

6 KÜSTENSCHUTZ AN DER UNTERWESER VOR DEM HINTERGRUND VON NATURRAUM UND NUTZUNG

Nicole von Lieberman Stephan Mai

6.1 ZUSAMMENFASSUNG

Der Küstenschutz im Unterwesergebiet ist durch dem Ästuarverlauf folgende Deiche mit und ohne Vorland, zahlreichen Sielen und Schöpfwerken und Sperrwerken an den einmündenden Nebenflüssen Geeste, Hunte, Lesum und Ochtum gekennzeichnet. Das Hauptschutzsystem für die Wesermarschen stellen die Deiche, soweit vorhanden, in Verbindung mit den Vorländern dar. Die Zuverlässigkeit der Deiche wurde unter probabilistischen Gesichtspunkten im Teilprojekt „Technik des Küstenschutzes“ des Verbundforschungsvorhabens „Klima und Unterweser (KLIMU)“ für die derzeit gültigen hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen untersucht. An ausgewählten Profilen der Unterweserdeiche wurden die Wiederkehrintervalle eines Versagens, definiert als Überströmung bzw. Wellenüberlauf am Deich, ermittelt. Neben der statistischen Auswertung von Wasserständen und des Windes im Untersuchungsgebiet wurden die für die Zuverlässigkeitsanalyse erforderlichen Seegangparameter in einem numerischen Modell simuliert. Die Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs an Deichen im Weserästuar wird im wesentlichen von der derzeit vorhandenen Deichhöhe bestimmt und beträgt im Mittel mehr als 1.000 Jahre. Prinzipiell zeigt sich, daß die Deiche am rechten Ufer höhere Sicherheiten aufweisen als am linken. Dort sind in einzelnen Querschnitten kleinere als 100-jährige Wiederkehrintervalle zu verzeichnen.

6.2 DEFINITION UND AUFGABE DES KÜSTENSCHUTZES

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

Die Küsten- und Ästuarlandschaften Deutschlands sind heute Kulturlandschaften, die insbesondere von der Technik geprägt wurden. Nur wenige Abschnitte können noch als natürliche Küstenformen betrachtet werden. Die heutige Küstenlinie wurde durch Deichbau und Entwässerung beeinflusst. Sogar Wattlandschaften, die als besonders natürlich eingestuft werden, sind teilweise anthropogen geprägt (FÜHRBÖTER 1974). Aus Erfahrungen mit den örtlichen Gegebenheiten, mit dem Fortschritt der technischen Möglichkeiten sowie mit wissenschaftlichen Erkenntnissen über den wirksamen Schutz der Küsten gegen die zerstörende Einwirkung des Meeres sind mit dem Bau erster Wurtten vor rd. 2.300 Jahren bis heute zahlreiche, sich in ihrer Schutzwirkung ergänzende Küstenschutztechniken entwickelt worden.

Tab. 6.1: Einteilung der Elemente des Küstenschutzes entsprechend ihrer Ausprägung (VON LIEBERMAN 1999)

BEZEICHNUNG	ELEMENTE
Flächige Küstenschutzelemente	Strandauffüllungen Lahnungen Inseln Halligen Außensände Wattflächen Vorländer Dünen
Lineare Küstenschutzelemente	Längs- und Querwerke (Buhnen) Strandauffüllungen Deiche Dünen Riffs
Punktuelle Küstenschutzelemente	Sperrwerke Siele Schöpfwerke

Die einzelnen Elemente des Küstenschutzes können entweder entsprechend ihrer Ausprägung in flächige, lineare oder punktuelle Küstenschutzelemente (Tab. 6.1) oder gemäß ihrer Funktion in

Küstenschutzelemente des Erosionsschutzes, des Hochwasserschutzes, der Binnenentwässerung oder in natürliche Elemente (Tab. 6.2) unterteilt werden.

Taf. 6.2: Einteilung der Elemente des Küstenschutzes entsprechend ihrer Funktion (VON LIEBERMAN 1999)

BEZEICHNUNG	ELEMENTE
Elemente des Erosionsschutzes	Längs- und Querwerke (Buhnen) Strandauffüllung Lahnung
Elemente des Hochwasserschutzes	Deich Sperrwerk
Elemente der Binnenentwässerung	Siel Schöpfwerk
Natürliche Küstenschutzelemente	Insel Hallig Außensand Wattfläche Vorland Düne Riff

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

Halligen wirkt als mehrfach gestaffelte Energieumwandlungszone zwischen dem seeseitigen Wattsockelrand und den Festlandsdeichen mit ihren Vorländern. Die geringen Wassertiefen über dem Watt erzwingen das Brechen des von der Nordsee einlaufenden Seegangs, der somit durch flächenhafte Brandung einen Teil seiner Energie

abgibt und die Haupt- bzw. Landesschutzdeiche nur noch mit reduzierter Wellenhöhe erreicht.

Dieses Prinzip kann auf das System Ästuar übertragen werden. Hier sind Elemente des Erosionsschutzes in Form von Uferbefestigungsmaßnahmen (Steinschüttungen, Spundwände) und Auffüllungen zu finden. Da der Schutz gegen hohe Wasserstände bei Sturmfluten die Hauptaufgabe des Küstenschutzes in einem Ästuar darstellt, bilden Vorländer und Deiche in ihrer Kombination das wesentliche Küstenschutzsystem. In vielen Fällen wirken Deiche bzw. andere Ufersicherungsmaßnahmen, z.B. in Form von Spundwänden, als einzelnes, lineares Schutzelement. In Verbindung mit den Deichen sind Siele und Schöpfwerke zur Entwässerung der niedriger gelegenen Marschen erforderlich. Als natürliche Schutzelemente sind im Ästuar Vorländer und Sände zu finden.

6.3 KÜSTENSCHUTZ IN DER UNTERWESERREGION UND SEINE BEDEUTUNG

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts war die Unterweser stark verwildert und hatte mit mehreren Dezimetern bis wenigen Metern eine gegenüber heute erheblich geringere Wassertiefe. Zahlreiche Sände und Platen spalteten den Fluß in mehrere Arme. Die flußmorphologische Situation der Unterweser veränderte sich im Verlauf der historischen Besiedlungsphasen stetig. Die natürlichen Strömungsverhältnisse führten mehrfach zur Verlagerung der Wesersände, der Abflußarme und damit des Hauptfahrwassers. Der jeweils veränderten morphologischen Situation mußte sich die Besiedlung und der Küstenschutz entsprechend anpassen. Der durch die Weser beidseitig aufgeschüttete Uferwall bot bereits vor der Zeit der Bezeichnung im Sommer Hochwasserschutz und ermöglichte die Bewirtschaftung auf überflutungsgeschützten Flächen.

Die Deiche an der Unterweser hatten im Lauf der Zeit und regional differenziert sehr unterschiedliche Profile und Höhen. Da sich eine einheitliche Organisation des Deichwesens in Form von über-

örtlichen Deichverbänden erst allmählich entwickelte, wurde das Deichbestick zunächst örtlich unterschiedlich nach den dortigen Notwendigkeiten und jeweiligen Einschätzungen hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen sowie den technischen Möglichkeiten festgelegt und entsprechend ausgestattet. Gemeinsames Merkmal aller Deiche ist deren stetige Erhöhung und Verstärkung auch in Anpassung an den steigenden Meeresspiegel.

Der sogenannte „Urdeich“, der 1954 im Unterwesergebiet bei Rade aufgeschlossen wurde, wird auf die Zeit um 1100 geschätzt. Ähnliche wallartige Aufschüttungen mit geringen Höhen von ca. 0,40 m über der Geländeoberkante des 11./12. Jahrhunderts boten wohl ausreichenden Schutz gegen die Weserwasserstände und wurden erst in der zweiten Hälfte des 12. Jahrhunderts auf ca. 1,10 m erhöht (PIEKEN 1991). Dieser Bau von Deichen im Unterwesergebiet stellt den Beginn eines großflächigen Schutzes der Siedlungsgebiete dar.

Im Zuge der Besiedlung bestand, neben dem erforderlichen Schutz vor den Hochwässern der Flüsse durch Deiche, die Notwendigkeit, möglichst früh im Jahr das Wasser aus den unter MThw liegenden Feldmarken herauszubringen und damit die Voraussetzungen für eine Landwirtschaft zu schaffen. Beschränkte man sich vor dem 11./12. Jahrhundert auf Landschaftsbereiche, in denen diese Bedingungen natürlicherweise erfüllt waren, begann mit dem systematischen Deichbau auch eine planmäßige Entwässerungstechnik; zunächst durch ein System aus Abzugsgräben, später in Form von Sielen und Schöpfwerken.

