

DR.-ING. ANDREAS KORTENHAUS · DR.-ING. PETER FRÖHLE · PROF. DR.-ING. JÜRGEN JENSEN · PROF. DR.-ING. NICOLE VON LIEBERMAN · DR.-ING. STEPHAN MAI · DR.-ING. CHRISTOPH MILLER · DR.-ING. KARSTEN PETERS · PROF. DR.-ING. HOLGER SCHÜTTRUMPF

## Probabilistische Bemessung von Bauwerken

#### 1. Vorbemerkung

Viele Prozesse, die bei der Bemessung von Küsten- und Hochwasserschutzwerken eine Rolle spielen, sind mit Unsicherheiten behaftet. Dabei sind sowohl viele Eingangsparameter der verwendeten Modelle stochastischer Natur als auch die Modelle selber mit Unsicherheiten belegt. Die heutigen Erkenntnisse erlauben eine Berücksichtigung dieser Unsicherheiten bei der Verwendung der Modelle, z.B. durch die Verwendung probabilistischer Methoden.

Unter probabilistischen Methoden werden hier Methoden verstanden, die die Wahrscheinlichkeit ermitteln, mit der das Versagen eines Bauwerks eintritt. Hierzu muss zunächst der Begriff »Versagen des Bauwerks« definiert werden. Bei Küsten- und Hochwasserschutzwerken wird dazu in der Regel das »Versagen« definiert, wenn eine Überflutung des Hinterlandes eintritt. Versagen kann also eintreten, wenn ein Überströmen des Bauwerks auftritt (ohne dass dabei das Bauwerk selbst beschädigt wird), oder aber wenn ein Deichbruch eintritt. Das Versagen wird aber in der Regel nicht durch einen einzelnen Versagensmechanismus verursacht, sondern durch mehrere Mechanismen, die zeitlich hintereinander ablaufen.

#### 2. Ziele

In HTG & DGGT (2004) wurde bereits der grundlegende Forschungsbedarf für verschiedene Gewässer aufgezeigt. Für die zukünftige Bemessung von Bauwerken wird darin unter anderem festgehalten:

»Mit neuen probabilistischen Bemessungsverfahren können die Einwirkungen in ihrer zeitlichen Abfolge und voraussichtlichen Gleichzeitigkeit berücksichtigt werden. Sie berücksichtigen auch die Eintretenswahrscheinlichkeit verschiedener Versagensformen und ermöglichen so eine Risikoabschätzung und eine Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bauteilen und Bauwerken. Sie sind

somit eine Grundlage für eine strukturelle Optimierung von Bauwerken und erlauben eine Bewertung der Auswirkungen von Planungsänderungen auf die Zuverlässigkeit und Sicherheit.«

Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) hat in KFKI (2001) die allgemeine Forschungsrichtung des KFKI vorgegeben. Dabei wird ebenfalls auf die in jeder Prognose vorhandenen Unsicherheiten hingewiesen. Gleichzeitig wird die Bedeutung von praxisrelevanten und interdisziplinären Forschungsprojekten unterstrichen.

Ein internationaler Vergleich von Bemessungsmethoden für Küstenschutzwerke ist schwer möglich, weil weltweit völlig unterschiedliche Küstenschutzstrategien eingesetzt werden und unterschiedliche Bedingungen gelten. Einen Überblick über derartige Methoden für die fünf Anrainerstaaten der Nordsee geben Jorissen et al. (2001). Die Auflistung zeigt, dass in vielen Küstenländern entweder bereits risikobasierte Methoden für die Bemessung von Schutzwerken eingesetzt werden oder aber bereits große Schritte in diese Richtung unternommen werden. Auch aus dieser Sicht und vor dem Hintergrund anzustrebender Risikoanalysen für die vollständige Erfassung des Küstenraumes bei der Bemessung ist daher ein Vorgehen in Richtung einer probabilistischen Bemessung sinnvoll. Gleiches gilt für Bauwerke im Flussraum sowie an den Kanälen.

Das vorrangige Ziel der Arbeitsgruppe »Probabilistische Bemessung von Bauwerken« ist die Darstellung des vorhandenen Forschungsbedarfs für eine Bereitstellung und beispielhafte praktische Anwendung eines vollständigen operationellen probabilistischen Verfahrens für die Bemessung von Fluss-, Kanal-, Küstenschutz-, Hochwasserschutz-, Hafen- und OffshoreBauwerken. Dabei müssen auch Verfahren für die Quantifizierung und Analyse der Unsicherheiten aus den verschiedensten Quellen zur Verfügung gestellt werden.



Abb. 1a Seedeich im Bereich der Leybucht



Abb. 1b Deckwerk und Strandmauer auf Baltrum



Abb. 1c Schleuse im Seedeich bei Ribe, Dänemark



Abb. 1d Sperrwerk an der Eider

## 3. Ingenieurpraktische und volkswirtschaftliche Bedeutung

Die nachhaltige Bemessung von Bauwerken im Küsten-, Ästuar und Flussraum sowie entlang der Kanäle ist eine der entscheidenden Aufgaben für alle im Wasserbau und Küsteningenieurwesen tätigen Ingenieure. Dabei steht schon immer das Bestreben im Vordergrund, Aufwand (Kosten) und Nutzen der Bauwerke zu optimieren, um zum einen überdimensionierte Bauwerke (und damit zu hohe Kosten) und zum anderen unterdimensionierte Bauwerke (potentielle Gefahr durch Versagen) zu vermeiden. Hierfür sind zwei Voraussetzungen unabdingbar:

- Verständnis der ablaufenden Prozesse am Bauwerk, die zum Versagen führen, sowie deren Wechselwirkungen. Das beinhaltet auch das Verständnis der dazu gehörigen Eingangsparameter.
- Kenntnis der Streubreite und mögliche Veränderung aller maßgebenden Parameter

Die hier angestrebte probabilistische Bemessung ist eine Möglichkeit, diesen Forderungen gerecht zu werden, da sie sowohl prozessorientiert arbeitet als auch die Streubreite aller Eingangsparameter und der verwendeten Modelle berücksichtigt. Daher ist die praktische Bedeutung für eine zukünftige Bemessung von Bauwerken im Wasserbau und Küsteningenieurwesen als sehr hoch einzustufen.

Die Bedeutung zuverlässiger und sicherer Ufersicherungs-, Hochwasserschutz- und Küstenschutzmaßnahmen ist eines der wesentlichen Anliegen der Länder und des Bundes. Dücker & Oumeraci (2006) und Kortenhaus & Oumeraci (2000) weisen darauf hin, dass nach Aussagen der Versicherungswirtschaft ca. 35 Mrd. Euro an Werten und ca. 4 Mio. Einwohner im Überflutungsbereich der deutschen Küsten zu schützen sind. Kron (2002) zeigt die Entwicklung von Überflutungen weltweit auf und gibt die Dimension von Überflutungen sowie die Ursachen für deren Entwicklung aus der Sicht der Versicherungswirtschaft an. Daraus lässt sich ableiten, dass sowohl auf der Seite der »Risikoempfänger« als auch bei den Schutzbauwerken Maßnahmen ergriffen werden müssen, um das vorhandene Risiko zu minimieren. Eine sichere Bemessung der vorhandenen Schutzwerke ist daher aus volkswirtschaftlicher Sicht unerlässlich.

