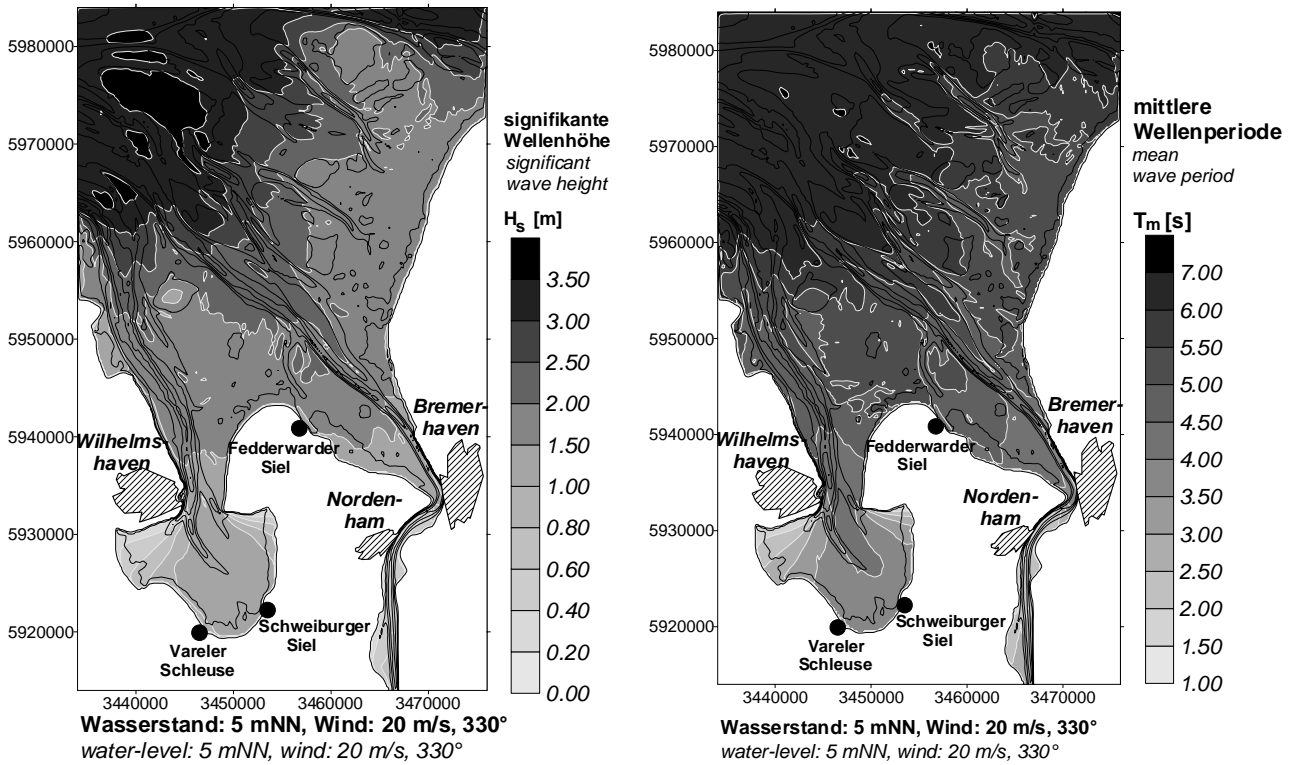


Abb. 4: Seegangsausbreitung im Weser-Jade-Ästuar – numerische Simulation mit SWAN (Mai, 2000); links: signifikante Wellenhöhe, rechts: mittlere Wellenperiode
Wave Propagation within the Estuaries Jade and Weser; left: Significant Wave Height, right: Mean Wave Period

3 Ermittlung der Belastungen

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit nach Gl. 2 ist insbesondere die Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsdichte der Umweltparameter am Deichfuß – Tidehochwasserstand Thw , signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenhöhe – erforderlich. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Bauwerksparameter wird vereinfachend als Dirac'sche δ -Funktion angenommen.

