

UNTERSUCHUNGEN ZUM RISIKOPOTENTIAL EINER KÜSTENREGION

von

Stephan Mai

Nicole von Lieberman

Vorwort

Der Vergleich aktueller Bemessungskonzepte von Haupt- bzw. Landesschutzdeichen an der europäischen Nordseeküste weist im wesentlichen zwei unterschiedliche Vorgehen auf: In Deutschland ist dieses auf ein deterministisches Verfahren gestützt, während beispielsweise in den Niederlanden ein probabilistischer Ansatz gewählt wird.

Um nicht zuletzt Unterschiede der beiden Vorgehensweisen im Hinblick auf die Sicherheit von Deichen bei Klimaänderung herauszuarbeiten, wurde der probabilistische Ansatz im Rahmen einer Studie für das Umweltministerium des Landes Niedersachsen ("Konzepte und Techniken im Küstenschutz im Land Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen") auf ausgewählte Abschnitte der deutschen Nordseeküste angewendet.

In einem interdisziplinären und vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens "Integrative Analyse der Klimasensitivität der hydrologischen, ökologischen und sozioökonomischen Strukturen des inneren Weserästuars und seiner Marsch und Entwicklung von Handlungsoptionen; kurz: Fallstudie Weserästuar" (Förderkennzeichen: 01 LK 9701/8) werden seit Juli 1997 unter Anwendung des probabilistischen Ansatzes auf die Wesermarsch und im Projektverbund mit den Universitäten Bremen und Braunschweig sowie der GKSS im FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der UNIVERSITÄT HANNOVER Handlungsempfehlungen für mögliche Reaktionen auf einen klimaänderungsbedingten Wasserstandsanstieg erarbeitet.

Eine Erweiterung des probabilistischen Verfahrens zu einer umfassenden Risikoanalyse für die Region "Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten", welche auch die bei Versagen entstehenden Folgeschäden berücksichtigt, wird seit November 1998 im BMBF-Forschungsvorhabens "Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung" (Förderkennzeichen: 01 LA 9822/4) umgesetzt.

Dieser Beitrag stellt erste Ergebnisse der o.g. Forschungsvorhaben für den Bereich Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten vor.

D.V.

1 Grundlagen der Risikoanalyse

1.1 Allgemeines

Die Risikoanalyse ist ein Instrument zur Beurteilung des Sicherheitsstandards z.B. von Küstenschutzbauwerken und der dadurch geschützten, überflutungsgefährdeten Küstengebiete.

Sie beinhaltet einerseits die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Schutzsystemen (engl. *failure probability*), andererseits die Quantifizierung der bei Versagen (engl. *failure*) auftretenden Folgeschäden. Das Produkt von Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschäden beschreibt dann das Risiko (engl. *risk*) als Maß der pro Jahr infolge des Versagens von Schutzsystemen zu erwartenden Kosten (Abb. 1).

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit ist zunächst eine Darstellung der Belastungen (Gefahrenquellen) sowie eine Beschreibung der Versagensmechanismen der Schutzelemente erforderlich.

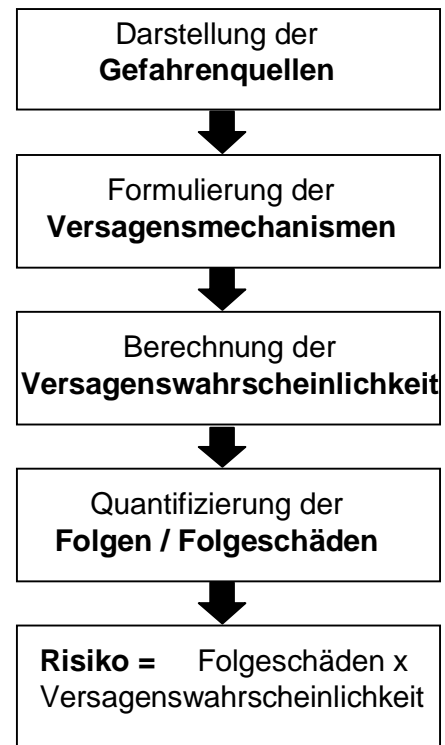


Abb. 1: Elemente der Risikoanalyse
(ZIMMERMANN/MAI, 1998)