### 4. Defizite in Forschung und Entwicklung

Bevor auf die Defizite in Forschung und Entwicklung eingegangen wird, soll kurz ein zusammenfassender Überblick über die derzeit gültige Bemessungspraxis gegeben werden. Davon ausgehend werden die Defizite aufgeführt.

Entlang der deutschen Küsten ist eine Vielzahl von Wasserbauwerken vorhanden, die im Folgenden aufgelistet werden sollen (s. auch Abb. 1a-1h), ohne dass hierbei ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird:

- · Deiche und Dämme (Abb. 1a)
- Deckwerke (Abb. 1b)
- · Dünen (Abb. 1g)
- HWS-Wände, Molen, Kaianlagen, Spundwände, Pfähle (Abb. 1f)
- · Offshore-Bauwerke, Zylinder
- Siele, Sperrwerke, Schleusen, Auslässe (Abb. 1c 1e)
- · Tore, Notverschlüsse
- · Objektschutzmaßnahmen, Brückenpfeiler

#### Bemessungspraxis in Deutschland

Die heutige Bemessungspraxis basiert auf jahrzehnte-, wenn nicht jahrhundertelangen Erfahrungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküsten. Sie wurde während dieser Zeit immer wieder angepasst und verändert und beschränkt sich im Allgemeinen heute auf die Erfassung relevanter Versagensmechanismen des jeweiligen Bauwerks (z.B. Wellenüberlauf beim Deich, Stabilität der Deckschicht bei geschütteten Wellenbrechern, Gleitstabilität bei Caisson-Wellenbrechern).

Bei Seedeichen basiert die allgemeine Bemessungspraxis unter anderem auf der Ermittlung der Bestickhöhe des Seedeiches, bodenmechanischer Aspekte und baupraktischer Anforderungen. Für die Ermittlung der Bestickhöhe gibt es in den verschiedenen deutschen Bundesländern unterschiedliche Verfahren, die z.B. für die Küste in Oumeraci (2001) und für den Binnenbereich in Patt (2001) dargestellt sind (Abb. 2).

Aus bodenmechanischer Sicht gelten für Deichbaumaßnahmen grundsätzlich die übergeordneten Regeln und Normen für Baugrunduntersuchungen sowie die erforderlichen erdstatischen und bodenmechanischen Nachweise u.a. gemäß DIN 1054 (1996), DIN 4084-100 (1996), DVWK (1986), BAW (2005), EAK (2002), EAU (2004).

Deckwerke werden im Fluss- und Kanalbau sowie entlang der Ästuare und Küstenlinien als Böschungssiche-

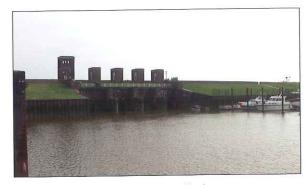


Abb. 1e Siel in der Nähe von Dangast, Nordsee



Abb. 1f Hochwasserschutzwand in Hamburg



Abb. 1g Dünenlandschaft auf Norderney



Abb. 1h Senkrechter Wellenbrecher in Hartlepool, England



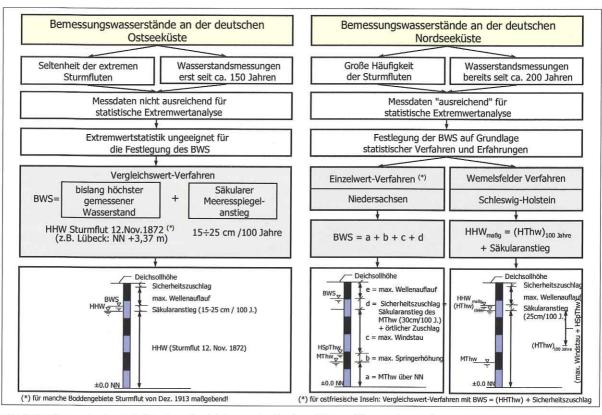


Abb. 2 Festlegung der Bestickhöhe eines Seedeiches an der Nord- und Ostsee (Oumeraci, 2001)

rung eingesetzt. Die aktuelle Bemessungspraxis basiert im Wesentlichen auf der Ermittlung des erforderlichen Eigengewichts des Deckwerks für maßgebende Belastungen unter Berücksichtigung bodenmechanischer Aspekte.

Deckwerke sind im wesentlichen Wasserstands-, Strömungs-, Seegangs-, Schiffswellen- und Eisbelastungen sowie deren Kombinationen ausgesetzt. Geschüttete Deckwerke sind auf Schüttsteinerosion zu bemessen. Die hydraulische Deckwerksbemessung ist bei BAW (2004) bzw. bei Hansen (1985) beschrieben. Die Ermittlung der Eingangsgrößen findet auf der Grundlage von Messungen in der Natur oder empirischer Ansätze statt. Die geotechnische Bemessung ist in BAW (2004) beschrieben. Die Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlsicherungen an Wasserstraßen können BAW (1993) entnommen werden.

#### Bemessungspraxis anderer Länder

In den Niederlanden wird eine Überschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswasserstandes für die einzelnen dort vorhandenen Deichringe vorgeschrieben. Dabei wird nach TAW (1999) i.d.R. für an der Küste liegende Deichringe eine Wahrscheinlichkeit  $P_f = 1.0 \cdot 10^{-4}$  definiert, die Deichringe im Hinterland oder in weniger exponierten Lagen werden mit  $P_f = 2.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $5.0 \cdot 10^{-4}$  oder  $8.0 \cdot 10^{-4}$  angesetzt. Eine Überprüfung der darauf beruhenden Bemessung muss dabei alle fünf Jahre erfolgen. Für Flussdeiche wird in den Niederlanden eine Eintrittswahrscheinlichkeit von  $8.0 \cdot 10^{-4}$  nach TAW (1995) angesetzt. Einen Überblick über Risikoanalysen in den Anrainerstaaten der Nordsee geben Jorissen et al. (2001).

#### Defizite

Die derzeit gültige Bemessungspraxis ist nicht prozessorientiert, weil sie nicht alle Versagensmechanismen des Bauwerks erfasst und den Ablauf der Schadensprozesse nicht berücksichtigt. Bei einer Deckwerksbemessung werden zwar die verschiedenen Schadensmechanismen berücksichtigt, der zeitliche Verlauf des Schadens sowie die Interaktion der verschiedenen Belastungsgrößen untereinander sowie mit dem Deckwerk selber und dem anstehenden Boden wird jedoch nur auf statischer Grundlage erfasst. Die derzeitige Bemessungspraxis erfasst dar-

über hinaus nicht die Unsicherheiten oder Streubreiten der einzelnen Eingangsparameter, was zum einen dazu führen kann, dass viele Deiche oder Deckwerke zu stark auf der sicheren Seite liegend gebaut wurden, andererseits aber auch eine gefährliche Unterbemessung aufgrund der Unkenntnis der wirkenden Versagensmechanismen sowie deren Interaktionen auftreten kann. Weitere Unzulänglichkeiten deterministischer Bemessungsmethoden z.B. für Deiche sind in CUR (1990) oder Kuijper & Vrijling (1998) zusammengefasst, eine ausführlichere Diskussion findet sich in Kortenhaus et al. (2001).