Zur Ableitung der Wahrscheinlichkeitsdichte stehen für Tidehochwasserstand Thw 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 SEESCHIFFAHRT UND HYDROGRAPHIE BSH mit dem EUROPEAN-SHELF-MODEL zeigen, eine akzeptable Näherung dar (MAI & ZIMMERMANN, 2000a). 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 ET AL., 2000) erfolgt und durch physikalische Versuche im GROßEN WELLENKANAL GWK für küstennahe Schutzelemente, wie Sommerdeiche (MAI ET AL., 1999) oder Vorländer (V. LIEBERMAN & MAI, 2000a), ergänzt worden. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel der Seegangausbreitung im Modellgebiet bei Nord-West-Sturm. Es ist deutlich die starke Abnahme des signifikanten Wellenhöhe des Seegangs über den Wattgebieten vor der Wurster Küste und vor Butjadingen erkennbar, während in den Fahrwassern der Jade und Weser der Seegang höher einläuft (Abb. 4, rechts). Ähnliches gilt auch für die mittlere Wellenperiode (Abb. 4, links).

Die Wahrscheinlichkeitsdichte von Tidehochwasserstand und Wind ist in Abb. 5 bzw. Abb. 6 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeit und -richtung ist entsprechend der Gl. 7 aus langjährigen meteorologischen Beobachtungen bestimmt worden.

$$p(\alpha_{Wind}, u_{Wind}) = p(\alpha_{Wind}) \cdot p(u_{Wind} | \alpha_{Wind}) \quad (7)$$

Für extreme Windgeschwindigkeiten ist die Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeit unter Voraussetzung des Vorliegens einer Weibull-Verteilung extrapoliert worden.

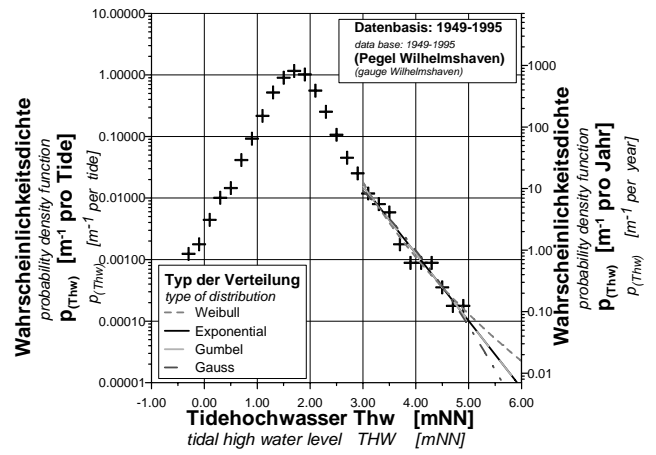


Abb. 5: Wahrscheinlichkeitsdichte der Thw und ihre Extrapolation für Extremwasserstände
Statistics of Tidal High Water-Levels

Es gilt dann:

$$p(u_{wind} | \alpha_{Wind}) = \dots$$

$$\dots = \frac{k_{\alpha}}{A_{\alpha}} \left(\frac{u_{wind}}{A_{\alpha}} \right)^{k_{\alpha}-1} \exp \left(- \left(\frac{u_{wind}}{A_{\alpha}} \right)^{k_{\alpha}} \right) \quad (8)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte des Tidehochwasserstandes ist hier 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 Jährlichkeit deutlich wird (Tab. 1).

Mögliche Lösungsansätze zur Verbesserung der Extrapolation sind in JENSEN (2000) diskutiert.

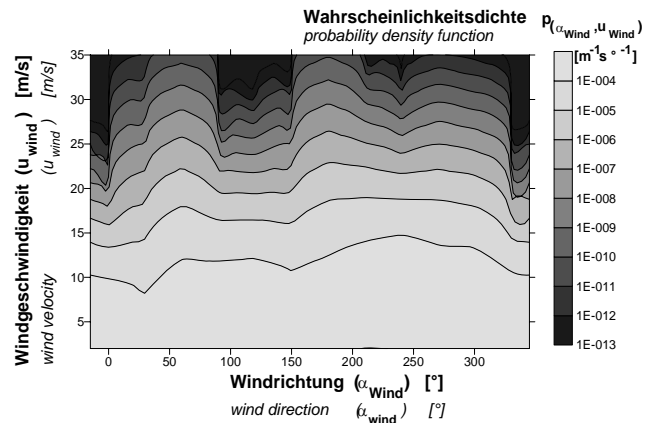


Abb. 6: Wahrscheinlichkeitsdichte von Windrichtung und -geschwindigkeit (MAI ET AL., 1997)
Statistics of Wind Direction and Wind Speed