Aus den natürlichen Randbedingungen – Wasserstand, Strömung, Seegang und Wind – resultieren die Belastungen von Küstenschutzelementen hervorgerufen. Diese lassen sich unter Anwendung von numerischen Modellen, z.B. für Seegang und Strömungen, bzw. von analytischen Übertragungsfunktionen ermitteln. Die Belastbarkeit wird durch die charakteristischen Eigenschaften der Küstenschutzelemente, wie Bauweise und Baumaterial, bestimmt. Aus dem Vergleich der Größen von Belastung und Belastbarkeit kann eine Prüfung des Küstenschutzsystems auf Versagen erfolgen. Mathematisch wird der Begriff der Zuverlässigkeit (engl. *reliability / limit state function*) als Differenz von Belastbarkeit und Belastung eingeführt. Bei negativen Werten der Zuverlässigkeit erfolgt dann Versagen. Das Ausmaß des Versagens und damit die Auswirkungen auf das Schutzsystem ergibt sich aus dem Betrag der Zuverlässigkeitsfunktion (Abb. 2).

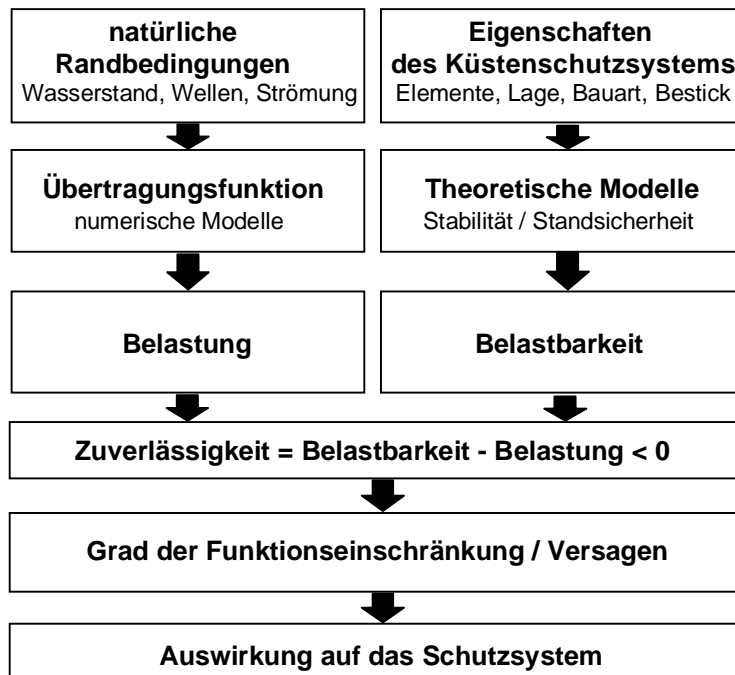


Abb. 2: Vorgehen bei der Zuverlässigkeitsanalyse (ZIMMERMANN/MAI, 1998)

1.2 Mathematische Beschreibung

1.2.1 Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten

Für Umsetzung des in Kap. 1.1 beschriebenen Vorgehens bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten ist eine mathematische Beschreibung erforderlich. Allgemein erfolgt zunächst die Definition der Zuverlässigkeitsfunktion Z , welche als Differenz von Belastbarkeit R und Belastung S definiert ist (PLATE/DUCKSTEIN, 1988), d.h.

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

Überschreitet die Belastung die Belastbarkeit, wird Z negativ ($Z < 0$) und ein Versagen des Küstenschutzelements tritt ein. Die Belastung R und die Belastbarkeit S sind i.d.R. wahrscheinlichkeitsverteilte Größen mit den Wahrscheinlichkeitsdichten $p_{R(R)}$ und $p_{S(S)}$. Somit ist auch die Zuverlässigkeit Z eine wahrscheinlichkeitsverteilte Größe mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $p_{Z(Z)}$. Die Wahrscheinlichkeit des Versagens $p_{Z < 0}$, d.h. negativer Zuverlässigkeiten, ergibt sich dann durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichten

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

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

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

- Stufe III: Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit werden die vollständigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der wahrscheinlichkeitsverteilten Variablen eingeführt und der unter Umständen nicht-lineare Charakter der Zuverlässigkeitsfunktion berücksichtigt.
- Stufe II: Im Vergleich zur Stufe III werden einige Näherungen eingeführt, so werden die Zuverlässigkeitsfunktionen linearisiert und alle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen als normalverteilt angenommen.
- Stufe I: Hier wird vollständig auf die Einführung von Wahrscheinlichkeitsdichten verzichtet. Statt dessen wird der Mittelwert mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Eine Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten ist auf Stufe I nicht möglich.