Probabilistische Verfahren basieren im Wesentlichen auf einer prozessorientierten Erfassung des Versagens eines Bauwerks, wobei die Unsicherheiten der Eingangsparameter und Modelle sowie die Beschreibung der Versagensmechanismen selbst berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden die Zusammenhänge der Mechanismen hinsichtlich ihrer zeitliche Abfolge sowie ihrer Interaktionen in der Regel in Fehlerbäumen beschrieben. Im Vergleich zu deterministischen Methoden müssen also mehr Informationen für die Bemessung von Bauwerken auf probabilistischer Grundlage zur Verfügung gestellt werden. Daraus und aus der im Vergleich zu deterministischen Verfahren geänderten Vorgehensweise ergeben sich die folgenden Defizite in der Forschung:

- Die Erfassung der Versagensformen für unterschiedliche Bauwerke ist bisher lückenhaft. Für viele Küsten- und Hochwasserschutzwerke ist die Erfassung der zugrunde liegenden Versagensmechanismen bisher nicht vorhanden oder lückenhaft, so dass nur teilweise prozessorientierte Informationen zur Verfügung stehen. Dabei sind nach Buijs et al. (2005) auch zeitabhängige Prozesse zu berücksichtigen, die einen Einfluss auf die jeweiligen Versagensmechanismen haben. So können z.B. morphologische Prozesse oder Veränderungen vor dem Bauwerk einen deutlichen Einfluss auf die Versagensmechanismen haben, siehe z.B. Dawson et al. (2005), und Johnson & Hall (2005).
  - Anmerkung: Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die gleichen Bemessungsformeln, die deterministisch verwendet werden, auch bei probabilistischen Verfahren eingesetzt werden können.
    Hierfür ist in der Regel lediglich eine Umstellung in Form einer Grenzzustandsgleichung

- (z = R S mit R= Widerstände und S = Belastungen) und die Berücksichtigung von Unsicherheiten der Eingangsparameter sowie des verwendeten Modells erforderlich.
- Die Kenntnis der Unsicherheiten der Eingangsdaten und der Modelle ist sehr lückenhaft. Bisher liegen wenige Untersuchungen vor, auf deren Grundlage sich die statistischen Verteilungsfunktionen der Unsicherheiten bestimmen lassen können. Vielfach ist man daher bei der Abschätzung der Unsicherheiten auf Expertenmeinungen oder Schätzungen angewiesen. Dies beinhaltet auch die Extrapolation auf extreme Ereignisse wie sie immer wieder in der Fachwelt diskutiert wird (z.B. ein Bemessungswasserstand mit einem Wiederkehrintervall von 10.000
  - Anmerkung: Selbst (grobe) Schätzungen der Unsicherheiten sind gegenüber deterministischen Methoden zu bevorzugen, weil sie die Bandbreite des Ergebnisses deutlich machen. Verbesserungen der Datenlage werden später zu einer Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit führen, einer deterministischen Abschätzung des Ergebnisses (d.h. keine Unsicherheit in den Parametern) liegen weitaus gröbere Annahmen zugrunde.
- Die bisherigen Fehlerbaumanalysen sind unzureichend bei zeitabhängigen Versagensformen und bei einer Zeitabhängigkeit der Wechselwirkungen zwischen den Versagensformen. Weder diese Zeitabhängigkeiten noch die Abhängigkeiten der Versagensmechanismen untereinander werden durch bisherige Fehlerbaumanalysen berücksichtigt. Abhängigkeiten können durch Korrelationen der Mechanismen erfasst werden, hier ist man in der Regel aber auf Annahmen angewiesen.
  - Anmerkung: Abhängigkeiten zwischen einzelnen Versagensmechanismen bestehen bereits dann, wenn beide Mechanismen den gleichen oder mehrere gleiche Eingangsparameter verwenden.
- Eine einfache und bedienerfreundliche Software für die Anwendung probabilistischer Methoden liegt bisher nicht vor. Während deterministische Verfahren in vielen Fällen noch »per Hand« zu berechnen sind, erfordern die statistischen Verteilungsfunktionen

und die Level II oder Level III Berechnungen (insbesondere die teilweise zeitaufwändigen Monte-Carlo-Simulationen) der Versagenswahrscheinlichkeit numerische Tools, die am einfachsten mit dem Rechner bereitzustellen sind. Hierfür existieren zwar einige Software-Produkte, allerdings ist eine einfache und universell anwendbare Software, die ohne große Vorkenntnisse einzusetzen ist und komplexe Versagensmechanismen beinhaltet, bisher nicht verfügbar. Dadurch ist die Anwendung probabilistischer Methoden auf kleine Expertengruppen beschränkt und wird von vielen Nicht-Experten kritisch gesehen.

 Probabilistische Verfahren liefern eine Versagenswahrscheinlichkeit eines Küstenschutzwerkes.
Die Bewertung dieses Ergebnisses im Sinne einer Bemessung kann nur erfolgen, wenn Vergleichs- oder Bemessungswerte herangezogen werden können.
Jeder Überflutungswahrscheinlichkeit eines Gebietes muss daher z.B. eine zulässige Wahrscheinlichkeit gegenüber gestellt werden. Hierzu fehlen bisher nachvollziehbare Kriterien, die ein derartiges Vorgehen erlauben.

Die angeführten Punkte müssen im Weiteren eingehender diskutiert und aufgeschlüsselt werden. Hieraus ergibt sich der darzustellende Forschungsbedarf im Bereich der probabilistischen Bemessung von Bauwerken.

# 5. F+E-Schwerpunkte, Herausforderungen und Förderungszeitraum

#### 3.1 Allgemeines

Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, welche Detailschritte in der Forschung als notwendig angesehen werden, um zu einer probabilistischen Bemessung von Bauwerken im Wasserbau und im Küsteningenieurwesen zu gelangen.

Gleichzeitig soll in diesem Abschnitt auf laufende Forschungsprojekte und Arbeitsgruppen verwiesen werden, dies sich zurzeit oder in der Vergangenheit mit aktuellen Forschungsfragen zur Bemessung von Bauwerken in Flussgebieten, Kanälen, Ästuaren, an der Küste oder auf See beschäftigen oder beschäftigt haben. Eine Übersicht über ausgewählte derartige Projekte auf internationaler und nationaler Ebene wird in Tab. 1 gegeben.