Jährlichkeit (Jahre)	Typ der Verteilung der Thw			
	Gauss	Gumbel	Weibull	Exponential
100	5.17 mNN	5.41 mNN	6.04 mNN	5.41 mNN
1000	5.82 mNN	6.32 mNN	7.75 mNN	6.33 mNN

Tab. 1: Tidehochwasserstand für verschiedene Verteilungsfunktionen und Jährlichkeiten (MAI & ZIMMERMANN, 2000)

High Water-Level for Various Statistical Distributions

Durch Auswertung der Seegangssimulationen für verschiedene Bedingungen von Thw und Wind (Abb. 4) ergibt sich in Verbindung mit der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung von Wasserstand und Wind (Abb. 5 und 6) für jede Position innerhalb des Untersuchungsgebietes die Seegangsstatistik. Für ausgewählte Positionen im Untersuchungsgebiet sind in Abb. 7 die aus der Seegangsstatistik abgeleiteten signifikanten Wellenhöhen gegenüber ihrer Jährlichkeit aufgetragen, z.B. beträgt die signifikante Wellenhöhe mit einer Jährlichkeit von 1000 Jahren am nördlichen Modellrand etwa 3,8 m, jedoch über dem Vorland der nördlichen Küste Butjadingens nur 0,9 m.

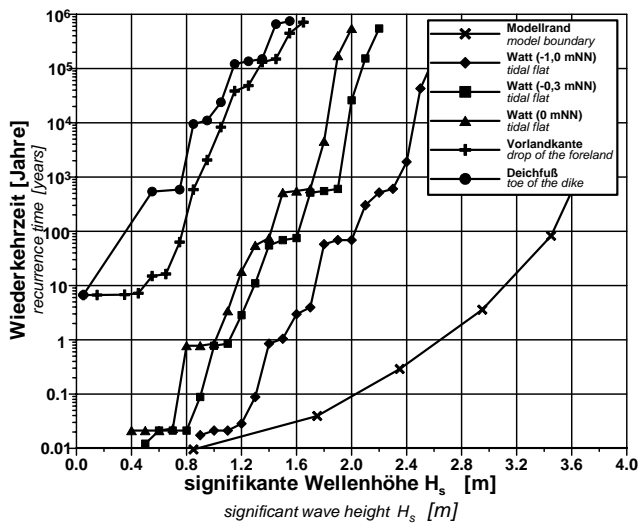


Abb. 7: Wiederkehrzeit der signifikanten Wellenhöhe an verschiedenen Positionen im Modellgebiet

Recurrence Interval of Significant Wave Height

Neben der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für den heutigen Belastungszustand ist auch eine Beurteilung des Einflusses von z.B. im Zusammenhang von Klimaänderung geänderten Belastungen auf die Sicherheit des Küstenschutzsystems möglich. Dazu ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung $p_{\vec{u},\vec{v}}(\vec{u},\vec{v})$ im Bezug auf die Umweltparameter zu ändern. Abb. 8 und 9 zeigen mögliche Szenarien einer Erhöhung des Tidehochwasserstands und einer Intensivierung der Winde. Innerhalb der nächsten 100 Jahre scheint nach dem heutigen Stand der Klimafor-

schung ein Anstieg des MThw von 50 cm und eine Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit von 3,8 % zu erwarten.