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

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

1.2.2 Quantifizierung von Folgeschäden

Die Ermittlung der Folgeschäden $C_{(Z)}$ erfolgt in zwei Arbeitsschritten. Einerseits wird das Gesamtschadenspotential möglicher Überflutungsflächen erhoben, andererseits wird der Schädigungsanteil in Abhängigkeit zur Überflutungshöhe festgelegt.

Das Gesamtschadenspotential wird auf der Grundlage der amtlichen Bundes-, Landes- und Kommunalstatistik z.B. für die Sachbereiche Bevölkerung und Erwerbstätigkeit, Wohnstätten, Vermögen und KFZ-Bestand, Produktionsstätten, Arbeit, Kapital, Boden, Infrastruktur und Wirtschaftsergebnis. Ein Beispiel einer Quantifizierung des Gesamtschadenspotentials für die Gemeinde Butjadingen ist in Abbildung 3 dargestellt.

Bei Versagen eines Küstenschutzsystems wird i.d.R. nur ein Teil des Gesamtvermögens geschädigt. Dies ist von der Überflutungshöhe abhängig, welche z.B. durch numerische Simulationen des Überflutungsvorganges oder, einfacher, durch Verschneiden topographischer Karten mit dem bei Versagen eingetretenen Hochwasserstand ermittelt wird. Der Schadensanteil an den Vermögenswerten kann auf der Grundlage vergangener Überflutungsschäden in Abhängigkeit von der Überflutungshöhe bestimmt werden (Abb. 4).

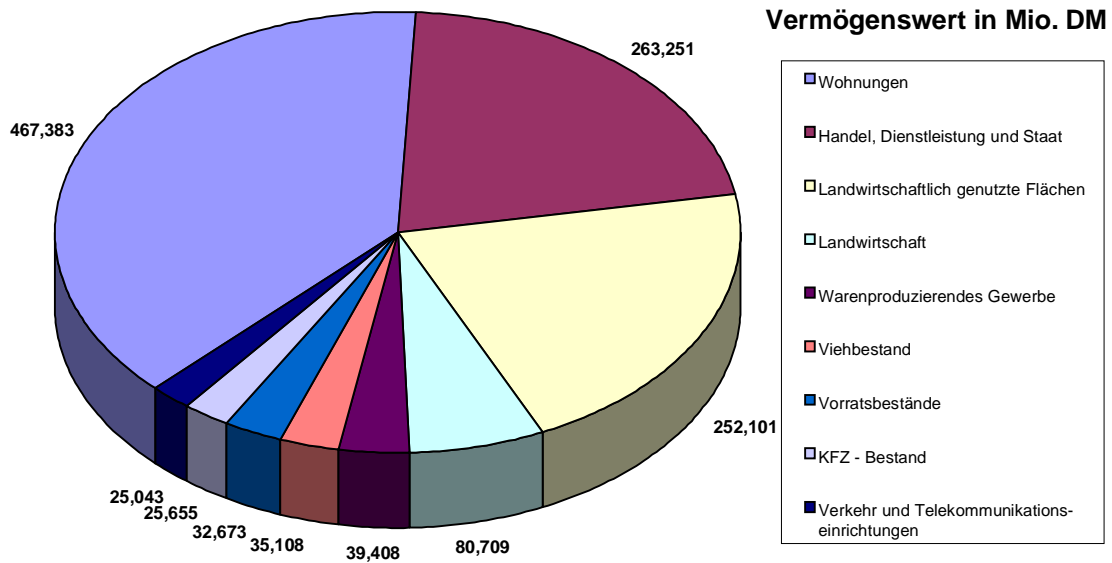


Abb. 3: Vermögensbestand in der Gemeinde Butjadingen
(BUNDESMINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1990)