Historischen Angaben (z.B. PREUSS 1976) zufolge, war die Weser um 1200 nahezu vollständig durch sehr niedrige wallartige Gebilde mit Sommerdeichcharakter bedeckt. Die Deichlinien waren im Vergleich zu heute noch nicht fixiert; die Stromverlagerungen der Weser setzten sich fort und zwangen immer wieder zu entsprechender Verlegung der Schutzdeiche. Seit dem 12./13. Jahrhundert wirkte sich der Meeresspiegelanstieg durch zunehmende Vernässung des Landes aus. Zudem verstärkten sich während des 13. Jahrhunderts die Sturmfluten im Gebiet der deutschen Nordseeküste in Häufig-

keit und Intensität. Sturmflutkatastrophen führten im ausgehenden 13. und 14. Jahrhundert zu großen Meereseinbrüchen zwischen Dollart und Jade. Die pleistozäne Rinne diente dabei „als Einfallspforte für die Fluten“ (KRÄMER 1984). Wasserdurchbrüche von der Jade zur Weser führten zu erheblichen Land- und Siedlungsverlusten. Erst im 15. Jahrhundert nahm die Häufigkeit und Stärke der Sturmfluten ab. Für das 17. Jahrhundert können Höhen von Winterdeichen von 2,40 m bis 3,60 m sowie für das

beginnende 18. Jahrhundert von 4,80 m über der Geländeoberkante mit zugehörigen Deichaufstandsflächen von 9 m, 17 m bzw. 21 m nachgewiesen werden.

Mit dem Ziel, Deiche und Vorländer besser zu schützen und durch Einhaltung von Mindestgeschwindigkeiten die laufende Räumung des Fahrwassers sicherzustellen, wurden seit dem 18. Jahrhundert Buhnen zur Regulierung der Strömungsverhältnisse in der Weser angelegt.

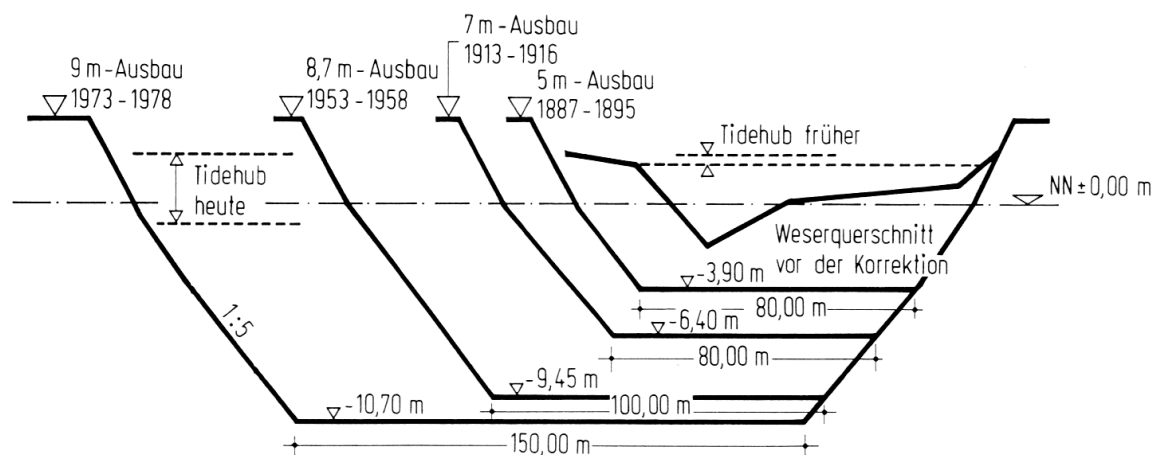


Abb. 6.1: Ausbauquerschnitte der Unterweser für die verschiedenen Ausbauphasen bei UW-km 11, Hasenbühnen (WETZEL 1987)

Mit dem Ende des 19. Jahrhunderts setzten zur Sicherstellung der Schifffahrt in Bremen verstärkt Maßnahmen zur Korrektur der Unterweser ein. Abb. 6.1 gibt einen Überblick über die Unterweserquerschnitte bis zum Beginn der 80er Jahre. Die Ausbauten der Unterweser haben die hydrologischen Verhältnisse nachhaltig beeinflusst: Der Tidehub betrug um 1882 zwischen 0,13 m und 3,32 m in der Unterweser und erhöhte sich auf ca. 4 m auf der gesamten Länge der Unterweser (Abb. 6.2), da die Tide heute von der Mündung bis zum Neuen Weserwehr bei Bremen nahezu frei in die Unterweser einschwingen kann. Die Tidewelle läuft bei mittleren Verhältnissen ohne Ausuferungen bis

zum Weserwehr in Bremen und ungehindert durch die Sperrwerke in die Nebenflüsse Hunte, Lesum, Ochtum ein. Die Sperrwerke wurden 1979 in Betrieb genommen, um dafür zu sorgen, daß bestimmte Wasserstände in den Nebenflüssen nicht überschritten werden. Durch den Bau der drei Sperrwerke wurde die sturmflutgefährdete Deichlinie um 38 km an der Lesum, um 22 km an der Ochtum und um 53 km an der Hunte verkürzt (FREIE HANSESTADT BREMEN 1995, S. 5). Bei Sturmfluten werden die Sperrwerke geschlossen, so daß die entsprechenden Fluträume (Retentionsräume) der Nebenflüsse nicht mehr zur Verfügung stehen.

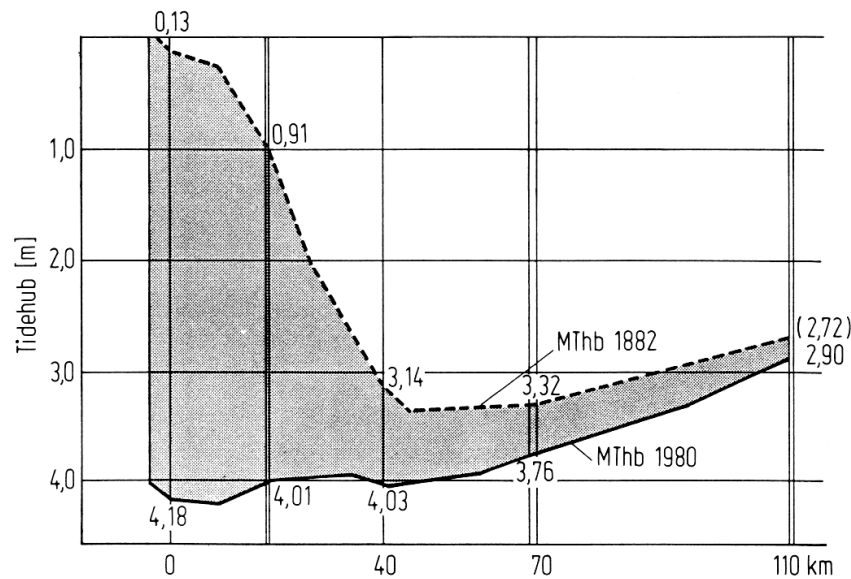


Abb. 6.2: Die Entwicklung der Tidehubs in der Weser (WETZEL 1987)

Die Unterweser wird heute links und rechts des Ufers von einer geschlossenen Linie überwiegend 1:6 (Außenböschung) geneigter, grüner Deiche umgeben. Am rechten Ufer sind den Hauptdeichen teilweise Sommerdeiche mit Höhen zwischen NN + 3,50 m und NN + 4,40 m vorgelagert. Rings um die Strohauser Plate und den Harriersand befinden sich ebenfalls Sommerdeiche. Die Darstellung der Deichlängsschnitte (Abb. 6.3 und 6.4) zeigt, daß die Deiche entlang der Unterweser gemäß heutiger Bemessungspraxis in einigen Bereichen des linken Weserufers, insbesondere im Anschluß an Sielauslässe, Fehlhöhen aufweisen. Den Deichen ist teilweise ein Vorlandbereich mit einer Breite bis rd. 1.250 m vorgelagert.

6.4 BEURTEILUNG DER DERZEITIGEN VERSAGENS-WAHRSCHEINLICHKEIT VON DEICHEN MIT HILFE EINES PROBABILISTISCHEN ANSATZES

6.4.1 METHODIK UND ANGEWANDTES MODELL

Methode der Risikoanalyse

Ein Instrument für eine Beurteilung der Sicherheit einzelner Küstenabschnitte und Schutzsysteme bietet die Risikoanalyse. Der Begriff "Risiko" faßt die Wahrscheinlichkeit des Versagens eines Küstenschutzsystems und die daraus folgenden Konsequenzen zusammen (Risiko = Wahrscheinlichkeit x Konsequenz bzw. Schadenshöhe):

- Das Schutzsystem wird als Ganzes beschrieben, d.h. entgegen heutiger Bemessungspraxis wie die Länge des Schutzsystems bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit einbezogen.