#### Versagensmechanismen

Wesentliche Grundvoraussetzung für eine probabilistische Bemessung ist die vollständige Erfassung von Versagensmechanismen aller Bauwerke im Wasserbau, Küsten- und Hochwasserschutz. Ohne diese Versagensmechanismen und die damit verbundenen Grenzzustandsgleichungen ist eine probabilistische Bemessung nicht möglich. Daher wird der bestehende Forschungsbedarf in den folgenden Schritten gesehen:

- I) Katalogisierung der Bauwerke für den Küsten und Hochwasserschutz: entlang der deutschen Küsten und Flüsse werden Bauwerke katalogisiert, die vor Überschwemmungen und Hochwasser schützen. Dabei ist nicht unbedingt die Länge der jeweiligen Schutzbauwerke entscheidend, sondern lediglich die unterschiedlichen Typen. Diese Zusammenstellung ist die Grundlage für die Aufstellung aller Versagensmechanismen für diese Bauwerke im nächsten Schritt.
- 2) Auflistung aller Versagensmechanismen für die einzelnen Bauwerke: für die im ersten Schritt zusammengestellten Bauwerkstypen müssen alle Versagensmechanismen gefunden werden. Dabei ist zunächst eine Literaturstudie sinnvoll, in der zusammengestellt wird, wie die einzelnen Bauwerkstypen in der Vergangenheit bereits versagt haben oder worauf sie zurzeit bemessen werden. Alle bereits dokumentierten Versagensmechanismen sind gleichfalls aufzulisten und kritisch zu beurteilen. Darüber hinaus kann eine Expertenbefragung durchgeführt werden, die mögliche Versagensformen der Bauwerke abfragt und bewertet. Dieses Verfahren wird zu einer Auflistung möglicher Versagensmechanismen für alle Bauwerke führen.
- 3) Entwicklung der Fehlerbäume für die Bauwerke und deren Variationen: im nächsten Schritt muss nun die Abfolge aller Versagensmechanismen erstellt werden. Aus den im letzten Schritt durchgeführten Schadensanalysen können einzelne Schritte des Gesamtversagens abgeleitet werden. Jedes einzelne Teilversagen ist ein Versagensmechanismus aus Schritt 2. Dieser Ablauf des Gesamtversagens wird für jedes Bauwerk zu einem Fehlerbaum führen, der von den auslösenden hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen bis hin zum Gesamtversagen das Entstehen einer Überschwemmung beschreibt.

rojekt	Laufzeit	Förderer/ Projektnr.	Inhalt
ACTIF		EU, EVK1-CT-2002-80014	Überflutungsvorhersage im Flussbereich, Transfer von Wissenschaft zu Anwendern und Praxis
CLASH	2002-2005	EU, EVK3-CT-2001-00058	allgemeine Berechnungsmethoden für Wellenüberlauf über Küstenschutzbauwerke sowie Maßstabseffekte
COMCOAST	2005–2007	EU, Interreg IIIb	innovative Lösungen für Überflutungs- und Hochwasserschutz im Küstenbereich
COMRISK	2003-2005	EU, Interreg IIIb	Verbesserung des Risikomanagements in Küstenregionen
CRUE	2005-	EU, ERAC-CT-2004-515742	Konsolidierung bestehender Hochwasserforschungsprogramme und Identifizierung von Wissenslücken
Deichprofile	2001-2003	KFKI 75	Optimierung von Deichprofilen
DFNK		BMBF, Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen, BMBF	Wissenschaftliche Grundlagen für ein Risikomanagement von Naturkatastrophen
EUROWAVES	1997-2001	EU, MAS3-CT97-0109	Bestimmung des Wellenklimas in Europa, inkl. Wellenstatistik off-shore, Wellentransformationsmodellen und Statistik am Bauwerk
FL00Dsite	2004-2009	EU, 36 Partner aus 13 Ländern	Risikobasierte Analyse- und Management-Methoden, Fehlerbäume, Versagensmechanismen
HIPOCAS	2002-2004	EU, EVK2-CT-1999-00038	40 Jahres Hindcast von Wind, Wellen, Wasserstand und Klima für Europäische Gewässer
IMPACT	2001-2004	EU, EVG1-CT-2001-00037	Initialisierung von Dammbrüchen, Versagensmechanismen und Bruchvorgänge in Dämmen und Böschungen
MAXWAVE	2000-	EU, EVK3-CT-2000-00026	beschäftigt sich mit Freakwellen als Ursachen von Schiffsunglücken
MOSES	2003-2007	BMBF, KFKI 80-1	Modellierung des mittelfristigen Seegangsklimas im deutschen Nordseeküstengebiet
MUSE	2002-2005	BMBF, KFKI 78	Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintritts- wahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste
MUSTOK	2005–2008	BMBF, KFKI 84-86	Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste
ProDeich	2000-2003	BMBF, KFKI, LWI, TU Braunschweig, IGBE, Uni Duisburg-Essen	Probabilistische Bemessung von Seedeichen, Fehlerbaum für Deiche, Versagensmechanismen für Deiche
PROVERBS	1996-1999	EU, 23 Partner aus 8 Ländern	Probabilistische Bemessung von senkrechten Wellenbrechern
RASP		UK, Environment Agency	Risikobestimmung von Flussdeichen in England
Reducing the Risk of Embankment Failure	()	UK	Schadensanalyse der in England aufgetretenen Flussdeichbrüche, inkl. Aspekte der Bemessung, Bauausführung, Wartung und Reparatur
RIMAX		BMBF, verschiedene Teilprojekte	Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse
SAFECOAST	2005-2008	EU, Interreg IIIb, 6 partners	Management der Nordsee im Jahr 2050 unter Berücksichtigung von Klimaschwankungen und Meeresspiegelanstieg
TE 2100		UK	Risikobestimmung in der Themse-Region, detaillierte Erfassung von Versagensmechanismen, Überflutungsvorgängen und Schadensmodellen
WAVEMOD	1993-	MAS2-CT92-0025	probabilistische Wellenmodelle und Berücksichtigung von Strömungen
World Wave Atlas (WWA)	1993-	Norwegian Space Centre	hoch auflösender Atlas für Wind und Wellen für beliebige Regionen weltweit
	2000-2002	KFKI 65	Charakterisierung der Tidekurve
	1999–2001	KFKI 61	Hydrodynamische Belastung der Binnenböschung von Seedeichen durch Wellenüberlauf
	1995-1998	KFKI 52	Windstauanalysen zur Änderung des Sturmflutklimas in der Nord- und Ostse
	1997-1998	KFKI 54	Untersuchungen regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzu stände und Oberwassereinflüsse auf das Sturmflutgeschehen in Tideästuaren
	1994	KFKI 45	Bemessung auf Seegang

Tab.  $1\,$  Übersicht laufender und abgeschlossener Forschungsprojekte (ausgewählte Bereiche)

- 4) Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Berücksichtigung zeitlich variabler Versagensmechanismen: die meisten Versagensmechanismen sind untereinander abhängig oder verwenden die gleichen Eingangsparameter (was gleichfalls eine Abhängigkeit von Versagensmechanismen bedeutet). Wechselwirkungen zwischen den Versagensmechanismen in einem Fehlerbaum sind zunächst ausgeschlossen, alle Versagensmechanismen werden als unabhängig betrachtet. Dieser offensichtliche Widerspruch zwischen Realität und Annahme innerhalb einer Fehlerbaumanalyse muss zunächst konzeptionell gelöst werden. Die neu zu entwickelnden oder aus dem Schrifttum anzupassenden Verfahren sind dann auf die im Schritt 3 entwickelten Fehlerbäume anzuwenden. Entsprechende Veränderungen der Fehlerbäume sind vorzunehmen.
- 5) Entwicklung der Grenzzustandsgleichungen für die fehlenden Versagensformen: hier sind für die einzelnen Versagensmechanismen Grenzzustandsgleichungen zu entwickeln bzw. aus dem Schrifttum zu übernehmen und kritisch zu beurteilen. Bei ungenügendem Wissensstand zu den einzelnen Versagensmechanismen sind entweder entsprechende Untersuchungen vorzuschlagen oder selbst durchzuführen, wenn die Grenzzustandsgleichungen vorab bekannt sind (z.B. für Seedeiche oder Dünen). Abschließend stehen nach diesem Schritt für jeden der gefundenen Bauwerkstypen sowohl ein Fehlerbaum als auch die darin enthaltenen Versagensmechanismen mit ihren jeweiligen Grenzzustandsgleichungen und allen Eingangsparametern zur Verfügung.

