

# Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten

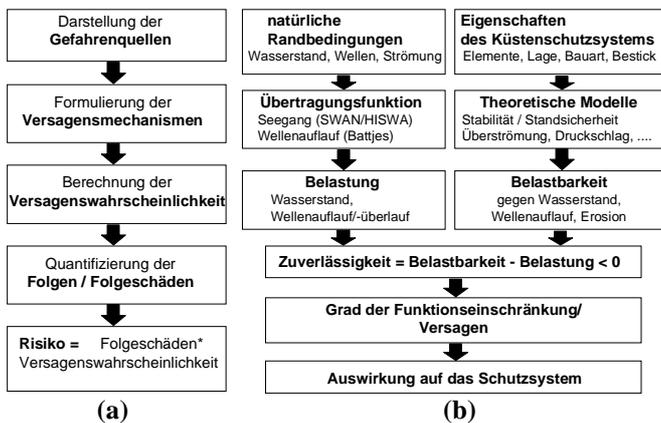
Prof. Dr.-Ing. Claus Zimmermann\*, Dipl.-Phys. Stephan Mai\*

**Die Sicherung von Küstengebieten erfolgt durch Systeme von Küstenschutzelementen, wie z.B. Lahnungen, Sommerdeiche, Vorländer, Hauptdeiche und Sperrwerke. Zur Beurteilung der Gefährdung von Küstengebieten durch Sturmfluten stehen neben dem bisher angewendeten Einzelwert- und Vergleichswertverfahren probabilistische Beurteilungsmethoden zur Verfügung. Diese ermöglichen die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Küstenschutzsystems und des Risikos - der mit den Folgen des Versagens gewichteten Versagenswahrscheinlichkeit - einer Küstenregion.**

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Küstenschutzsystems folgt aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten der hydrologischen Belastungsgrößen am seeseitigen Rand (Tidewasserstand, Seegang) und der Struktur des Schutzsystems. Die probabilistische Bemessung bietet damit die Möglichkeit, den Einfluß geänderter Randbedingungen, z.B. infolge eines steigenden Wasserspiegels, sowie einer geänderten Struktur des Küstenschutzsystems, z.B. bei Einsatz zusätzlicher Schutzelemente, auf die Sicherheit eines Küstenabschnittes zu ermitteln. Die Grundlagen der probabilistischen Analyse von Küstenschutzsystemen wird nachfolgend exemplarisch für die Nordseeküste Niedersachsens dargestellt.

## 1. Grundlagen der probabilistischen Analyse

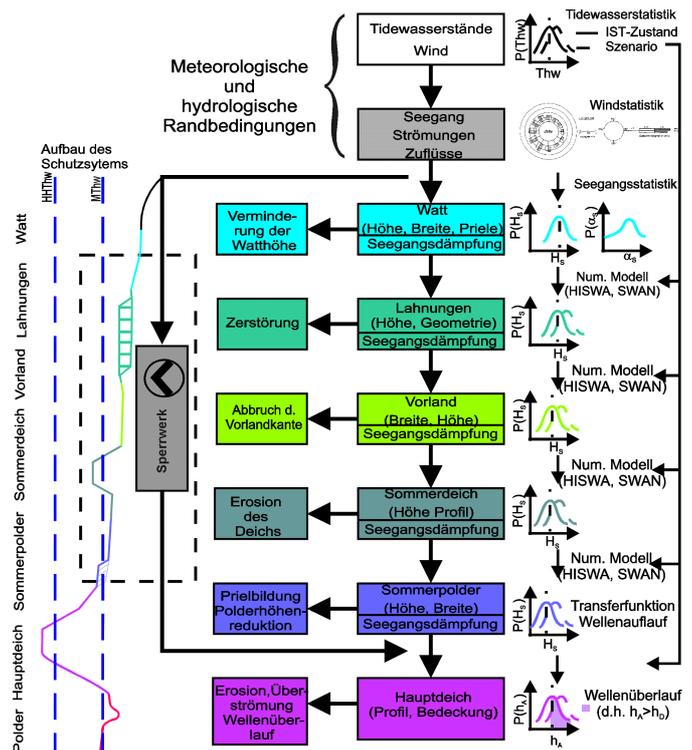
Probabilistische Bewertungsverfahren lassen sich in die in Abb. 1a dargestellten Teilaufgaben untergliedern [1].