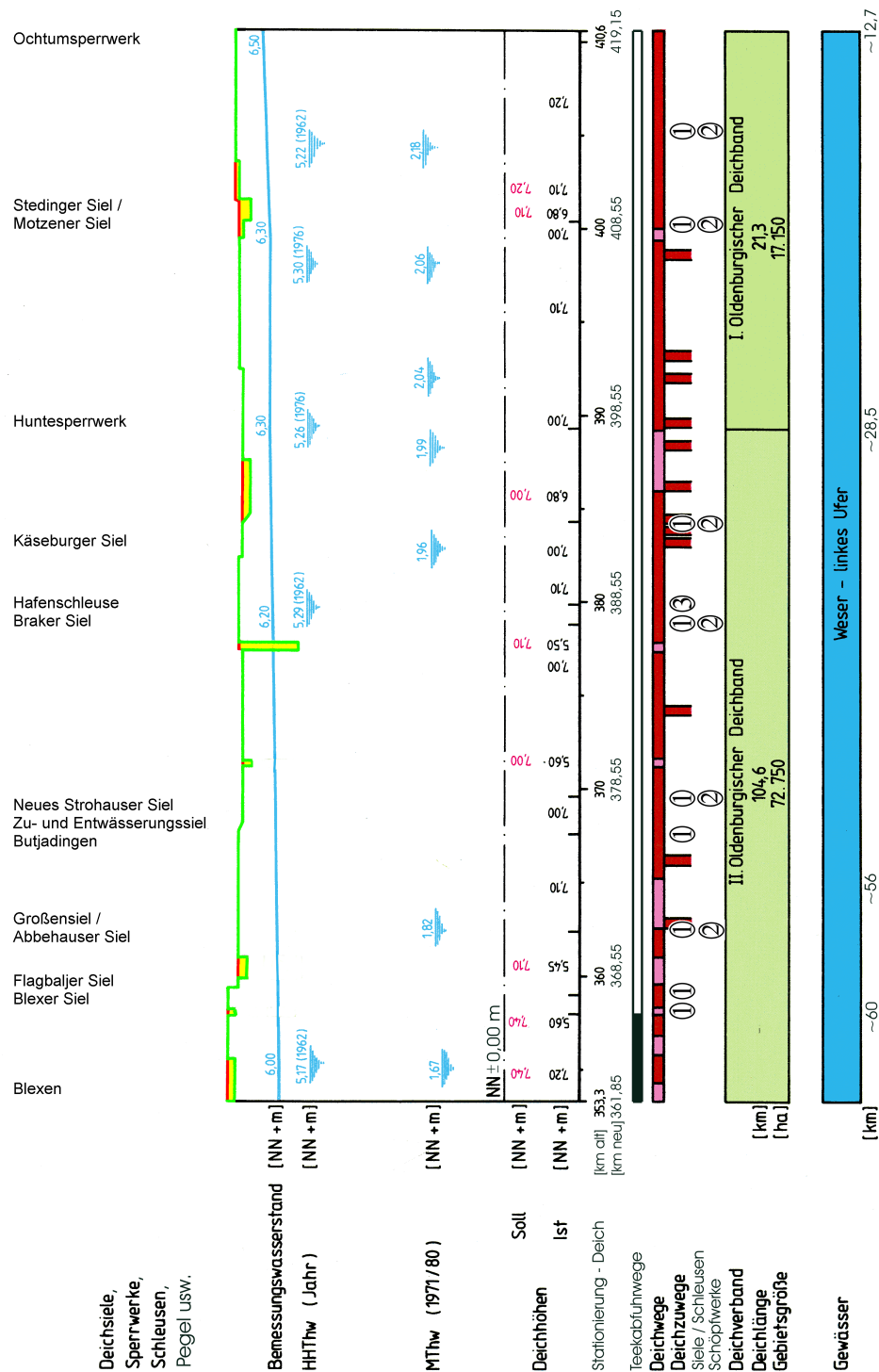


Abb. 2.3: Deichlängsschnitt des linken Weserufers (in Anlehnung an: BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS 1997 / NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM, o.Jg.)

- Die Küstenschutzelemente als Komponenten des Gesamtsystems können berücksichtigt und aufeinander abgestimmt werden.
- Die Methode ermöglicht einen Einblick in die Sensitivität der Versagenswahrscheinlichkeit gegenüber Änderungen der Belastungen und der Zusammensetzung des Schutzsystems.
- Mit diesem Instrumentarium können Prioritäten bei der Verbesserung des heutigen Schutzsystems gesetzt werden.

Bei der Beurteilung der Sicherheit eines Küstenschutzsystems wird zwischen Versagen (*failure*) und Zusammenbruch (*collapse*) des Schutzsystems unterschieden. Versagen eines Küstenschutzsystems bedeutet das Nichterfüllen der Aufgabe, für die es erstellt wurde. Im Fall des Deiches bedeutet dies die Nichterfüllung seiner Funktion als Schutz des Hinterlandes gegen Überflutung, z.B. bei Überströmen bzw. Wellenüberlauf. Zusammenbruch geht einher mit einer vollständigen Zerstörung des Schutzsystems, welche dieses auf Dauer funktionsunfähig macht, z.B. nach Erosion des Deiches.

Ziel eines Küstenschutzsystems muß es sein, für die Lebensdauer eine ausreichend geringe Wahrscheinlichkeit des Versagens bzw. des Zusammenbruches aufzuweisen. Zur Aussage über die Höhe der Wahrscheinlichkeit dient die Risikoanalyse. Die Risikoanalyse erfordert zunächst eine Zusammenstellung der Belastungsereignisse und Versagensmechanismen.

Zu den Belastungen eines Küstenschutzsystems zählen Tidewasserstände und Seegang. Die Versagensmechanismen beschreiben die verschiedenen Möglichkeiten des Eintretens von Versagen bei vorgegebener Belastung eines Küstenschutzbauwerks. Beim Deich sind dies z.B. Überströmen/Wellenüberlauf bzw. Erosion der Böschungen. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Versagens ist die mathematische Beschreibung der Versagensmechanismen sowie die Festlegung des Grenzzustandes zwischen Versagen und Nicht-Versagen erforderlich. Aus der Versagenswahrscheinlichkeit folgt nach Abschätzung der Folgen des Versagens die Ermittlung des Risikos.

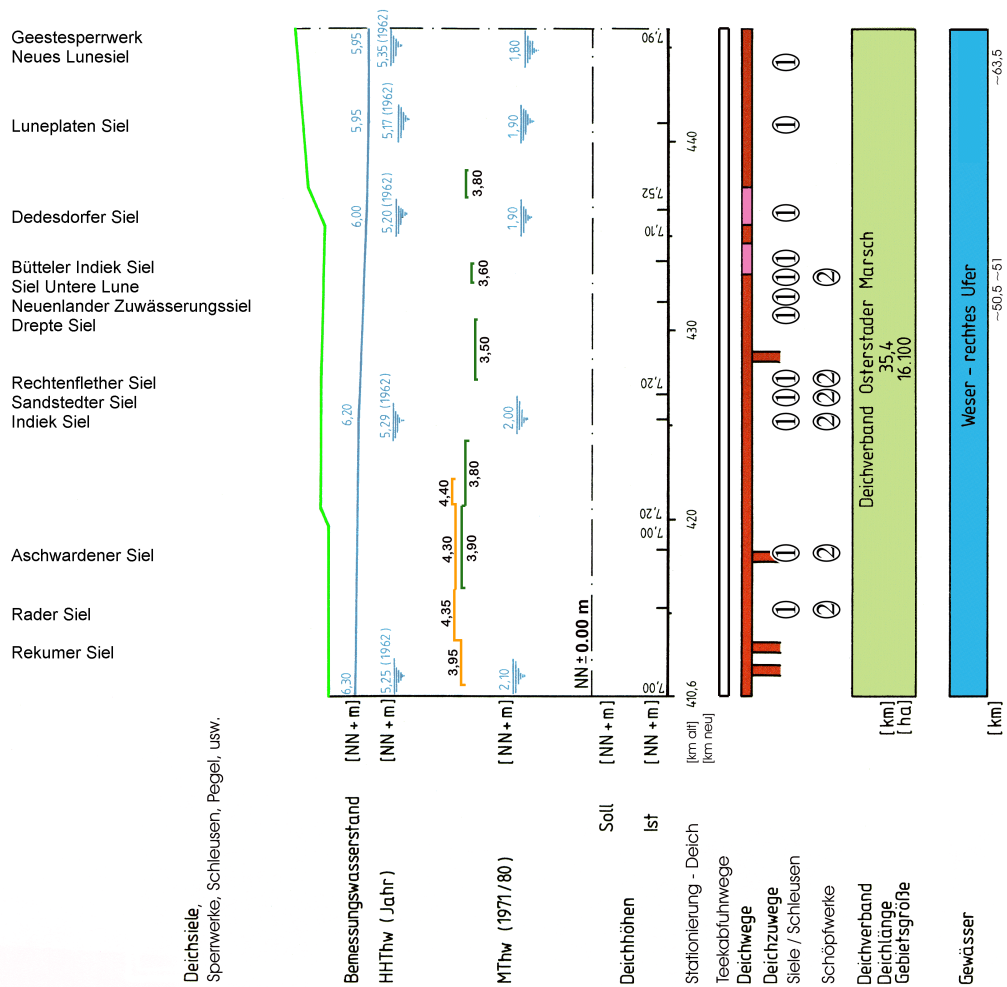
Bei der Beurteilung der Schutzsysteme werden parallel angeordnete und seriell angeordnete Systeme unterschieden (Abb. 3.1). Bei Seriensysteme-

men führt das Versagen eines einzelnen Teilsystems zum Versagen des Gesamtsystems. So stellen z.B. verschiedene Deichabschnitte, welche denselben Küstenraum vor Überflutung schützen, ein Seriensystem dar, weil ein Versagen eines Deichabschnittes zum Versagen des Gesamtsystems führt. Bei Parallelsystemen kann ein Versagen eines Schutzelementes durch die anderen (teilweise) kompensiert werden, z.B. System aus zwei Deichlinien.