Eine Übersicht über relevante laufende bzw. abgeschlossene Projekte und Arbeitsgruppen, die sich mit Grenzzustandsgleichungen und Fehlerbäumen für Bauwerke im Wasserbau und Küsten- und Hochwasserschutz befasst haben oder befassen, gibt die nachfolgende Auflistung. Weitere Projekte sind in Tab. 1 aufgelistet.

- PROVERBS: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, EU, 1996–1999
- ProDeich: Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche, BMBF/KFKI, 2000–2002
- FLOODsite: Integrated Flood Risk Assessment and Management Methodologies, EU, 2004–2009
- Verschiedene BMBF/KFKI Projekte zu Wellenbelastung von Küstenschutzbauwerken wie Deiche, Dünen, Pfähle, etc. (vgl. Liste in Tab. 1)

- EAK Arbeitsgruppe 1: Sickervorgänge im Deich
- EAK Arbeitsgruppe 4: Hochwasserschutzwände
- EAK Arbeitsgruppe 8: Dünen als Hochwasserschutz
- EUROTOP- Europäisches Overtopping Handbuch

#### Unsicherheiten

Ein zweiter wesentlicher Gesichtspunkt der probabilistischen Bemessung ist die Erfassung der vorhandenen Unsicherheiten in den Eingangsparametern und den verwendeten Modellen (Abb. 3). Hier liegt auch der Mehrbedarf an Eingangsinformationen, da neben den »Mittelwerten« (wie bei einer deterministischen Bemessung) auch die Verteilung der jeweiligen Parameter vorliegen oder abgeschätzt werden muss. Der Forschungsbedarf wird hier wie folgt gesehen:

- I) Methoden der Datenbehandlung: ein einheitliches Konzept sollte hier vorliegen, wie vorhandene Daten behandelt werden, so dass daraus Eingangsverteilungen für probabilistische Bemessungen gewonnen werden können. Dies umfasst vor allem die Behandlung von Datenlücken, Trends in den Daten, Korrelationen, Regressionen, räumliche und zeitliche Abhängigkeiten, etc.. Hierzu sind in der Vergangenheit neue Methoden entwickelt worden (Neuronale Netze, CCA = Canonical Correlation Analysis, SSA = Singular Spectrum Analysis), die vor allem auf ihre allgemeine Anwendbarkeit geprüft und gegebenenfalls erweitert werden müssen.
- 2) Abschätzung der Unsicherheiten der eingesetzten Modelle, Methoden und Eingangsdaten: für die neu gefundenen Grenzzustandsgleichungen aus Punkt o müssen die Eingangsparameter zusammengestellt werden und im Hinblick auf ihre Unsicherheiten untersucht werden. Darüber hinaus muss die Unsicherheit der Grenzzustandsgleichungen selbst erfasst werden. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht in der Trennung dieser Unsicherheit von den Unsicherheiten der Eingangsparameter. Hierfür sind Schrifttumsanalysen bzw. weitere Untersuchungen (Messungen im Labor, Modellversuche) erforderlich.
- 3) Extrapolation für Extremwerte: viele der notwendigen Eingangsparameter sind Extremwerte (z.B. Wasserstand und Seegangsparameter), die aufgrund von Messreihen extrapoliert worden sind. Neben den unter Punkt I vorgestellten Methoden der Zeitreihenbehandlung muss auch die Art der Extrapolation der Messdaten eingehender untersucht bzw. anwendbar

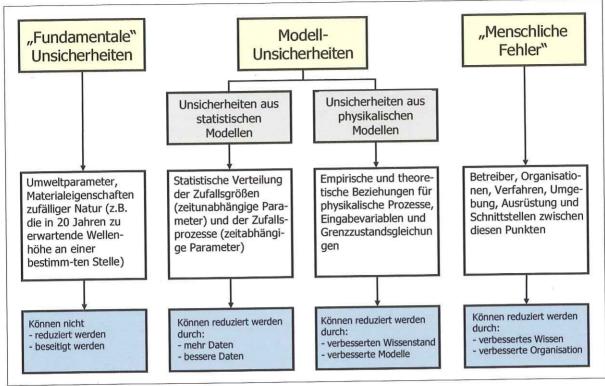


Abb. 3 Wesentliche Einteilung der Unsicherheiten bei einer probabilistischen Bemessung (nach Oumeraci et al., 2001)

- gemacht werden. Hierzu sind gegebenenfalls weitere Untersuchungen von vorhandenen Zeitreihen bzw. weitere Software-Entwicklungen notwendig.
- 4) gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeiten: einige der zu untersuchenden Eingangsparameter der Grenzzustandsgleichungen sind voneinander abhängig. Diese Abhängigkeiten sind eingehender zu untersuchen und darzustellen. Sie sind entweder durch ein entsprechendes Modell, ein neuronales Netz, eine Korrelationsmatrix bzw. gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeiten darzustellen. Die jeweilige Vorgehensweise ist systematisch zu erfassen und darzustellen.

Nach Abschluss dieser Punkte steht eine Gesamtliste aller Eingangsparameter mit zugehörigen Abhängigkeiten und Unsicherheiten zur Verfügung. Aufbauend auf diesen Informationen kann zusammen mit den Grenzzustandsgleichungen eine probabilistische Bemessung der untersuchten Bauwerke erfolgen.

Eine Übersicht über laufende und abgeschlossene Projekte und Arbeitsgruppen, die sich mit Unsicherheiten und ihrer Erfassung und Quantifizierung beschäftigt haben oder befassen, ist in der folgenden Auflistung bzw. in Tab. 1 gegeben.