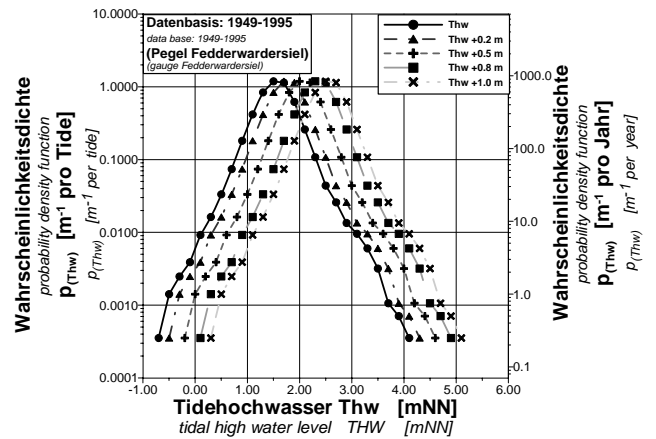


Abb. 8: Szenarien der Wahrscheinlichkeitsdichte der Thw bei Klimaänderung

Scenarios of Water-Level Statistics in Case of Climate Change

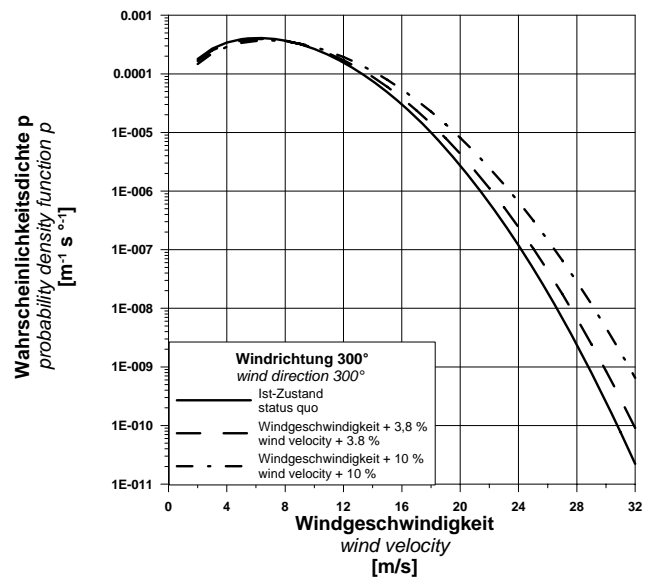


Abb. 9: Szenarien der Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeit bei Klimaänderung

Scenarios of Wind Statistics in Case of Climate Change

4 Beurteilung der Sicherheit

Aus den in Kapitel 3 dargestellten Belastungen des Küstenschutzsystems ergibt sich nach Gl. 2 die Versagenswahrscheinlichkeit, d.h. Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs 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 Planzustandes für das Modellgebiet findet sich z.B. in dem im FRANZIUS-

INSTITUT entwickelten auf der Hypertext Mark-Up Language (HTML) basierenden Kataster der Küstenschutzbauwerke (MAI & v. LIEBERMAN, 2000) oder in dem am FRANZIUS-INSTITUT aufgebauten, auf der Anwendung ARCVIEW basierenden geographischen Informationssystem BASIS (BAUWERKS- UND SEEGANGSINFORMATIONSSYSTEM) (MAI & v. LIEBERMAN, 2000a). Für den in Abb. 10 dargestellten Deichabschnitt sind in Abb. 11 (unten) die vorhandenen und geplanten Deichhöhen den genannten Informationssystemen entnommen. In Abb. 11 (oben) wird den einzelnen Profilen P1 bis P5 für die heutigen Deichhöhen die Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs zu geordnet. Diese beträgt zur Zeit entlang des gesamten Deichabschnitts etwa 1000 Jahre. Im Vergleich dazu weisen benachbarte niedersächsische Deichabschnitte Wiederkehrzeiten von 400 Jahre bis 8000 Jahre (Norder Land) bzw. von 400 Jahre bis 3000 Jahre (Wanger Land) bzw. von 500 Jahre bis 6000 Jahre (Land Wursten) auf (MAI, 2000). LAUSTRUP (2000) gibt für die dänischen Nordsee-Deiche eine Wiederkehrzeit von 200 Jahren an und JORISSEN (2000) für die niederländischen Deiche eine Wiederkehrzeit von 4000 bis 10000 Jahren an.