Für die probabilistische Berechnung ist die mathematische Formulierung der Versagensmechanismen in Form sogenannter Zuverlässigkeitsfunktionen Z erforderlich. Die Zuverlässigkeitsfunktion ist so gewählt, daß $Z = 0$ den Grenzzustand beschreibt und $Z < 0$ Versagen bedeutet. Die Zuverlässigkeitsfunktion ist abhängig von sogenannten Basis-Variablen, welche Bedeutung (z.B. Wasserstand, Seegang) und die Küstenschutzelemente (z.B. Deichneigung, Deichhöhe) beschreiben. Diese Variablen sind stochastische Variablen, d.h. wahrscheinlichkeitsverteilte Größen.

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit aus der Zuverlässigkeitsfunktion und den statistischen Eigenschaften der Basisvariablen werden folgende Methoden unterschieden (CUR 1990):

- Stufe III: Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit werden die vollständigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der stochastischen Variablen eingeführt und der unter Umständen nicht-lineare Charakter der Zuverlässigkeitsfunktion berücksichtigt.
- Stufe II: Bei dieser Bewertungsstufe werden einige Näherungen eingeführt, so werden die Zuverlässigkeitsfunktionen linearisiert und alle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen als normalverteilt angenommen.
- Stufe I: Heutiger Bemessungsstandard



LEGENDE zu Abb. 2.2 und 2.3



Abb. 6.4: Deichlängsschnitt des rechten Weserufers (in Anlehnung an: NMELF/ DER SENATOR FÜR DAS BAUWESEN DER FREIEN HANSESTADT BREMEN, 1979 / BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS, 1997 / NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM, o.Jg.)

Angewandtes Modell

Die für die Abschätzung des Gefährdungspotential für die Küstenschutzsysteme erforderlichen See-

gangsgrößen wurden in zwei Teilgebietsmodellen mit dem numerischen Simulationsprogramm

SWAN (*Simulation Waves Nearshore*) der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DELFT bestimmt.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Versagens, hier in Form eines Wellenüberlaufs wird im vorliegenden Fall aus der Belastung am Deich, d.h. Wasserstand, Seegang, Wellenauflauf und Wellenüberlaufmenge, aus den natürlichen Randbedingungen am seeseitigen Rand des Schutzsystems, aus numerischen Seegangssimulationen sowie Berechnungen des Wellenauflaufs/-überlaufs nach der Stufe-II-Methode bestimmt. So ist die Belastung aufgrund ihrer Abhängigkeit von stochastischen, hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen eine wahrscheinlichkeitsverteilte Größe und auch die Belastbarkeit von Küstenschutzsystemen ist wahrscheinlichkeitsverteilt. Damit ist die Zuverlässigkeit ebenfalls eine stochastische Variable.

Die für die Simulation von Seegangsgößen im Teilgebiet 2 (Unterweser) erforderlichen Eingangsgößen am oberen Rand des Teilgebietes werden den Ergebnissen der Seegangssimulationen des Teilgebietes 1 (Jade/Außenweser) entnommen (VON LIEBERMAN & MAI 1999).

Die Berechnung der Seegangausbreitung erfolgt mit dem zweidimensionalen Modell SWAN unter Berücksichtigung der Impulserhaltung unter Anwendung der Methode der Finiten Differenzen in einem orthogonalen, äquidistanten Rechengitter (50 m x 50 m; im deichnahen Bereich: eindimensionale Auflösung 1 m).

Mit diesem Programm können die Flachwassereffekte *Shoaling* und Refraktion berücksichtigt werden. Die Generierung von Wellen wird als eine Folge von Windeinwirkung angenommen. Dissipative Prozesse infolge von Bodenreibung, Wellenbrechen und Wellenblocken sowie die Umverteilung der spektralen Energie werden durch nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Wellen berücksichtigt.

Das Seegangmodell SWAN ist ein spektrales Modell, d.h. der Seegang wird durch ein richtungabhängiges Seegangsspektrum beschrieben.

Das Wellenimpulsdichtespektrum $N(\sigma, \theta)$ wird durch den Quotienten von Seegangenergiedichtespektrum $E(\sigma, \theta)$ und relativer Frequenz σ beschrieben. Für den Fall, daß keine Kopplung des Seegangmodells mit einem Strömungsmodell erfolgt (vgl. VON LIEBERMAN & MAI 1999) ist die relative Frequenz σ gleich der Wellenfrequenz ω . Die relative Frequenz σ und die Wellenrichtung θ (senkrecht zu den Wellenkämmen) sind unabhängige Größen:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1)$$

mit:

$N(\sigma, \theta)$	Wellenimpulsdichtespektrum
$E(\sigma, \theta)$	Seegangsimpulsdichtespektrum
σ	relative Frequenz
θ	Wellenrichtung

Die spektrale Impulserhaltungsgleichung, die dem Seegangmodell SWAN zugrunde liegt, lautet für jeden einzelnen Gitterpunkt:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x \cdot N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y \cdot N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma \cdot N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta \cdot N)}{\partial \theta} = S \quad (2)$$

mit:

S	Quellterm
$c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$	Wellenfortschrittsgeschwindigkeiten

Der erste Term der Gleichung beschreibt die Änderung der Impulsdichte über die Zeit. Der zweite und dritte Term stellen die räumliche Ausbreitung des Impulses (mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung) dar, während der vierte Term die Verschiebung der relativen Frequenz aufgrund Änderungen der Tiefen und Strömungen repräsentiert. Der folgende Term steht für die tiefen- und strömungsinduzierte Refraktion mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_θ in θ -Richtung. Die Ausdrücke der Ausbreitungsgeschwindigkeiten basieren auf der linearen Wellentheorie (Ris 1997).

Ausgehend von den auf numerischem Wege ermittelten Seegangsgößen kann in Abhängigkeit von der Beschaffenheit und des Querschnittes einzelner Deichabschnitte der Wellenauflauf be-

stimmt werden. Den Berechnungen dieser Veröffentlichung wurde die Formel nach BATTJES (1971) zugrundegelegt:

$$R_{98\%} = \gamma \cdot 0,75 \cdot \frac{1}{n} \cdot T_m \cdot \sqrt{g \cdot H_s} \quad (3)$$

mit:

1:n	Deichneigung
H_s	signifikante Wellenhöhe am Deichfuß
T_m	mittlere Wellenperiode am Deichfuß
g	Erdbeschleunigung
γ	Beiwert zur Berücksichtigung – der Oberflächenbeschaffenheit, – des Einflusses der Wassertiefe auf die Wellenstatistik – des Einflusses einer Berme – der Wellenanlaufrichtung

hier: $\gamma \approx 1$ (vgl. VAN DER MEER & JANSSEN 1994, Gleichungen 13 und 14)

Ein Vergleich der Höhe des Wellenauflaufes bei definierten Wasserständen mit der aktuell vorhandenen Deichhöhe erlaubt die Ermittlung der Zuverlässigkeit eines betrachteten Querschnittes:

$$Z = h_D - h_A \quad (4)$$

mit:

Z	Zuverlässigkeit
h_D	Deichhöhe
h_A	Höhe Wellenauflauf

Die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Wellenauflaufes (für $Z < 0$) gibt die Wahrscheinlichkeit des Versagens eines Deichquerschnittes wieder und kann als Wiederkehrintervall dargestellt werden. (3)

6.4.2 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Abb. 6.5 stellt exemplarisch ein Ergebnis der Seegangssimulationen des Teilgebietes 2 (Unterweser) mit den hydrologischen/meteorologischen Eingangsgrößen

- Wasserstand = 2 mNN
- Windgeschwindigkeit = 24 m/s
- Windrichtung = 0° (aus nördlicher Richtung)

dar. Zu erkennen ist der Seegang, der windbedingt zunächst auf das rechte Weserufer trifft. Dort sind Wellenhöhen bis zu 0,50 m zu verzeichnen. Stromauf der Unterweser nimmt die Wellenhöhe bei Bremen auf rd. 0,10 m ab. Höhere Wellen treten nur im Bereich zwischen Dedesdorf und Sandstedt in der Hauptrinne der Weser mit Höhen bis zu rd. 0,70 m auf. Insgesamt ist aus den Ergebnissen der Seegangssimulation in der Unterweser keine deutliche räumliche Abhängigkeit der Wellenhöhe erkennbar. Maximale signifikante Wellenhöhen treten in der Regel im Bereich der Strohauser Plate auf. Der Seegang ist überwiegend von der Wassertiefe und der lokalen Windwirklänge (*fetch*) bestimmt.