**Abb. 1: Aufgaben der Risikoanalyse (a), Zuverlässigkeitsanalyse (b)**

Die Gefährdung der Küstenschutzsysteme resultiert aus den hydrologischen Randbedingungen, wie z.B. Wasserstand und Seegang. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Küstenschutzsysteme ergeben sich die maßgeblichen Versagensmechanismen. So wird bei dem derzeit verwendeten a-b-c-d-e-Verfahren zur Festlegung der Deichhöhe der Versagensmechanismus „Wellenüberlauf“ betrachtet und die Deichhöhe als Summe von MThw, maximaler Springerhöhung, maximalem Windstau, säkularem MThw-Anstieg und maximalem theoretischem Wellenauflauf bestimmt [2]. Die

mathematische Beschreibung der Versagensmechanismen erfolgt mit Hilfe sogenannter Zuverlässigkeitsfunktionen, die als Differenz von Belastbarkeit und Belastung des Küstenschutzsystems definiert sind (Abb. 1b). Die Belastung ergibt sich unter Verwendung numerischer Modelle, wie z.B. der Modelle HISWA [3] und SWAN [4] zur Seegangsberechnung, und theoretischer Zusammenhänge, wie z.B. Wellenauflaufformeln, aus den hydrologischen Randbedingungen. Die Belastbarkeit folgt aus der Struktur des Schutzsystems und seiner Elemente. Ein Versagen des Schutzsystems tritt für negative Zuverlässigkeiten ( $Z < 0$ ) ein. Aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Randbedingungen und der Systemparameter ist die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Versagens des Küstenschutzsystems bzw. einzelner Elemente möglich (Abb. 2, rechts). In Abhängigkeit vom Grad des Versagens, welcher umso größer ist, je größer der Betrag der Zuverlässigkeit ( $Z < 0$ ) ist, erfolgt eine Quantifizierung der auftretenden Folgen und Folgeschäden (Abb. 1a). Das Produkt von Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschäden wird als Risiko bezeichnet.



**Abb. 2: Küstenschutz als System**

Abb. 2 (links) zeigt beispielhaft den Aufbau von Küstenschutzsystemen im Ästuar aus den Elementen: 1. Watt, Vorland, Sommerdeich, -polder, Hauptdeich, 2. Sperrwerk, Hauptdeich. Die vor dem Hauptdeich angeordneten Schutzelemente führen zu einer Verminderung der Belastungen (Abb. 2, Mitte). Dieses wird durch veränderte Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Belastungsparameter beschrieben (Abb 2., rechts).

\* Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover

Bei der Approximation der realen Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch Normalverteilungen und Linearisierung der Zuverlässigkeitsfunktionen spricht man von einer probabilistischen Bemessung der Stufe II, bei Berücksichtigung der realen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Zuverlässigkeitsfunktionen von einer Bemessung der Stufe III. Ermittelt man neben der Eintrittswahrscheinlichkeit auch das Risiko, betrachtet also auch die Folgen des Versagens, so liegt eine Bemessung der Stufe IV vor. Das folgende Beispiel stellt eine probabilistische Beurteilung der Stufe III dar.

## 2. Sicherheitsbewertung von Schutzsystemen der niedersächsischen Küste

### 2.1 Versagensmechanismus und Eingangsgrößen

Die Sicherheit der untersuchten Küstenschutzsysteme kann durch die Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs am Hauptdeich charakterisiert und durch die Zuverlässigkeitsfunktion  $Z = h_D - Thw - R_{98\%}$  als Differenz von Deichhöhe und Tidehochwasserstand sowie dem 98%-Wellenauflauf beschrieben werden. Für den Wellenauflauf liegen im Gegensatz zum Wasserstand keine langjährigen Datenreihen, aus denen eine Statistik abgeleitet werden kann, vor. Daher ist es notwendig, diese aus der Windstatistik unter Verwendung von Seegangmodellen und einer Wellenaufformel zu berechnen.