- FLOODsite: Integrated Flood Risk Assessment and Management Methodologies, EU, 2004–2009
- ProDeich: Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche, BMBF/KFKI, 2000–2002
- MUSE: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste, BMBF/KFKI, 2002–2005
- MUSTOK: Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste, BMBF/KFKI, 2005–2008
  - Charakterisierung der Tidekurve, BMBF/KFKI, 2000–2002
  - Windstauanalysen zur Änderung des Sturmflutklimas in der Nord- und Ostsee, BMBF/KFKI, 1995–1998
  - EAK Arbeitsgruppe 2: Unsicherheit und Bemessung



#### Berechnungsverfahren

Immer schnellere Computer und bessere Berechungsalgorithmen lassen auch probabilistische Berechnungen immer kürzer werden. Trotzdem sind bei einer großen Anzahl von Versagensmechanismen bzw. bei komplexen Berechnungsalgorithmen, die mitunter numerische Modelle erfordern, immer noch sehr umfangreiche und zeitaufwändige Berechnungen erforderlich. Eine Übersicht über den abzusehenden Forschungsbedarf ist daher im Folgenden gegeben (Details siehe Tab. 1):

- 1) Entwicklung neuer Verfahren für die Fehlerbaumanalyse: bei der Analyse der Fehlerbäume wird davon ausgegangen, dass die Versagensmechanismen voneinander unabhängig sind. Dann lässt sich die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit des Top-Events einfach ermitteln. In der Regel ist eine derartige Unabhängigkeit nicht gegeben, so dass eine Korrelation der Versagensmechanismen oder eine gleichzeitige Berechnung des gesamten Fehlerbaums innerhalb einer Monte-Carlo-Simulation verwendet werden muss. Darüber hinaus sind einige Versagensmechanismen zeitabhängig und laufen daher nacheinander ab. Diese zeitliche Koppelung muss ebenfalls berücksichtigt werden. Hier fehlt eine systematische Vorgehensweise zur Erfassung dieser Abhängigkeiten, so dass zukünftige Anwender ohne großen Aufwand die Korrelation einzelner Versagensmechanismen bestimmen bzw. deren zeitliche Abhängigkeit berücksichtigen können. Darüber hinaus muss auch die Einteilung der einzelnen Küsten- bzw. Flussabschnitte systematischer behandelt werden. Hierbei ist noch völlig unklar, wie die Einteilung in einzelne Abschnitte zu erfolgen hat, welche Kriterien hierfür zu befolgen sind, welche Längeneffekte auftreten, und welche Auswirkungen auf ein Gesamtergebnis zu erwarten sind.
- 2) Verbesserungen der Berechnungszeiten bei aufwändigen Simulationen (z.B. Monte-Carlo-Simulationen) durch optimierte Verfahren: Monte-Carlo-Simulationen benötigen je nach der Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses eine unterschiedliche Anzahl von Berechnungen, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Mitunter müssen bei sehr geringen Versagenswahrscheinlichkeiten bis zu einigen Millionen Berechnungen durchgeführt werden. Im Schrifttum gibt es bereits einige anerkannte Verfahren, die die Anzahl der notwendigen Berechnungen verringern. Derartige Verfahren müssen angepasst, erweitert und

- allgemein zur Verfügung gestellt werden, so dass Monte-Carlo-Simulationen deutlich schneller ablaufen können.
- 3) Beispielhafte Durchführung einer vollständigen probabilistischen Bemessung: die zuvor beschriebenen Punkte müssen zu einer vollständigen probabilistischen Bemessung zusammengeführt und auf einen Satz ausgewählter Küsten- und Hochwasserschutzwerke angewendet werden. Dabei wird sich vor allem die Anwendbarkeit neuer oder angepasster Methoden herausstellen bzw. Probleme auftreten, die typischerweise erst bei der ersten Anwendung entdeckt werden. Diese Probleme müssen aufgezeigt und behoben werden. Dabei muss möglichst systematisch vorgegangen werden, so dass im Weiteren derartige Probleme bei der Anwendung reduziert werden. Die Anwendung wird auch zeigen, wie aufwändig die Ermittlung der Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks ist und an welchen Stellen Optimierungsbedarf besteht.
- 4) Entwicklung eines allgemein zugänglichen modularen Software-Tools zur einfachen Durchführung probabilistischer Bemessungen: die Komplexität probabilistischer Methoden birgt bis heute eine gewisse Abschreckung. Derartige Verfahren sind nicht ohne detailliertes Fachwissen und entsprechende Computerunterstützung zu lösen. Hier muss eine Zusammenstellung der vorhandenen Software erfolgen, die detailliert beschreibt, wie die Software aufgebaut ist und welche Charakteristika sie beinhaltet. Darauf aufbauend muss entschieden werden, ob eine vorhandene Software verwendet werden oder weiter ausgebaut werden kann, bzw. ob eine neue modular aufgebaute Software entwickelt werden sollte. Die Software muss ein Modul beinhalten, dass vorhandene geographische Daten sowie Eingangsparameter einlesen und verarbeiten kann, so dass ein minimaler Aufwand für die Dateneingabe vorhanden ist. Rechenergebnisse müssen darstellbar sein und in verschiedene Anwendungen exportierbar (u.a auch GIS, s. Schritt 5). Das Tool muss außerdem erlauben, dass einzelne Versagensmechanismen und auch Teile des Fehlerbaums ausgetauscht werden können. Anwenderschulungen sind vorzusehen.
- 5) Aufbau einer Datenbank für Berechnungsergebnisse und Möglichkeiten der Einbindung in GIS-Systeme: einmal berechnete Streckenabschnitte entlang der deutschen Küsten sollten in einem zentralen Daten-

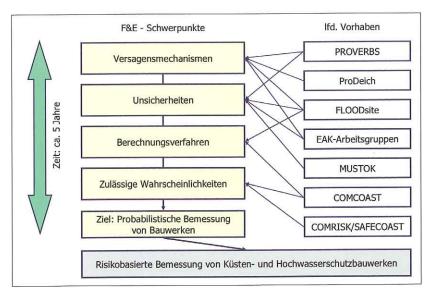


Abb. 4 F+E-Schwerpunkte für eine prohabilistische Bemessung und Zusammenarbeit mit anderen Schwerpunktthemen

bank-System gespeichert und allgemein zugänglich gemacht werden. Hier empfiehlt sich der Aufbau eines webbasierten Systems, in den neue Berechnungsergebnisse eingespeist werden können. Ein derartiges System muss konzeptionell aufgebaut und dann schrittweise umgesetzt werden. Die Datenbanken müssen Schnittstellen vorhalten, so dass Ergebnisse jederzeit in ein GIS übernommen werden können.

Eine Übersicht über laufende Projekte und Arbeitsgruppen, die sich mit der Erstellung von Software-Tools befassen oder Ergebnisse hierzu vorgelegt haben, ist im Folgenden aufgelistet bzw. in Tab. 1 zusammengestellt.