Die Abb. 6.6 und 6.7 stellen Wellenhöhen in der Rinnenmitte des Ästuars und auf dem Vorland (d.h. am Deichfuß) in Abhängigkeit von Wasserstand (Thw), Windgeschwindigkeit (FF) und insbesondere Windrichtung (DD) an ausgewählten Deichprofilen entlang der beiden Weserufer zwischen UW-km 64,5 und UW-km 27,5 dar.

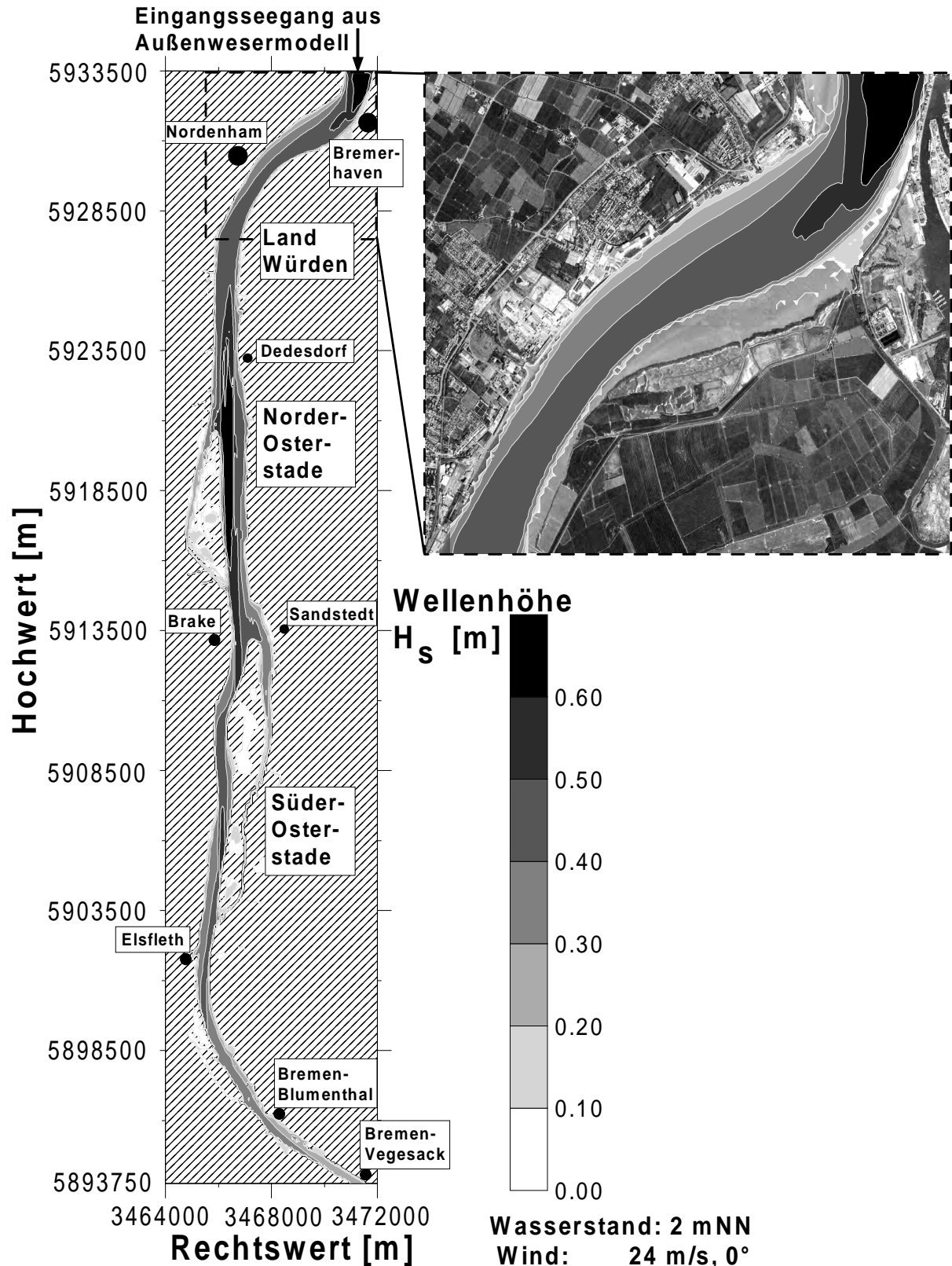


Abb. 6.5: Beispiel einer Seegangsausbreitungsrechnung in der Unterweser (Wasserstand = 2 mNN, Windgeschwindigkeit = 24 m/s, Windrichtung von 0°)

Für den nördlichsten Punkt in Rinnenmitte bei UW-km 64,5 zeigen sich Wellenhöhenmaxima für alle Windstärken und Wassertiefen bei Windrichtungen von ca. 240° bzw. ca. 60°, da in diesen Fällen die Windwirklänge ihr Maximum in Flußrichtung erreicht. Zwischen ca. UW-km 55 und UW-km 35 verschieben sich die Maxima entsprechend der maximalen Windwirklängen auf die Richtungen 180° bzw. 0°. Unterhalb Bremen (UW-km 31,5 bis UW-km 27,5) ändert sich die Lage der Wellenhöhenmaxima erneut. Windrichtungen von ca. 330° bzw. 150° erzielen hier den maximalen *fetch*.

Die Wellenhöhen auf den Vorländern der Unterweser (dargestellt jeweils am Deichfuß, Abb. 6.7) weisen im Vergleich zu den Wellen in Rinnenmitte (Abb. 6.6) keine eindeutig richtungsabhängigen Maxima auf. Der Seegang wird vielmehr in Abhängigkeit von der Vorlandhöhe und -breite im Vergleich zum Seegang in Rinnenmitte reduziert.

Für einen Wasserstand von 0 mNN werden nur die Vorländer bei UW-km 54 und UW-km 31,5 vom Seegang erreicht. In beiden Fällen weist das Vorland nur eine geringe Breite auf.

Aus den Ergebnissen der Seegangssimulationen wie sie in den Abb. 6.5 bis 6.7 dargestellt sind und unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Winden und Wasserständen (Abb. 6.8) wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit der Wellenhöhen in der Mitte des Weserästuars und auf dem Vorland (Abb. 6.9) bestimmt. Diese Größen bilden die Basis zur Ermittlung des Wellenauflaufes und seines Eintretens. Unter Anwendung der in Gleichung 4 dargestellten Funktion der Zuverlässigkeit

als Differenz zwischen Deichhöhe und der Höhe des Wellenauflaufes wurde die in Abb. 6.10 dargestellte Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeitsfunktion ermittelt. Der grau schattierte Bereich stellt die Fälle eines Versagens, das heißt ein Überlauf der ausgewählten Deichprofile dar. Im Mittel liegt das rechnerische Wiederkehrintervall der einzelnen Deichabschnitte bei rd. 3.000 Jahren, während für das Profil bei UW-km 59,5 am rechten Weserufer ein extrem hohes Wiederkehrintervall von rd. 60.000 Jahren ermittelt wurde.

In Abb. 6.11 sind die Ergebnisse der Wiederkehrintervalle eines Versagens (Wellenüberlauf) von insgesamt 24 entlang des rechten und linken Weserufer ausgewählten Deichprofilen zusammengestellt. Die Darstellung verdeutlicht, daß die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Deiche im Weserästuar im wesentlichen von der derzeit vorhandenen Deichhöhe bestimmt wird.

Prinzipiell zeigt sich, daß die Deiche am rechten Ufer höhere Sicherheiten aufweisen als am linken. Am Braker Siel (ca. UW 42,5 km) beträgt das Wiederkehrintervall aufgrund der geringen Deichhöhe von nur 5,50 mNN nur rd. 40 Jahre. Abgesehen von diesen Ausnahmen können die Deiche des Ästuars derzeit als sicher eingeschätzt werden. Die Deichhöhen am rechten Ufer im Bereich Bremerhaven-Süd (ca. UW-km 59,5), Neues Lunesiel (ca. UW-km 62) und der Luneplate (ca. UW-km 59,5) führen zu größeren als 6.000-jährigen Wiederkehrintervallen und können daher sogar als „überdimensioniert“ eingestuft werden.