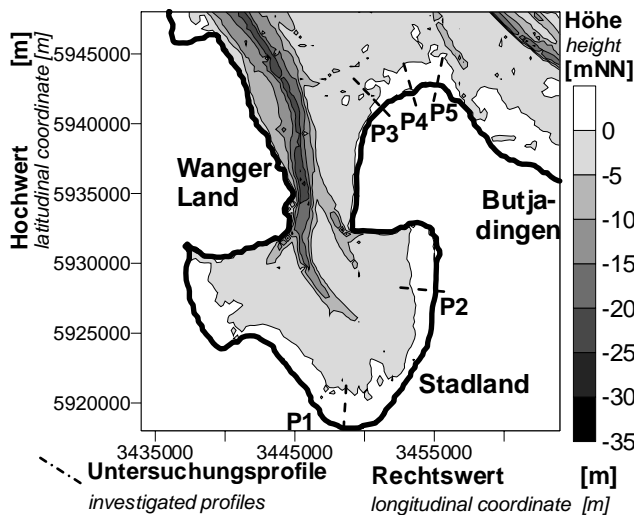


Abb. 10: Deichstrecke am Jadebusen und zur Ermittlung der Sicherheit ausgewählte Deichprofile
Investigated Dike Profiles within the Model Area

Es ist jedoch festzustellen, daß die großen Abweichungen der Wiederkehrzeiten des Wellenüberlaufs an den Deichen der genannten Nordseeanrainerstaaten teilweise auf kleine Unterschiede in den Berechnungsverfahren zurückzuführen sind.

Die in Abb. 11 dargestellten Wiederkehrintervalle des Wellenüberlaufs weisen intrinsische Unsicherheiten, Modellunsicherheiten und statistische Unsicherheiten auf (VAN GELDER, 2000).

Diese können sämtlich in das probabilistische Berechnungsverfahren einbezogen werden, was jedoch den Berechnungsaufwand erheblich vergrößert (JORISSEN, 2000). Ein Beispiel der statistischen Unsicherheit stellt die in Abb. 5 dargestellte Auswahl der Verteilungsfunktion zur Extrapolation der Wahrscheinlichkeitsdichte der Thw dar. Für das

Profil P2 (siehe Abb. 10) sind für die verschiedenen in Kapitel 3 genannten Verteilungen der Thw die Wiederkehrintervalle des Wellenüberlaufs berechnet worden (Abb. 12). Für den heutigen Zustand, d.h. kein Anstieg des MThw, schwanken die Wiederkehrintervalle von 500 Jahren bei Annahme der Weibull-Verteilung bis 4000 Jahren bei Annahme der Normalverteilung (Gauss-Verteilung). Die Unsicherheit bei der Bestimmung des Wiederkehrintervalls nimmt bei geringeren Wiederkehrintervallen, wie sie z.B. Folge eines Anstiegs des MThw sind, ab. So beträgt bei einem Anstieg des MThw um 1 m das Wiederkehrintervall 60 Jahre bei Voraussetzung der Weibull-Verteilung, 70 Jahre bei Exponential- und Gumbel-Verteilung und 80 Jahre bei Normalverteilung.

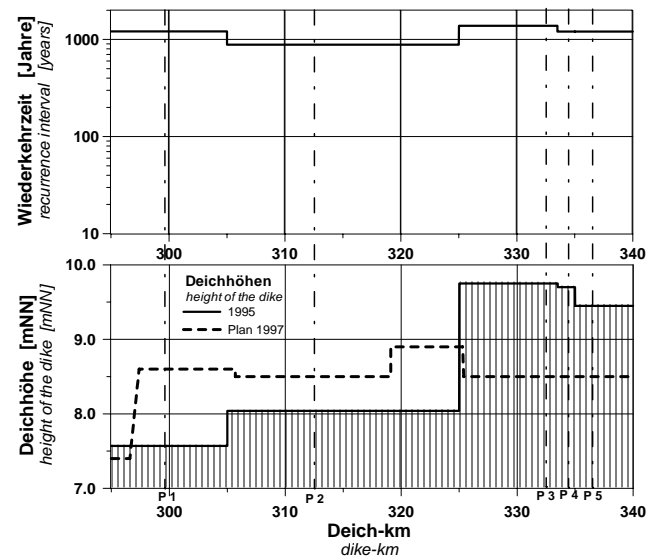


Abb. 11: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs am Hauptdeich und Höhe der Deichstrecke P1 – P5 (Ist- Zustand)

Recurrence Interval of Wave Overtopping at the Dike

Für den gesamten, in Abb. 10 dargestellten Deichabschnitt ist in Abb. 11 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.