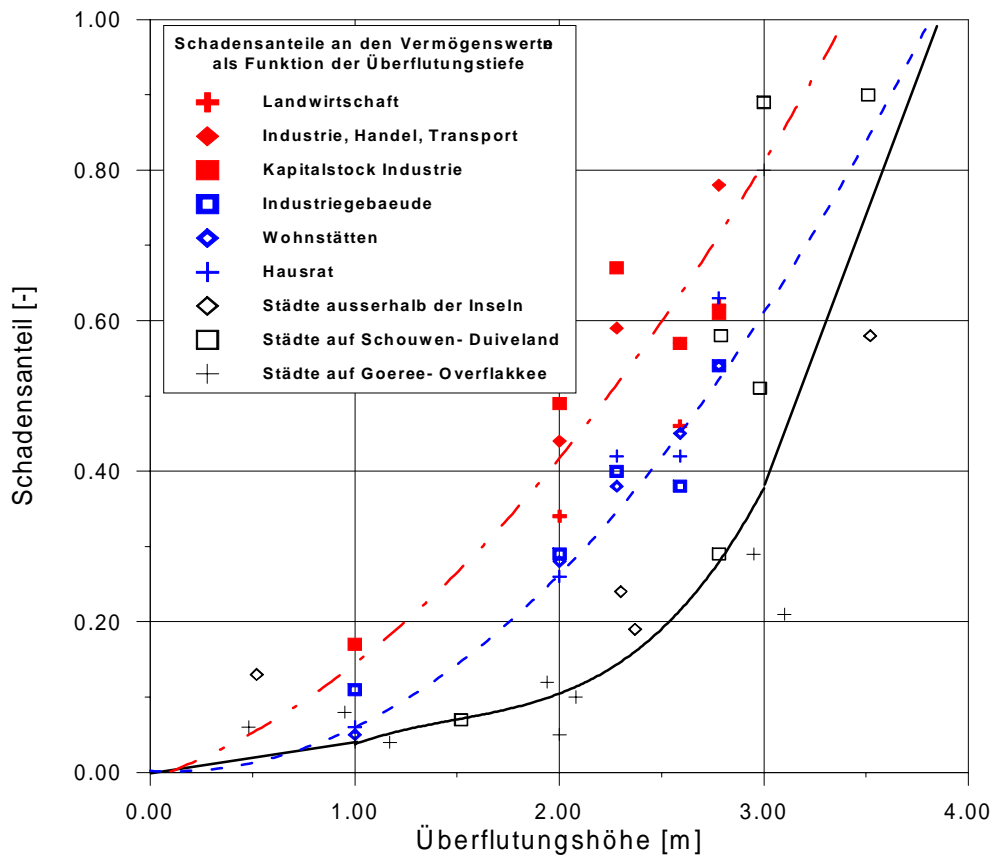


Abb.4: Schadensanteile an den Vermögenswerten
(CUR, 1990)

2 Küstenschutzelemente und -systeme an der Nordsee

2.1 Schutzsysteme

Die Küstenschutzsysteme der Nordsee bestehen aus verschiedenen Einzelementen. Dies sind z.B. Wattflächen, Lahnungen, Vorländer, Sommerdeiche, Sommerpolder und Hauptdeiche bzw. Landes-schutzdeiche (Abb. 5). Der Hauptdeich stellt hier das bedeutendste Schutzelement dar.