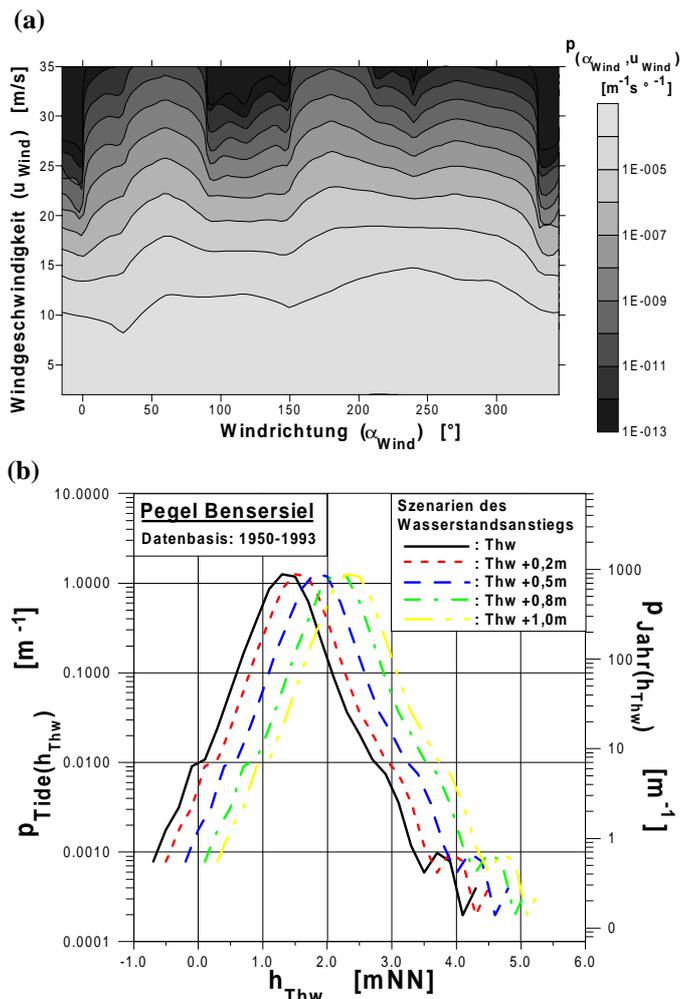


Abb. 3: Eintrittswahrscheinlichkeit von Windgeschwindigkeit und -richtung (a) und Tidehochwasserstand (b)

Abb. 3 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte von Windgeschwindigkeit und -richtung (a) sowie des Tidehochwasserstands (b). Zur Untersuchung der Bedeutung eines Wasserstandsanstiegs für die Sicherheit von Küstenschutzsystemen wurden verschiedene Szenarien von Wasserstandsänderungen vorgegeben, die sich an den Szenarien des IPCC [5] für die nächsten 100 Jahre orientieren.

### 2.3 Ermittlung der Belastungsparameter

Für einen Satz der Eingangsparameter - Wasserstand und Wind - werden nach der in Abb. 4 dargestellten Modellkette die Belastungsparameter innerhalb des Küstenschutzsystems und die Zuverlässigkeit berechnet [6].