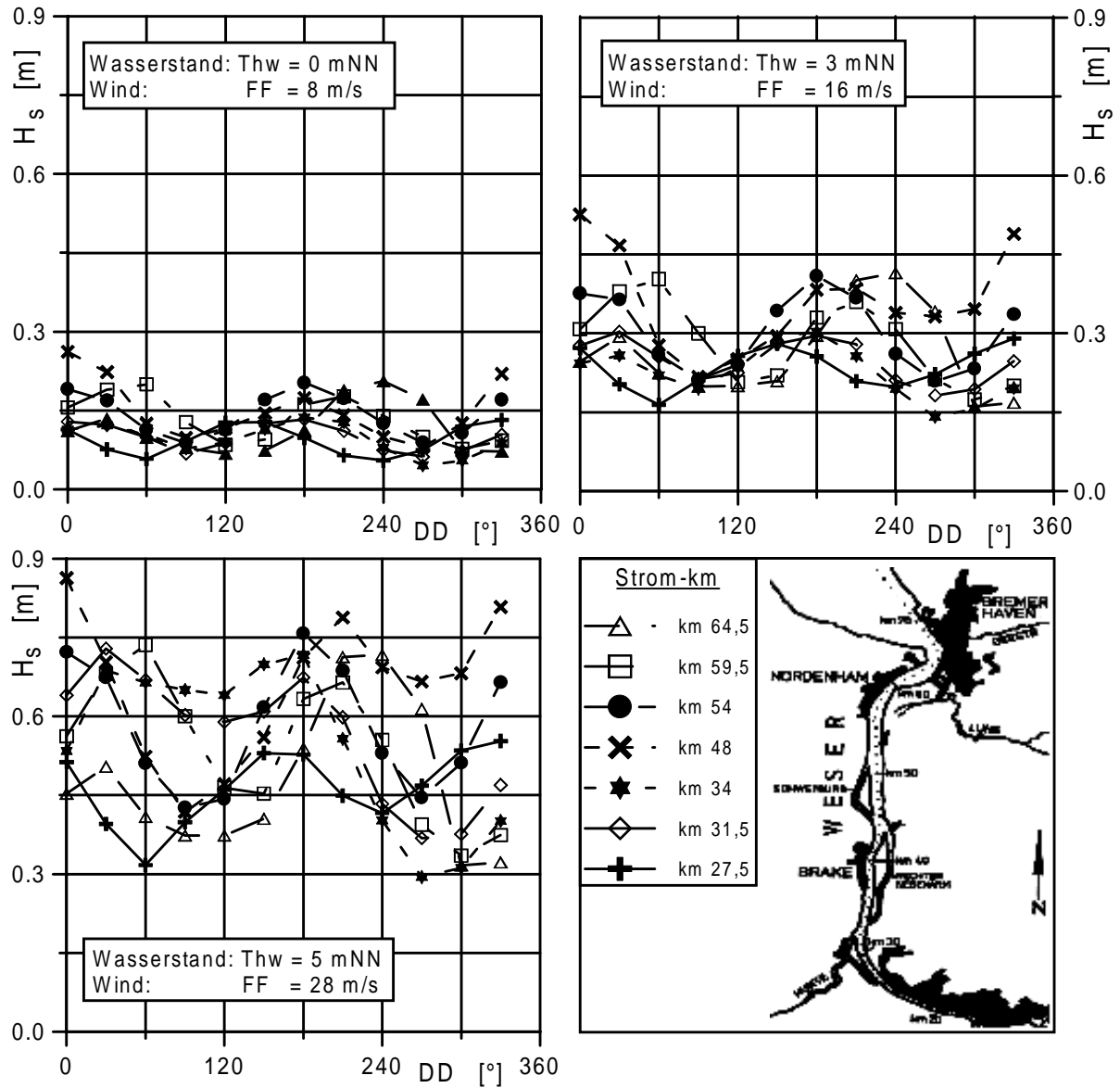


Abb. 6.6: Richtungsabhängigkeit des Seegangs in Rinnenmitte des Ästuars (Windstärken 8 m/s, 16 m/s, 28 m/s; Wasserstände 0 mNN, 3 mNN, 5 mNN)

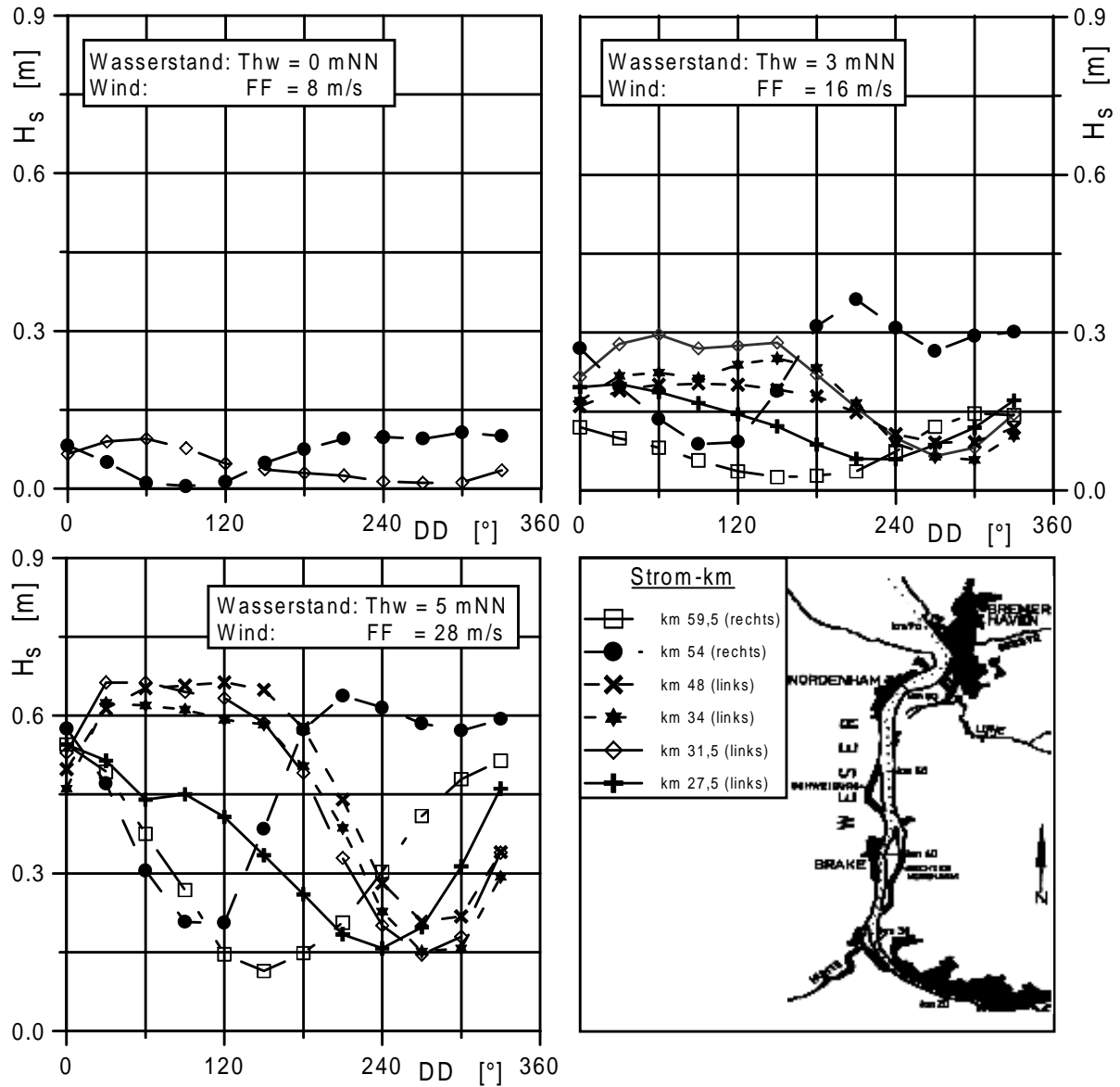


Abb. 6.7: Richtungsabhängigkeit des Seegangs auf dem Vorland (Windstärken 8 m/s, 16 m/s, 28 m/s; Wasserstände 0 mNN, 3 mNN, 5 mNN)