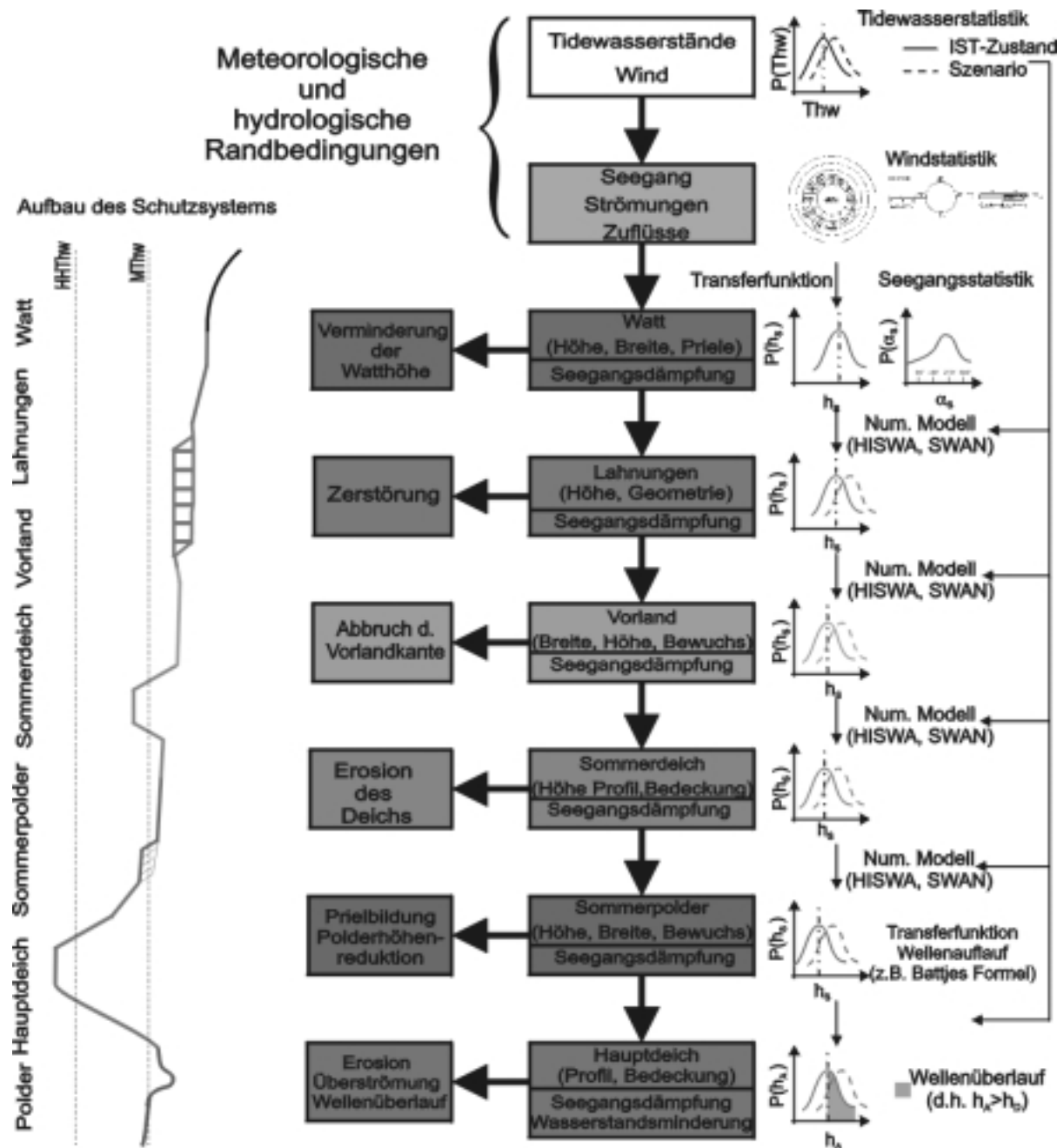


Abb. 3: Probabilistisches Bewertungsschema für ein Küstenschutzsystem (ZIMMERMANN/MAI, 1998)

Innerhalb des Küstenschutzsystems verändern sich die hydrographischen Belastungsparameter, so wird z.B. der einlaufende Seegang durch die Prozesse Shoaling, Wellenbrechen und Bodenreibung beeinflusst. Daher ändern sich auch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Belastungsparameter im Küstenschutzsystem.

2.2 Bemessung des Küstenschutzelementes "Hauptdeich"

2.2.1 Schadensmechanismen

In dieser Arbeit wird der Hauptdeich als wesentlichstes Küstenschutzelement ausgewählt und hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit und Folgen von Versagen untersucht.