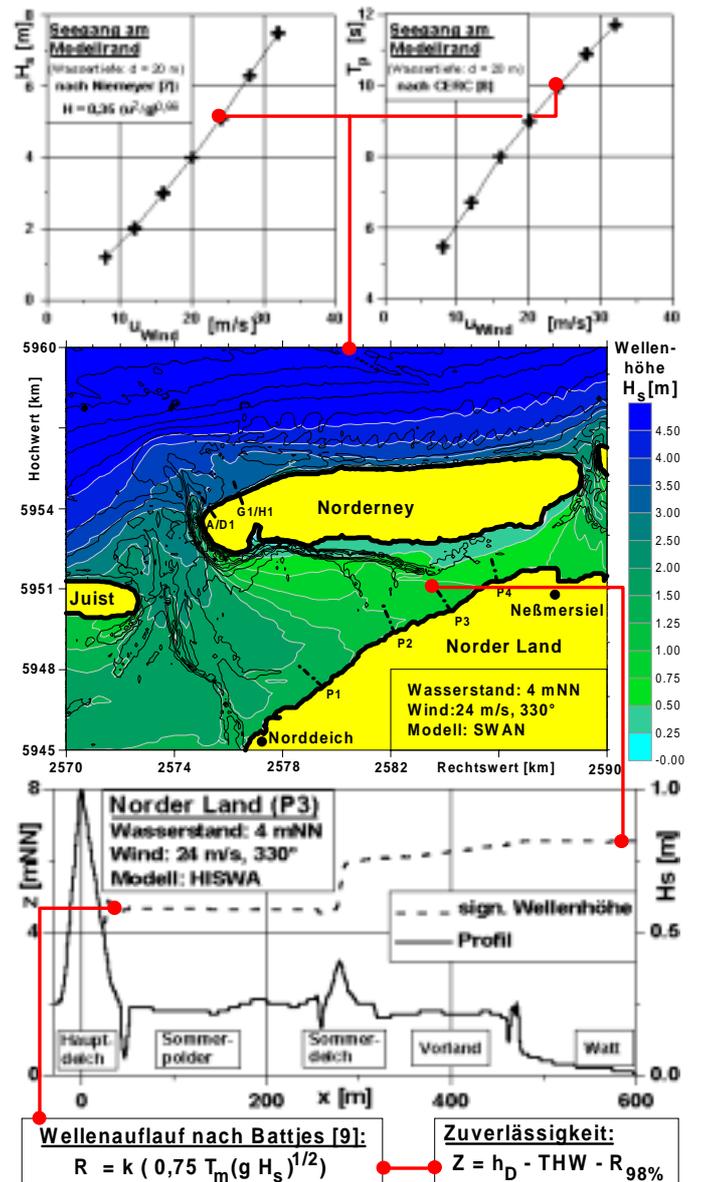
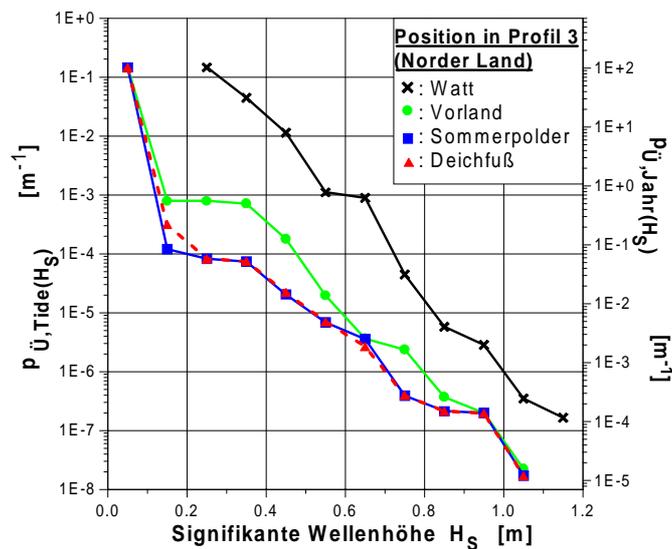


Abb. 4 Modellkette zur Ermittlung der Zuverlässigkeit  
 Dazu werden ausgehend von Wind und Wasserstand die Randbedingungen des Seegangs festgelegt [7+8] und die Seegangsausbreitung innerhalb des Küstenschutzsystems großräumig mit dem Seegangmodell SWAN [4] berechnet. Für einzelne Profile an der Küste erfolgt dann eine eindimensionale Seegangsberechnung unter Verwendung des Seegangmodells HISWA [3]. Aus den Seegangparametern am

Fuß des Hauptdeiches wird nach Battjes [9] der Wellenauf-  
lauf und der Wert der Zuverlässigkeitsfunktion ermittelt.

Die Berechnungen ermöglichen eine Beurteilung einzelner  
Küstenschutzelemente hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und  
Bedeutung im System. So zeigt die 2-dimensionale Darstel-  
lung der Wellenhöhen in Abb. 4 die Bedeutung vorgelagerter  
Inseln für die Verminderung der Seegangbelastung der Fest-  
landküste und die 1-dimensionale Darstellung die Verminde-  
rung der Wellenhöhe an Sommerdeichen im Schutzsystem.  
Diese numerischen Untersuchungen wurden durch Versuche  
zur Seegangstransmission an Sommerdeichen im Großen  
Wellenkanal des Forschungszentrums Küste [10] und zur  
Seegangsdämpfung an Lahnungen im Wellenkanal und Wel-  
lenbecken des Franzius-Instituts [11] ergänzt.

Die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Eingangsbedin-  
gungen von Wasserstand und Wind werden unter Ver-  
wendung der in Abb. 3 dargestellten Wahrscheinlichkeitsver-  
teilungen zu Überschreitungshäufigkeiten von Belastungspar-  
ametern zusammengeführt [12]. Abb. 5 zeigt beispielhaft die  
Überschreitungshäufigkeit der signifikanten Wellenhöhe an  
verschiedenen Positionen innerhalb des Küstenschutzsystems.