- FLOODsite: Integrated Flood Risk Assessment and Management Methodologies, EU, 2004–2009
- ProDeich: Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche, BMBF/KFKI, 2000–2002

#### Zulässige Wahrscheinlichkeiten

Eine probabilistisch basierte Bemessung kann nur dann Erfolg haben, wenn den berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten zulässige Werte gegenüber gestellt werden können. Derartige Werte sind allerdings bislang in weiten Bereichen nicht aufgestellt worden. Demnach fehlen auch grundsätzliche Überlegungen und ein generelles Konzept zu ihrer Einführung. Der hierfür notwendige Forschungsbedarf ist im Folgenden zusammengestellt:

- 1) Kriterien für die Ableitung zulässiger Versagenswahrscheinlichkeiten für Bauwerke im Küsten-, Ästuar und Flussraum: die Ergebnisse der oben angeführten Berechnungen werden in der Regel als Versagenswahrscheinlichkeit P, pro Jahr für jeden Bauwerksabschnitt vorliegen. Es sind dabei je nach Eingangsparametern Zahlen zwischen  $P_f = 10^{-2}/a$  und  $P_f = 10^{-7}/a$  zu erwarten. Derartige Zahlen sind alleine nicht aussagekräftig und können für eine Bemessung nur dann verwendet werden, wenn Vergleichszahlen vorliegen. So sollte ein gewisser Abschnitt eines Bauwerkes eine Mindest-Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, die u.a. davon abhängt, welche Bedeutung das Bauwerk für die Sicherheit des Hinterlandes besitzt, welchen Wert das Bauwerk selber hat, welche Werte geschützt werden sowie von weiteren Kriterien. Diese Kriterien müssen systematisch erarbeitet und zusammengestellt werden, so dass eine Grundlage entsteht, auf der zulässige Wahrscheinlichkeiten festgelegt werden können. Neben den eigentlichen Kriterien müssen auch Beispiele angegeben werden, wie auf dieser Grundlage zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten festgelegt werden können. Gegebenenfalls ist dies auch für Beispielbauwerke durchzuführen und dann mit herkömmlichen Verfahren zu vergleichen (s. auch Schritt 4).
- Vergleich mit DIN-Normen und probabilistischen Bemessungsansätzen anderer Bauwerke: zulässige Ver-

sagenswahrscheinlichkeiten haben bereits Eingang in die Bemessung anderer Bauwerke (Hoch- und Tiefbau) gefunden. Derartige Bemessungen sind vergleichend heranzuziehen und eine Übertragbarkeit bzw. Vergleichbarkeit ist zu prüfen. Wenn sichergestellt werden kann, dass Verfahren aus anderen Bereichen auf die hier behandelten Fragestellungen übertragbar sind, muss ein Verfahren entwickelt werden, wie derartige Methoden übernommen werden können. Die neue Methodik muss anhand von Beispielen aufgezeigt werden.

- 3) Einbeziehung als Teil einer risikobasierten Bemessung: probabilistische Bemessung wird in weiten Bereichen nur als Teil einer risikobasierten Bemessung verstanden, bei der nicht ein Vergleich der berechneten und zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerks vorgenommen wird, sondern vielmehr das ermittelte Überflutungsrisiko (in der Regel als Produkt der Versagenswahrscheinlichkeit und den ermittelten Folgewirkungen) dem zulässigen Risiko gegenübergestellt wird. Bei dieser Erweiterung wird also das Hinterland des Bauwerks mit in die Bemessung einbezogen, was in sich eine logische und sinnvolle Erweiterung des Bemessungsverfahrens ist. In diesem Schritt soll daher erarbeitet werden, für welche Randbedingungen eine risikobasierte Bemessung Vorteile gegenüber einer probabilistischen Bemessung hat und wann nicht. Hieraus sollten Empfehlungen resultieren, wann der zusätzliche Aufwand einer risikobasierten Bemessung eingegangen werden sollte und unter welchen Bedingungen die probabilistische Bemessung ausreichend ist.
- 4) Vergleich mit deterministischen Bemessungsverfahren: wenn zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt worden sind, muss ein Vergleich erfolgen, wie ein Bauwerk angepasst werden muss, damit es den geänderten Bemessungsrichtlinien entspricht. Die Ergebnisse sind im Einzelnen darzustellen und zu bewerten. Der Vergleich von probabilistischen Verfahren und deterministischen Bemessungsverfahren muss aufzeigen unter welchen Umständen eine probabilistische Bemessung sinnvoll bzw. unvermeidbar ist. Entsprechende Unterschiede in den Bemessungsverfahren sind zu quantifizieren.

Eine Übersicht der laufenden Projekte und Arbeitsgruppen gibt Tab. 1. Der Förderungszeitraum für die hier dargestellten Aufgaben ist sicher nicht unter fünf Jahren anzusetzen. Dabei müssen die verschiedenen Aufgaben interdisziplinär gelöst werden. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Küsteningenieuren, Mathematikern, Grundbauern und Geographen ist hierfür anzustreben. Das hier beschriebene Vorgehen ist in Abb. 4 zusammengefasst.

## Perspektiven nach dem Förderungszeitraum (Fernziel)

Trotz der diversen Vorteile probabilistischer Bemessungsmethoden (Berücksichtigung der stochastischen Natur der meisten relevanten Eingangsparameter, Erfassung der Unsicherheiten in den Modellen und deren Eingangsparametern, bessere Einsicht in das Zusammenwirken komplexer Systeme) sind auch einige Nachteile z.B. in Sexsmith (1999) und Elishakoff (2000) zusammengestellt. Hierin werden vor allem die fehlende Akzeptanz probabilistischer Methoden und ihre notwendige Einbindung in Risikoanalysen genannt, aber auch die häufig unzureichende Datengrundlage wird bemängelt. Trotzdem wird die Verwendung der probabilistischen Verfahren dabei generell befürwortet. Ein großer Nachteil der probabilistischen Verfahren liegt in der Zugänglichkeit, die aufgrund der erforderlichen Softwaresysteme nicht für jedermann möglich ist bzw. eine Hemmschwelle darstellt.

Probabilistische Verfahren sind heute technisch machbar, vor allem, wenn die oben diskutierten Weiterentwicklungen umgesetzt werden können. Für eine Bemessung von Küsten- und Hochwasserschutzwerken im Sinne von Empfehlungen müssen jedoch eine Reihe von weiteren Schritten umgesetzt werden:

- Lösung der noch ausstehenden »technischen« Probleme
- Homogenisierung der Bemessung in den Bundesländern und des Bundes
- Klärung (und ggf. Änderung) gesetzlicher Bestimmungen und Vorgaben
- Bereitstellung des Verfahrens für Behörden und Ingenieurbüros (z.B. web-basierte Software)

Probabilistische Verfahren zielen immer auf eine Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks ab, ohne die dahinter liegenden Gebiete bzw. Überflutungsflächen sowie die Konsequenzen des Versagens zu berücksichtigen (risikobasierte Bemessung). Daher können probabilistische

Methoden immer nur bauwerksbezogene Aussagen machen. Eine Einbeziehung des Hinterlandes wie z.B. im Sinne von risikobasierten Methoden ist daher sinnvoll und wird verschiedentlich auch bereits untersucht oder angewendet. Es ist vor allem vor dem Hintergrund der neuen EU-Richtlinie über die »Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser« in absehbarer Zeit unabdingbar. Das Ziel eines derartigen Vorgehens ist es, die Bedeutung der zu schützenden Gebiete in der Bemessung zu berücksichtigen. Die Bemessung erfolgt dann nicht mehr nur auf der Ebene der Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerkes [Einheit: 1/Jahr], sondern auf der Ebene des Gesamtrisikos einer Überflutung [Einheit z.B.: €/Jahr].