Die in Abb. 9 dargestellte Erhöhung der Windgeschwindigkeit führt zu der in Abb. 14 dargestellten Abnahme des Wiederkehrintervalls des Wellenüberlaufs. Im Vergleich zu der als Folge von Klimaänderungen zu erwartenden Erhöhung der Thw kommt einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit in Bezug auf die Sicherheit des Küstenschutzsystems nur geringe Bedeutung zu. Erhöhen sich sowohl Thw um 1 m als auch Windgeschwindigkeit um 10 % so ergibt sich die in Abb. 15 dargestellte Sicherheit der Deiche Butjadingens.

Die Abhängigkeit des Wiederkehrintervalls des Wellenüberlaufs von der Deichhöhe ist in Abb. 16 dargestellt. Es ergibt sich näherungsweise eine exponentielle Abnahme des Wiederkehrintervalls mit der Deichhöhe, was wesentlich

auf die Form der Statistik der Thw zurückzuführen ist. Abb. 16 verdeutlicht auch die Anwendungsmöglichkeit des probabilistischen Bemessungsverfahrens zur Festlegung der Deichhöhe. Hierzu wäre zunächst die gesellschaftlich angestrebte Sicherheit, d.h. das Wiederkehrintervall des Wellenüberlaufs, festzulegen, um dann aus Abb. 16 die erforderliche Deichhöhe zu bestimmen.

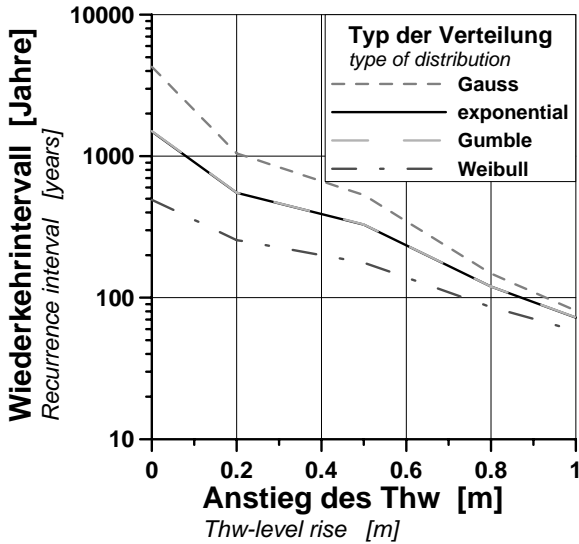


Abb. 12: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs für verschiedene statistische Verteilungen des Thw (MAI & ZIMMERMANN, 2000)

Recurrence Interval of Wave Overtopping for different Statistical Distributions of Tidal High Water-Level

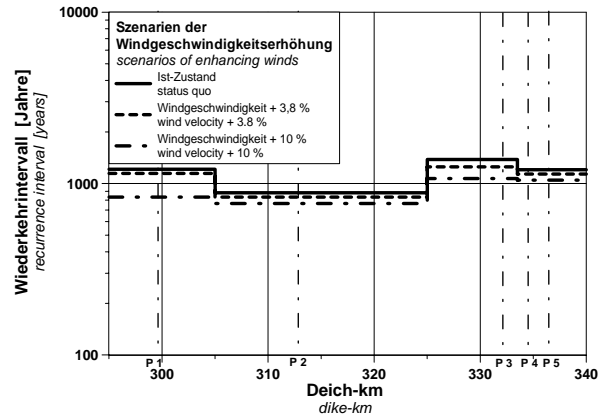


Abb. 14: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs für verschiedene Szenarien der Verstärkung des Windes (MAI & ZIMMERMANN, 2000)

Recurrence Interval of Wave Overtopping for different Scenarios of the Enhancement of Wind