**Abb. 5 Überschreitungshäufigkeit der signifikanten Wellenhöhe in einem Küstenschutzsystem**

Die Überschreitungshäufigkeit der signifikanten Wellenhöhe  
für  $H_S > 0,3$  m nimmt deutlich vom Watt ( $p_{Ü, Jahr(H_S = 0,3 \text{ m})} = 50$ )  
zum Vorland ( $p_{Ü, Jahr(H_S = 0,3 \text{ m})} = 0,6$ ) und zum Deichfuß  
( $p_{Ü, Jahr(H_S = 0,3 \text{ m})} = 0,06$ ) ab. Für Wellen einer signifikanten  
Wellenhöhe von  $H_S > 0,9$  m wird für dieses Küstenschutzsys-  
tem die Überschreitungshäufigkeit durch den Sommerdeich  
nicht über die Reduzierung infolge des Vorlandes hinausge-  
hend vermindert. Aufgrund von winderzeugtem Seegang im  
Bereich des Sommerpolders kommt es für signifikante Wel-  
lenhöhen von  $H_S \approx 0,2$  m vor dem Deichfuß zu größeren  
Überschreitungshäufigkeiten als im Bereich des Sommerpol-  
ders unmittelbar hinter dem Sommerdeich [10].

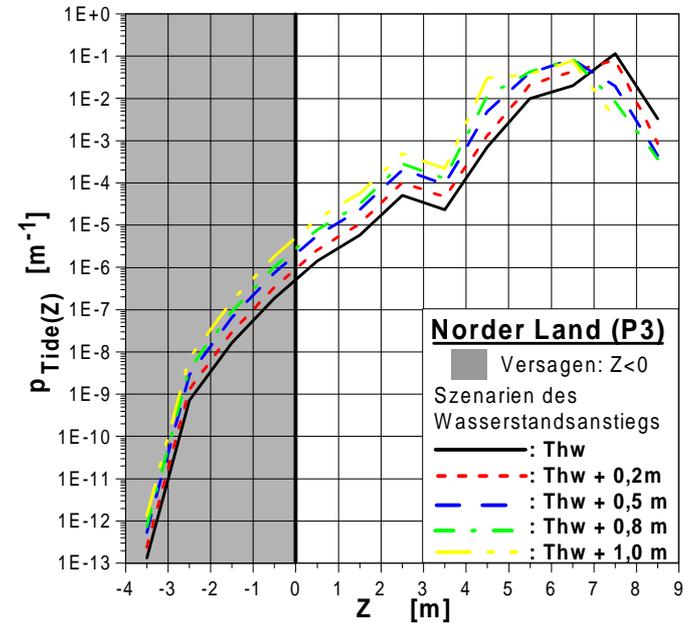
#### 2.4 Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit des Versagens durch Wellenüberlauf  
ergibt sich durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichte

der Zuverlässigkeit über den Bereich negativer Zuverlässig-  
keit:

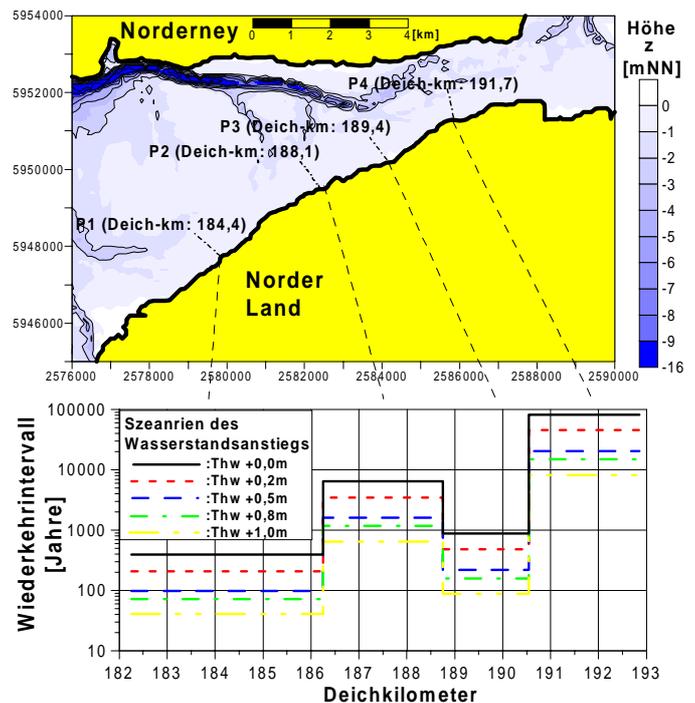
$$p_F = \int_{Z < 0} p_{(Z)} dZ$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeit ist für die  
in Abb. 3b gegebenen Szenarien von Wasserstandserhöhun-  
gen in Abb. 6 dargestellt.