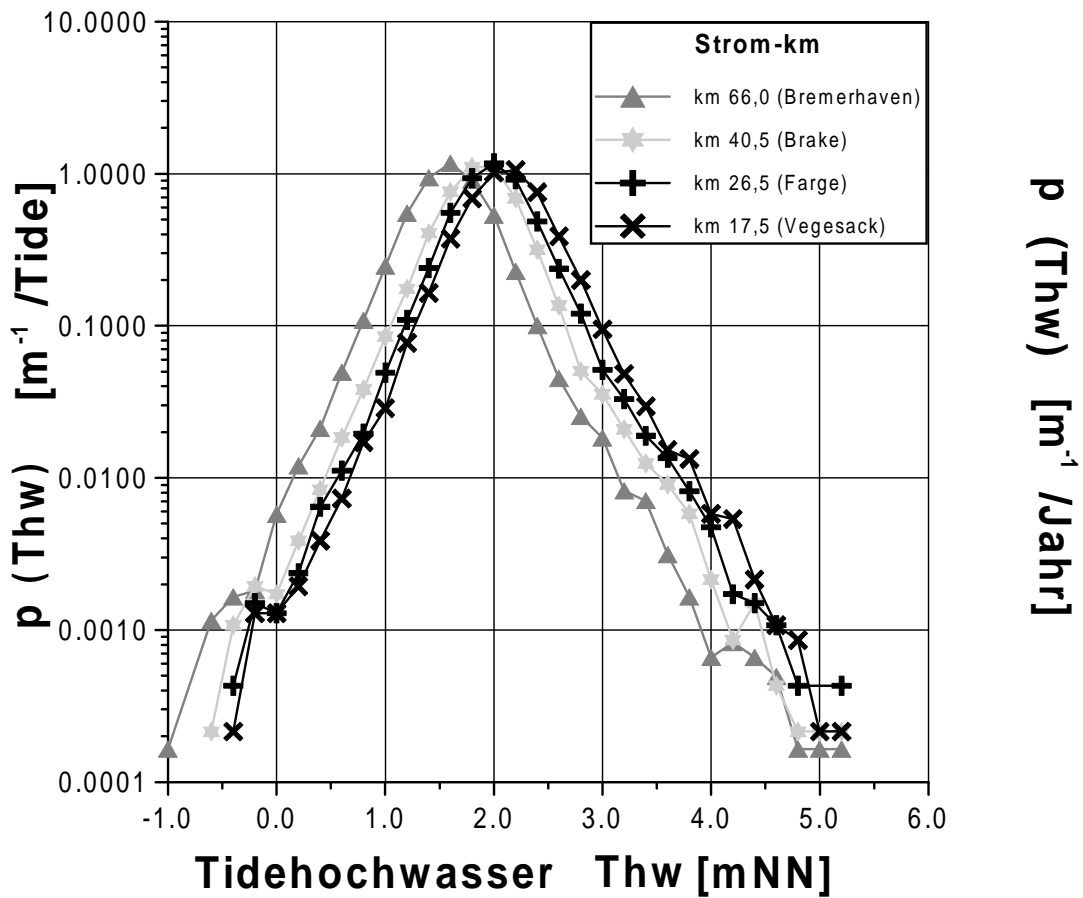
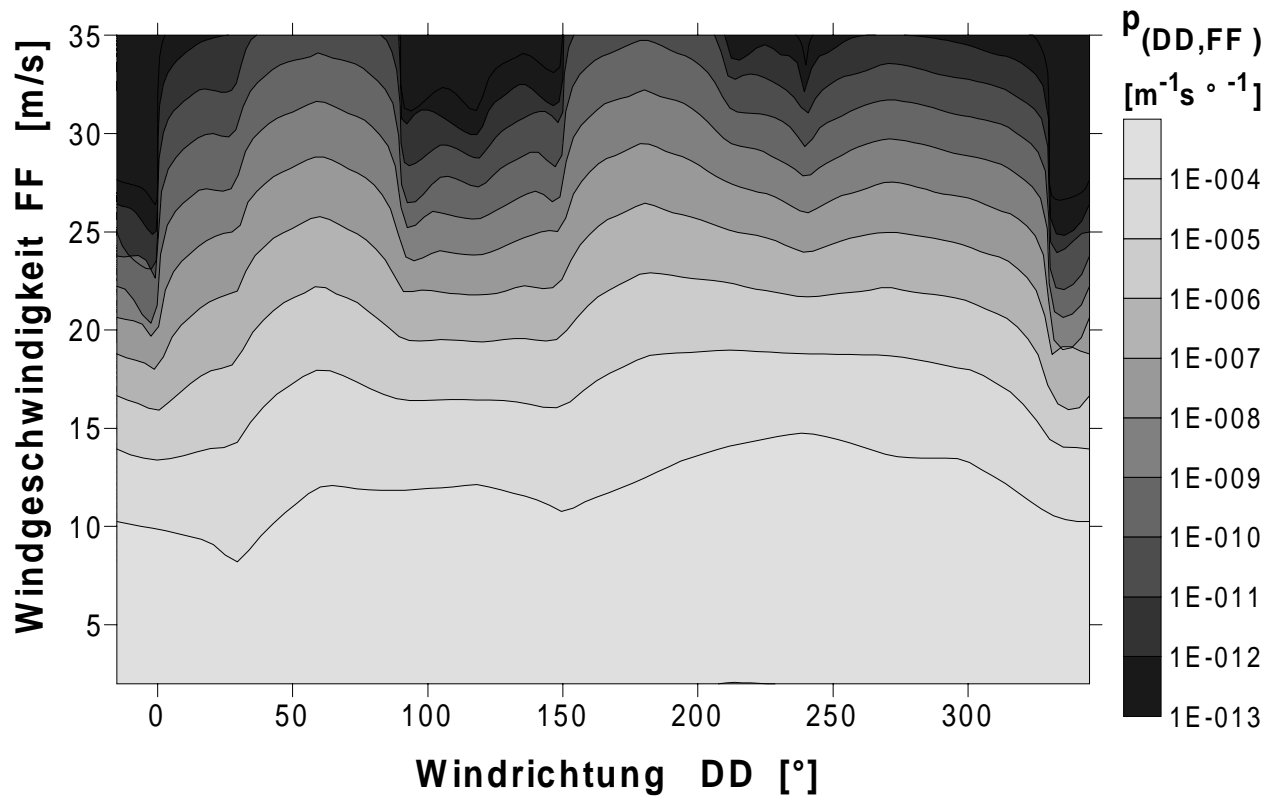


Abb. 6.8: Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wind (oben) und Wasserständen (unten) im Untersuchungsgebiet

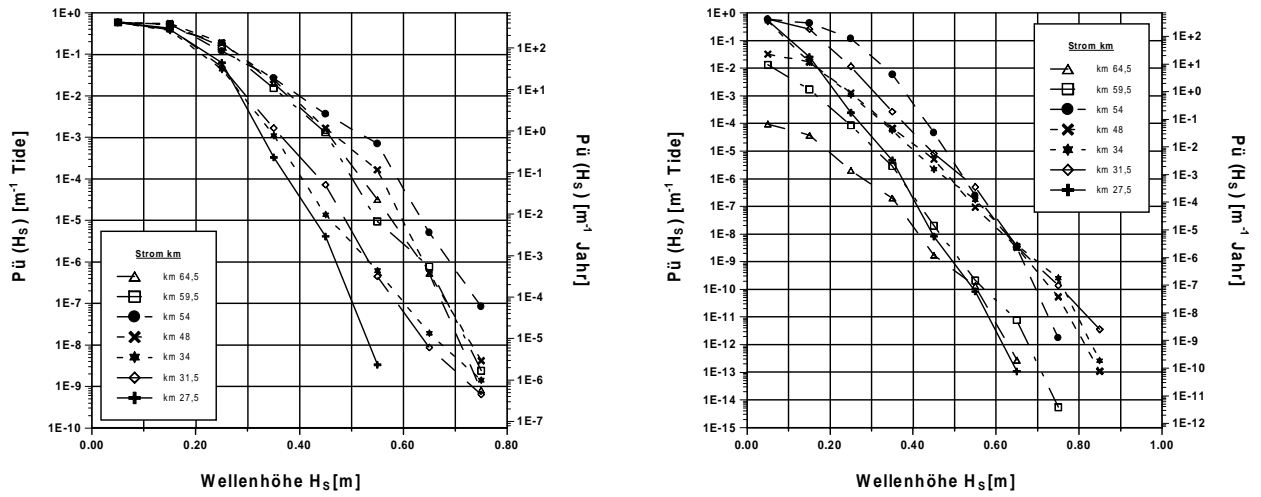


Abb. 6.9: Überschreitungswahrscheinlichkeit von Wellenhöhen (Rinnenmitte des Weserästuars (links) und auf dem Vorland (rechts))

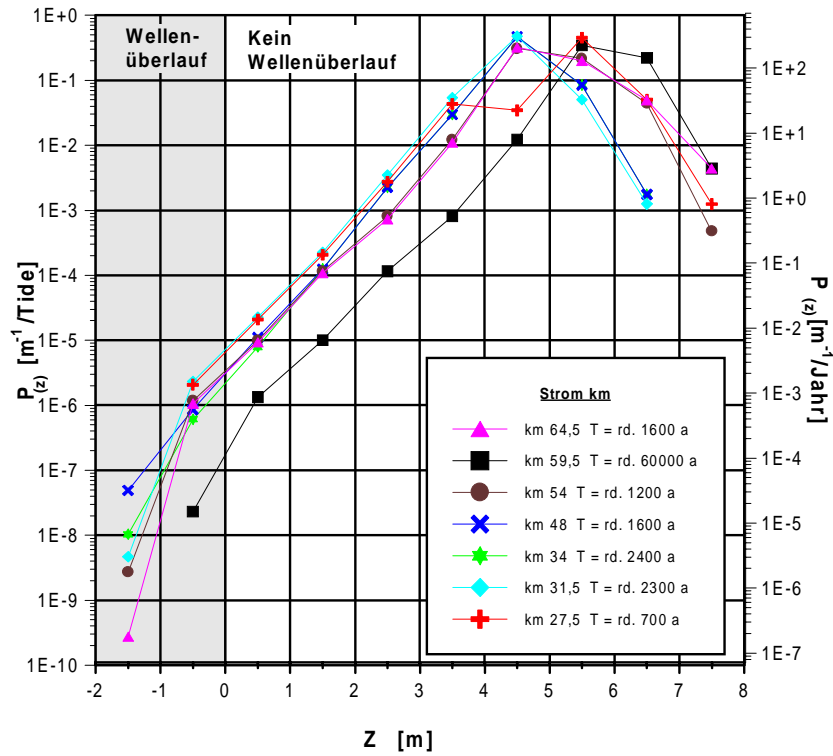


Abb. 6.10: Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeitsfunktion eines Wellenüberlaufs