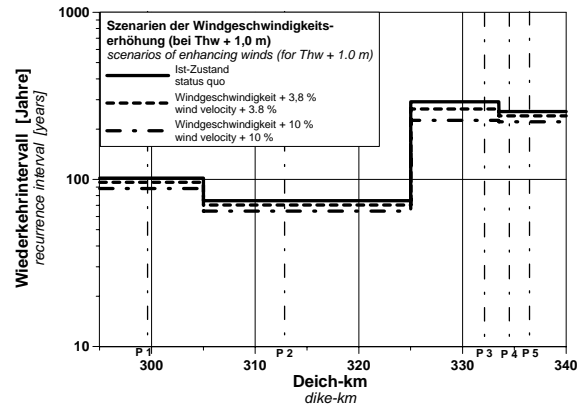


Abb. 15: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs für verschiedene Szenarien der Verstärkung des Windes bei gleichzeitigem Wasserstandsanstiegs von 1 m

Recurrence Interval of Wave Overtopping for different Scenarios of the Enhancement of Wind and a Water-Level Rise of 1 m

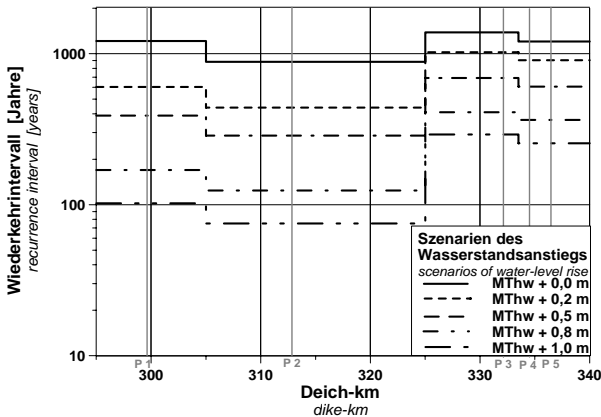


Abb. 13: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs für verschiedene Szenarien des Wasserstandsanstiegs (MAI & ZIMMERMANN, 2000)

Recurrence Interval of Wave Overtopping for different Scenarios of Water-Level Rise

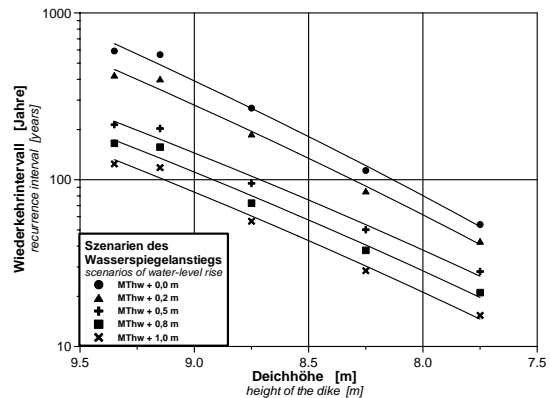


Abb. 16: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs als Funktion der Deichhöhe

Recurrence Interval of Wave Overtopping as a Function of the Height of the Dike

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die probabilistische Bemessung eröffnet die Möglichkeit einer im Vergleich zu den heutigen, in Deutschland verwendeten Bemessungsverfahren ausgewogeneren Bemessung der Küstenschutzsysteme, wie in diesem Beitrag beispielhaft für den Hauptdeich als wesentliches Küstenschutzelement dargestellt wird. Sie stellt einen wesentlichen Schritt zu Vereinheitlichung der deutschen Bemessungsverfahren von Küstenschutzanlagen mit denen unserer Nachbarstaaten dar und ermöglicht eine Beurteilung der Konsequenzen von Klimaänderungen auf die Sicherheit von Küstenschutzanlagen. Dennoch verbleiben auch nach Einführung probabilistischer Bemessungsverfahren eine Vielzahl von Unsicherheiten bei der Bemessung, deren Einbeziehung in laufenden Forschungsprojekten am FRANZIUS-INSTITUT erarbeitet wird.