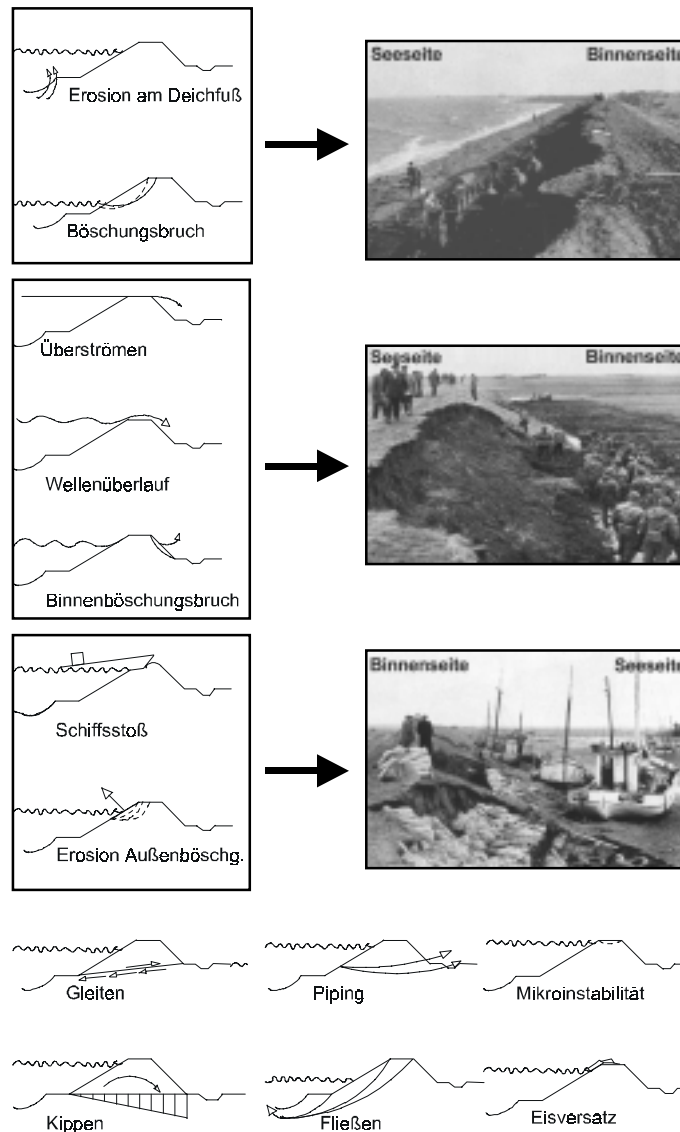


Abb. 6: Schadensmechanismen an Deichen und Beispiele der Sturmflut 1976
(VON LIEBERMAN/MAI, 1999b)

Abbildung 6 stellt mögliche Versagensmechanismen, wie Wellenüberlauf, Überströmen, Böschungsbruch und Schiffstoß, dar und ordnet sie charakteristischen Schadensbildern der Sturmflut 1976 zu. Die Analyse von Schadensbildern der Sturmfluten 1962 und 1976 bzw. 1953 in den Niederlanden zeigt, daß Deichbrüche in der Regel nur durch Überströmen und Wellenüberlauf hervorgerufen werden (NMELF, 1979). Die Versagensmechanismen Überströmen und Wellenüberlauf wurden daher, wie auch bei dem derzeit gültigen "traditionellen Bemessungsverfahren", den nachfolgenden Untersuchungen zugrunde gelegt. Eine Ergänzung weiterer Versagensmechanismen ist jedoch im Rahmen der Risikoanalyse möglich.

2.2.2 Traditionelles Bemessungsverfahren

Die heutige Praxis zur Festlegung des Deichbesticks, d.h. der Höhe und der Gestaltung, orientiert sich im wesentlichen am Bemessungswasserstand und dem Wellenauflauf. Die Begrenzung der Überschreitungshäufigkeit dieses Wasserstandes wird allgemein als Sicherheitsstandard angesehen, wengleich bei Wellenüberlauf eine Sicherheitsreserve vorhanden sein kann, bevor es zu einem Versagen bzw. einer vollständigen Zerstörung des Deichs kommt.