## 7. Überlappungen zu anderen Schwerpunktthemen der HTG

Probabilistische Verfahren benötigen Angaben aus verschiedenen Schwerpunktthemen, die im Sinne einer Bemessung zusammen geführt werden müssen. Die Verbindungen zu anderen Schwerpunktthemen sind daher im Folgenden aufgelistet:

- A1: Sturmflutwasserstände und Seegang: extreme Wasserstände und Seegangsparameter sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sind wesentliche Eingangsparameter für probabilistische Bemessungen
- A2: Morphodynamik im Küsten- und Ästuarraum: langfristige und großräumige Veränderungen können sowohl die Eingangsparameter als auch die am Bauwerk ablaufenden Prozesse entscheidend verändern. Ihre Kenntnis ist daher entscheidend.
- A5: Küsten- und Hochwasserschutz: Mögliche neue Schutzkonzepte oder -systeme müssen in die probabilistische Bemessung einbezogen werden. Eine Zusammenarbeit mit der AG A5 ist daher notwendig.
- A6: Geokunststoffe im Küsten- und Verkehrswasserbau: neue Baustoffe und Bauweisen müssen ebenfalls durch probabilistische Bemessungsverfahren berücksichtigt werden. Die Veränderung des Fehlerbaumes bzw. einzelner Versagensmechanismen für ein Bauwerk durch Einsatz von Geokunststoffen ist zu berücksichtigen.
- B2: Risikobewertung und Risikomanagement: die Einbeziehung probabilistischer Verfahren in eine Risikoanalyse für den Küstenraum ist eine der wesentlichen Erweiterungen der hier diskutierten Methodik. Eine Zusammenarbeit mit der AG B2 ist daher notwendig.

Über die geplanten Forschungsschwerpunkte der HTG hinaus sollten Verbindungen zu Forschungsrichtungen wie IKZM (Integriertes Küstenzonenmanagement), praktischen Notwendigkeiten wie der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und grafischen Darstellungsmöglichkeiten wie GIS oder Risikokartierung diskutiert werden. Insbesondere sind aber die Möglichkeiten und Erfordernisse für eine Umsetzung probabilistischer Verfahren in der Praxis zu diskutieren.

#### 8. Schrifttum

- [1] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt für die Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR). Karlsruhe, Germany, 1993.
- [2] BAW: Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB). BAW, Arbeitsgruppe »Auskleidung von Wasserstraßen«, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 87, 136 S., 1 Anhang, 2004.
- [3] BAW: Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD). Karlsruhe, Germany, 2005.
- [4] Buijs, F.A.; Hall, J.W.; Sayers, P.B.: Exploring sensitivity of flood defence reliability to time-dependent processes. International Seminar on Stochastic Hydraulics (ISSH 2005), IAHR, Nijmegen, The Netherlands, 8 pp, 2005.
- [5] CUR: Probabilistic design of flood defences. Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specification, no. 141, Gouda, The Netherlands, 154 pp, 1990.
- [6] Dawson, R.J.; Hall, J.W.; Nicholls, R.J.; Bates, P.D.; Dickson, M.E.; Walkden, M.J.A.: Efficient broad scale flood risk assessment over multi-decadal timescales, 2005. International Seminar on Stochastic Hydraulics (ISSH 2005), IAHR, Nijmegen, The Netherlands, 8 pp.
- [7] DIN 1054: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Berlin, Germany: Beuth-Verlag, S. 109–191, 1996.
- [8] DIN 4084-100: Böschungs- und Geländebruchberechnungen. Teil 100: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten. Berlin, Germany: Beuth-Verlag, 1. Auflage, S. 215–234, 1996.
- [9] Dücker, H.P.; Oumeraci, H.: Herausforderungen für die Forschung im Küsteningenieurwesen, maritimen und binnenländischen Hafen- und Verkehrswasserbau aus dem Blickwinkel der HTG. HANSA, Jg. 143, Nr. 1, S. 65–72, 2006.
- [10] DVWK: Flußdeiche. Nr. 210, DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Verlag Paul Parey, 1986.
- [11] EAK: Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Heide i. Holst., Germany: Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Heft 65, Boyens & Co., 589 S., 2002.

- [12] EAU: Empfehlungen des Arbeitsausschusses »Ufereinfassungen«, Häfen und Wasserstraßen. Hafenbautechnische Gesellschaft, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 10. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 664 S., 2004.
- [13] Elishakoff, I.: Possible limitations of probabilistic methods in engineering. Applied Mechanics Review, vol. 53, no. 2, pp. 19 –36, 2000.
- [14] Hansen, U.A.: Wasserbausteine im Deckwerksbau Bemessung und Konstruktion. Heide i. Holstein: Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co, 1985.
- [15] HTG; DGGT: Unsere Gewässer Forschung tut Not. Hafenbautechnische Gesellschaft, Hamburg, 23 S., 2004.
- [16] Johnson, E.A.; Hall, J.W.: A risk based model assessment of shingle beach interventions. International Seminar on Stochastic Hydraulics (ISSH 2005), IAHR, Nijmegen, The Netherlands, 8 pp, 2005.
- [17] Jorissen, R.; Litjens-van Loon, J.L.; Lorenzo, A.M.: Flooding risk in coastal areas. An inventory of risks, safety levels and probabilistic techniques in five countries along the North Sea coast. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Road and Hydraulic Engineering Division, W-DWW-2000-090, Delft, The Netherlands, 27 pp., 6 App., 2001.
- [18] KFKI: Forschungskonzept für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen 2001. KFKI, Cuxhaven, 26 S., 2001.
- [19] Kortenhaus, A.; Oumeraci, H.: Probabilistische Bemessungsverfahren und Risikoanalysen. HANSA, Jg. 137, Nr. 11, S. 78–80, 2000.
- [20] Kortenhaus, A.; Wittkop, A.; Weißmann, R.; Richwien, W.; Oumeraci, H.: Bemessungsgrundlagen und Versagensmechanismen für Seedeiche. Projektbericht. Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, 196 S., 2 Anlagen, 2001.
- [21] Kron, W.: Flood risk = hazard x exposure x vulnerability. Keynote lecture, Flood Defense, 2002, Science Press Ltd., New York, NY, USA, pp. 82–97, 2002.
- [22] Kuijper, H.; Vrijling, J.K.: Probabilistic approach and risk analysis. In: Pilarczyk, K.W. (ed.): Dikes and revetments, Rotterdam/Brookfield: A.A. Balkema, pp. 443–462, 1998.
- [23] Oumeraci, H.: Küsteningenieurwesen. In: Lecher, K.; Lühr, H.-P.;Zanke, U. (eds.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Berlin, Germany: Paul Parey Verlag, Kapitel 12, S. 657–743, 2001.
- [24] Patt, H.E.: Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 593 S., 2001.
- [25] Sexsmith, R.G.: Probability-based safety analysis value and drawbacks. Amsterdam: The Netherlands: Elsevier, Journal of Structural Safety, vol. 21, no. 4, pp. 303–310, 1999.
- [26] TAW: Under pressure. Technical Advisory Committee on Water Retaining Structures, Delft, The Netherlands, 60 pp., 5 Appendices, 1995.
- [27] TAW: Guide on sea and lake dikes. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), Delft, The Netherlands, 85 pp., 1999.