**Abb. 6 Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeit**

Der grau unterlegte Bereich der Abb. 6 kennzeichnet Situa-  
tionen des Wellenüberlauf. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der  
Zuverlässigkeit  $p_{(Z)}$  nimmt erwartungsgemäß bei einer Was-  
serstandserhöhung für  $Z < 0$  zu. Damit steigt auch die Wahr-  
scheinlichkeit des Wellenüberlaufs  $p_F$  an. Die Abb. 7 zeigt die  
Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs, welche dem Inversen  
der Versagenwahrscheinlichkeit entspricht.



**Abb. 7 Wiederkehrintervall des Wellenüberlaufs**

Das Wiederkehrintervall des Wellenüberlaufs weist eine star-  
ke räumliche Variabilität auf, so beträgt für die heutigen Was-

serstandsverhältnisse das Wiederkehrintervall für den nur wenig durch die Insel Norderney abgeschirmten, scharliegenden Deich (P1) etwa 400 Jahre, während der stark abgeschirmte Vorlanddeich mit Sommerdeich (P4) eine Wiederkehrzeit von mehr als 10000 Jahre aufweist. Diese große räumliche Variation des Wiederkehrintervalls von Wellenüberlauf deutet das Verbesserungspotential heutiger Bemessungsmethoden an.

Bei der in Abb. 3b dargestellten Erhöhungen der Tidewasserstände von 0,5 m verringert sich das Wiederkehrintervall auf etwa ein Viertel des heutigen Wertes, eine Erhöhung um 1 m zieht eine Verminderung um etwa 90 % nach sich (Abb. 7).

### 3. Schlußfolgerung und Ausblick

Die dargestellte probabilistische Methode stellt ein über die heutigen Standardverfahren hinausgehendes Bemessungsverfahren dar. Sie bietet gegenüber Standardverfahren (Vergleichswert-Verfahren, a-b-c-d-e-Verfahren) bei der Beurteilung der Sicherheit einer Küstenregion verbesserte Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Zusammensetzung der Küstenschutzsysteme und ermöglicht damit eine im Sinne der Wiederkehrzeit des Versagens des Küstenschutzsystems ausgewogenere Bemessung. Darüberhinaus kann es als eine Entscheidungshilfe bei der Festlegung von im Falle von klimaänderungsbedingt steigenden Wasserständen erforderlichen Verbesserung von Küstenschutzsystemen dienen.

Ergänzend zu dem auch in Standardverfahren berücksichtigten Versagensmechanismus des Wellenüberlaufs werden am Franzius-Institut derzeit weitere Versagenswege eines Küstenschutzsystems in das probabilistische Bewertungsschema eingearbeitet.

### Schrifttum

- [1] Centre for Civil Engineering Research and Codes (CUR): Probabilistic Design of Flood Defences, CUR Report 141, 1990
- [2] Ausschuß für Küstenschutzwerke: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK), Die Küste, Heft 55, 1993
- [3] Booij, N., Holthuijsen, L.H., Dekker, J., Schoonbeek, R.: Standard tests for the shallow water wave model HISWA, Delft University, 1993Ausschuß
- [4] Ris, R.C.: Spectral modelling of wind waves in coastal areas, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, 1997
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC): Second Assessment Report on Climate Change, 1996.
- [6] 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 1<sup>st</sup> Int. Conf. Port Coast Environment, Varna, Bulgarien, 1997
- [7] Niemeyer, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste, Die Küste 34, 1979
- [8] Coastal Engineering Research Center (CERC): Shore Protection Manual, Washington DC, 1984

- [9] Battjes, J. A.: Run-Up Distributions of Waves Breaking on Slopes, Proc. ASCE, No. WW1, Feb., 1971
- [10] Mai, S., Daemrich, K.-F., Zimmermann, C.: Wellentransmission an Sommerdeichen, Wasser+Boden, 1998, im Druck
- [11] v. Lieberman, N., Schwarze, H., Zimmermann, C.: Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen, Die Küste, Heft 60, 1998, im Druck
- [12] Mai, S., Schwarze, H., Zimmermann, C.: Safety Variation of Coastal Defense Systems. Proc. of 2<sup>nd</sup> Indian National Conf. on Harbour and Ocean Engineering, Trivandrum, India, 1997