6 Schrifttum

- 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.
- CERC: SHORE PROTECTION MANUAL, 1984
- JENSEN, J.: Extremereignisse an Nord- und Ostseeküsten – Ermittlung von Bemessungsereignissen, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).
- JORISSEN, R. E.: Coastal Flood-Risk Management in the Netherlands, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).
- LANDESVERMESSUNG UND GEOINFORMATION NIEDERSACHSEN (LGN): TOPOGRAPHISCHE KARTEN NIEDERSACHSEN, TOP 50, 1998.
- LAUSTRUP, C.: Probabilistic Design for Coastal Defence in Denmark, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).
- MAI, S.: Konzepte und Techniken im Küstenschutz im Land Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 84, 2000.
- 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., SCHWARZE, H., ZIMMERMANN, C.: Safety of Coastal Defense Systems - An Assessment of the Reliability of Coastal Systems in the Event of Rising Water Levels due to Climate Change, Proc. of the 1-st Int. Conf. PORT COAST ENVIRONMENT, Varna, Bulgaria, 111-120, 1997.
- MAI, S., SCHWARZE, H., ZIMMERMANN, C.: Safety Variation of Coastal Defense Systems, Proc. of the 2-nd Indian National Conference on Harbor and Ocean Engineering (INCHOE), Trivandrum, India, 1226-1235, 1997a.
- MAI, S., v. LIEBERMAN, N.: Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 1999.
- MAI, S., v. LIEBERMAN, N.: Internet-based Tools for Risk Assessment for Coastal Areas, Proc. of the 4th Int. Conf. on Hydroinformatics, Iowa, USA, 2000.
- MAI, S., v. LIEBERMAN, N.: Sturmflutgefährdung der Hafencity Bremerhafen – Eine Risikoanalyse, Tagungsband der 18. Jahrestagung des Arbeitskreis Meere und Küsten (AMK), Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, 2000a (im Druck).
- MAI, S., v. LIEBERMAN, N., FITTSCHEN, T., BARTELS, K.: See-gang in der Weser vor Bremerhaven - Ein Vergleich von Naturmessung und numerischer Simulation, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 2000 (im Druck).
- MAI, S., ZIMMERMANN, C.: Risk Analysis of Coastal Protections at Tidal Coasts, Proc. of the 2nd Int. Conf. Port Development & Coastal Environment, PDCE, Varna, Bulgaria, 2000.
- MAI, S., ZIMMERMANN, C.: Wave Load and Wave Overtopping, Proc. of the 2nd Int. Conf. Port Development & Coastal Environment, PDCE, Varna, Bulgaria, 2000a.
- OUERACI, H., KOHLHASE, S., KUNZ, H., WEISS, D.: Berechnungsansätze für Wellenauflauf und Wellenüberlauf an Seedeichen, HTG und DGGT Sprechtag, 18.11.1999.
- PLATE, E.J.: Risikoanalyse im Hochwasser- und Küstenschutz, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).
- PROBST, B.: Generalplanungen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).
- REEVE, D.E.: Coastal Flood Risk Assessment, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, No. 5, 1998.
- ROELSE, P., BAKKAR, W. T.: Statistical Investigations on Dike Failure, Proc. of Int. Conf. on Coastal Engineering, 1986.
- STARKE, W.-D.: Schäden und Vorsorgemöglichkeiten im Küsten- und Deichschutz, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).

- VAN DER MEER, J.W., JANSSEN, J.P.F.M.: Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments, Delft Hydraulics Publications, no. 485, Delft, Netherlands, 1994
- van Gelder, P.H.A.J.M.: Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft, Netherlands, No. 00-1, 2000
- 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, 1999.
- V. LIEBERMAN, N., MAI, S.: Küstenschutz an der Unterweser vor dem Hintergrund von Naturraum und Nutzung, Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Heft 35, 1999.
- V. LIEBERMAN, N., MAI, S.: Risikopotential für Nutzflächen und Infrastruktur, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).
- V. LIEBERMAN, N., MAI, S.: Applicability of Wave Models over Forelands, Proc. Int. Conf. Hydroinformatics, 2000a.
- WIEDEMANN, M.: Rechtliche Grundlagen für Hochwasser- und Küstenschutz, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85, 2000 (diese Ausgabe).