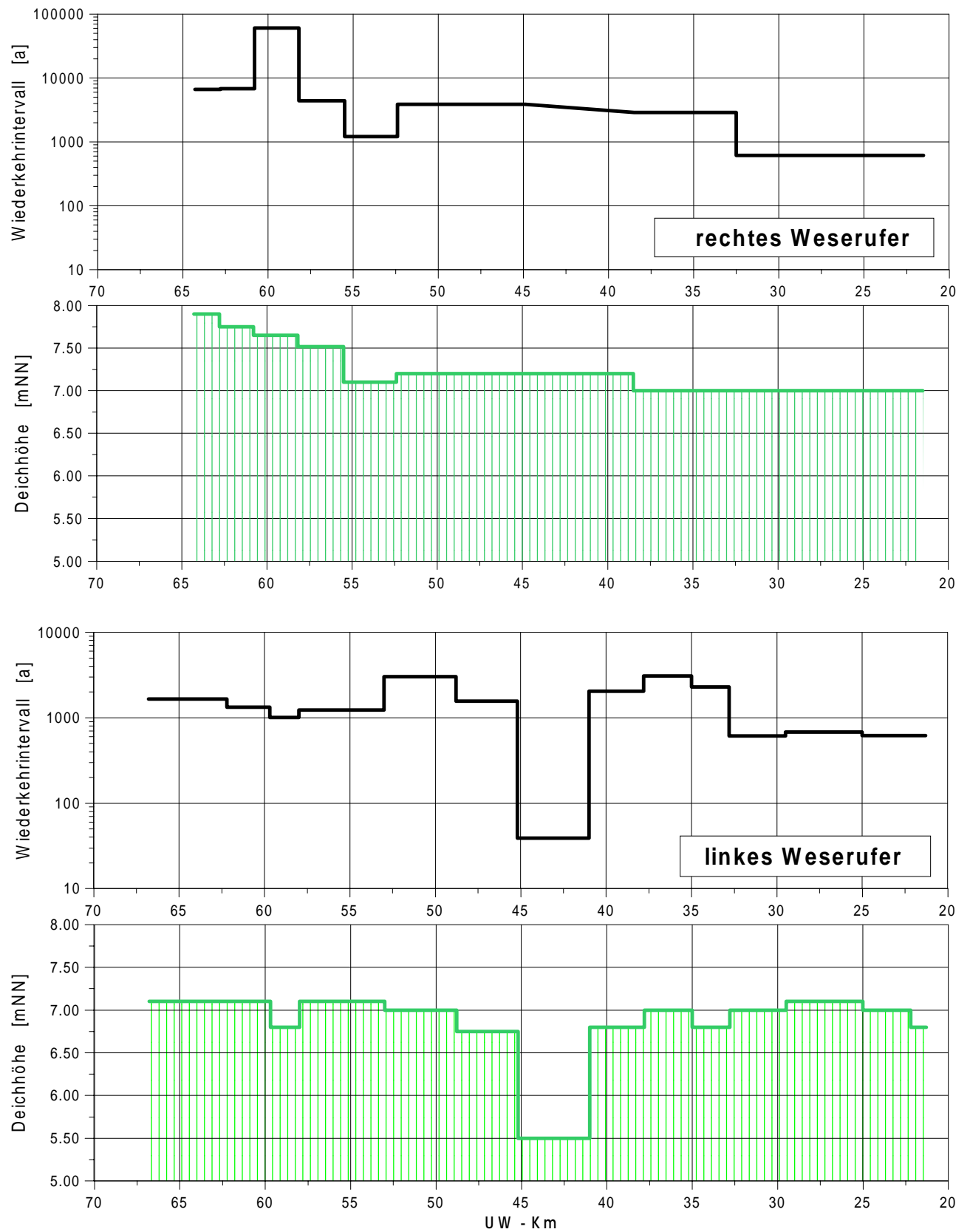


Abb. 6.11: Darstellung der Wiederkehrintervalle eines Deichversagens für das rechte (oben) und das linke (unten) Weserufer

6.5 AUSBLICK

Das Küstenschutzsystem der Unterweser, welches im wesentlichen durch seine Deichlinien und Vorländer charakterisiert wird, kann für die aktuellen klimatischen Verhältnisse als, zuverlässig angesehen werden, abgesehen von wenigen Bereichen an Sielausläufen des linken Weseruferes.

Für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken wurde bislang mit einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 0,25 m pro Jahrhundert gerechnet (säkularer Meeresspiegelanstieg). Unter der Annahme, daß sich klimatische Veränderungen u.a. in Form eines zunehmend steigenden Wasserspiegels und einer Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Windereignissen auswirken, müssen im Weserästuar Deichanlagen sowie die übrigen Schutzelemente dem natürlichen und klimatisch bedingten Anstieg des mittleren Tidehochwassers und der Sturmflutwasserstände angepaßt werden. Typische Maßnahmen sind Deicherhöhungen (z.B. durch das Aufsetzen von Spundwänden) und -verstärkungen, die Anlage von Sturmflutsperrwerken oder der Ersatz von Sielen und Schöpfwerken.

In weiterführenden Untersuchungen sollen daher zunächst die Auswirkungen klimatischer Veränderungen (Klimaszenarien) auf die vorhandenen Küstenschutzmaßnahmen unter Anwendung des o.g. probabilistischen Ansatzes bestimmt werden. In einem weiteren Schritt werden für das Untersuchungsgebiet im wesentlichen vier denkbare Maßnahmen des Küstenschutzes untersucht. Das sind die Verstärkung der Deichlinien, eine partielle Rückverlegung von Deichabschnitten, eine Anlage von Sturmflutentlastungspoldern am rechten Weserufer sowie der Bau eines Sturmflutsperrwerkes, als Reaktion auf geänderte klimatische Randbedingungen.

Adresse der Autoren

**Dr.-Ing. Nicole von Lieberman,
Dipl.-Phys. Stephan Mai**

Franzius-Institut
Universität Hannover
Nienburger Straße 4
30167 Hannover

6.6 SCHRIFTTUM

BATTJES, J.A.:

Run-up Distributions of Waves Breaking on Slopes. Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering, 1971.

BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS (Hrsg.):

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

CENTRE FOR CIVIL ENGINEERING RESEARCH AND CODES (CUR):

Probabilistic Design of Flood Defences. CUR Report 141, 1990.

DER NIEDERSÄCHSISCHE MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (NMELF) / DER SENATOR FÜR DAS BAUWESEN DER FREIEN HANSESTADT BREMEN, WWÄ BRAKE / BREMEN:

Sturmflutschutz durch Sperrwerke – Hunte, Lesum, Ochtum –. Broschüre, 1979.

FREIE HANSESTADT BREMEN:

Hochwasserschutzgrundlagen für das Land Bremen. Bremen, 1995.

FÜHRBÖTER, A.:

Küstenschutz auf neuen Wegen. Zeitschrift VDI, Nr. 8, 1974, S. 579-666.

KRÄMER, R.:

Landesausbau und mittelalterlicher Deichbau in der hohen Marsch von Butjadingen. Ergebnisse historisch-geographischer Untersuchungen. In: FEHN, K. ET AL.: Siedlungsforschung, Archäologie – Geschichte – Geographie, Bd. 2, Bonn, 1984, S. 147-164.

MAI, S. & N. VON LIEBERMAN:

Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 83, Hannover, 1999, S. 292-320.

VAN DER MEER, J.W. / JANSSEN, J.P.F.M.:

Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes and Revetments. Delft Hydraulics, pub. no. 485, 1994.

NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM (Hrsg.):

Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Jade-Unterweser. Entwurf, o.Jg.

NORMENAUSSCHUß WASSERWESEN (NAW) IM DIN

(DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG):
Landwirtschaftlicher Wasserbau – Begriffe, Hochwasserschutz, Küstenschutz, Schöpfwerke. DIN 4047-2, November 1988.

PIEKEN, H.:

Die Osterstader Marsch. Werden und Wandel einer Kulturlandschaft. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, H. 23, Bremen, 1991, S. 1-571.

PREUSS, H.:

Marsch / Aufbau der Wesermarsch (Flußmarsch und Moormarsch). In: HÖFLE, H.-C.: Erläuterungen zu Blatt Schwanewede Nr. 2717, Geologische Karte von Niedersachsen, M. 1:25.000, Hannover, 1976.

RIS, R.C.:

Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, 1997.

VON LIEBERMAN, N. (1999):

Leitbildmodell für den Küstenschutz der Nordseeküste am Beispiel der Vorländer – Dissertation –. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 83, Hannover, S. 1-291.

VON LIEBERMAN, N. & MAI, S.:

Sturmflutschutz des Natur- und Wirtschaftsraumes zwischen Jade und Weser – eine Beurteilung der Deichsicherheit. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, 1999 (in Vorbereitung).

WETZEL, V.:

Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute. HTG-Jahrbuch Nr. XLII, 1987, S. 83-105.