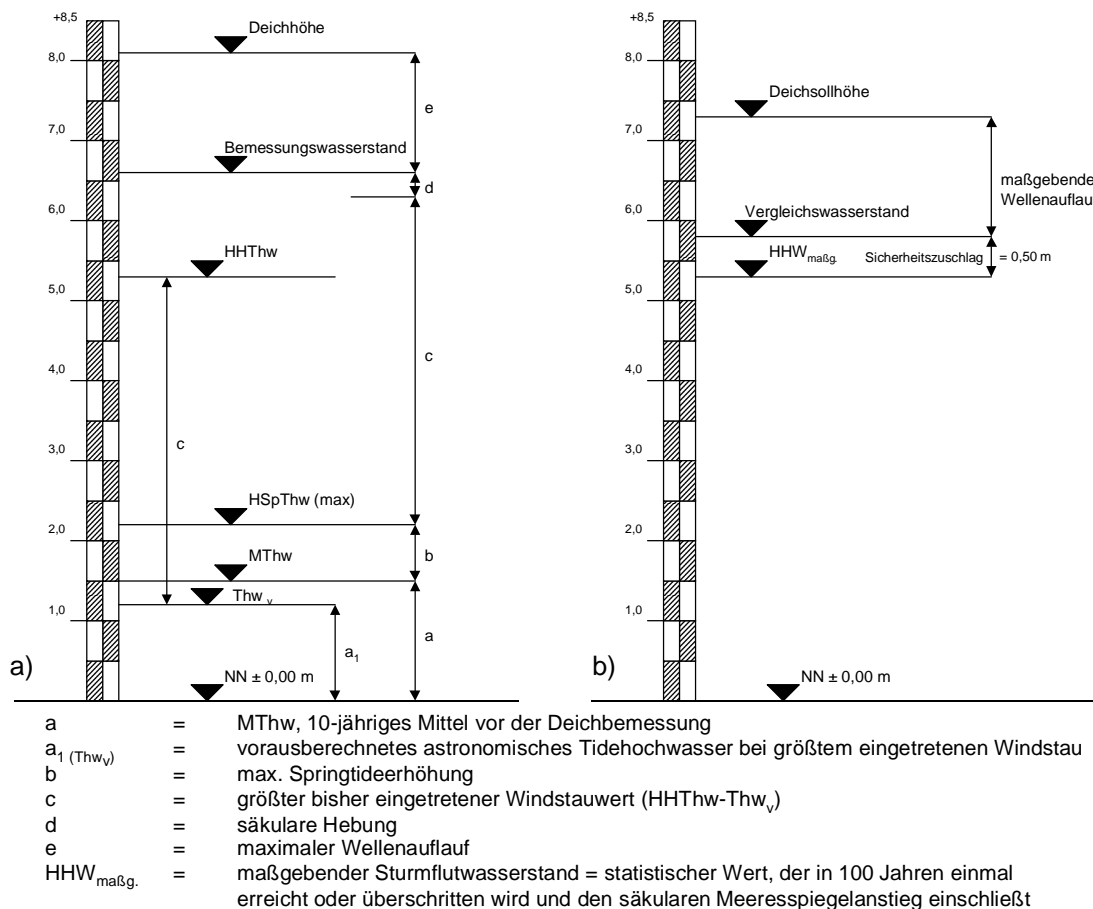


Abb. 7: Einzelwertverfahren (a) und Vergleichswertverfahren (b) –
traditionelle Verfahren zur Festlegung der Deichhöhe
(nach: EAK, 1993)

Die Bemessung von Deichhöhen mit Hilfe von Bemessungswasserständen ist zudem in den einzelnen Küstenländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und der Freien und Hansestadt Hamburg unterschiedlich geregelt. Gemäß dem aktuell gültigen "Generalplan Küstenschutz" (BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS, 1997) wird in Niedersachsen zur Bemessung von Deichhöhen das sogenannte Einzelwert-Verfahren (Abb. 7a) angewendet. Hier führt die Addition

- des mittleren Tidehochwassers (MThw)
 - des Höhenunterschieds zwischen dem höchsten Springtide-Hochwasser im Winterhalbjahr (HSpThw) und dem MThw
 - des Windstaus (= Höhenunterschied zwischen dem höchsten eingetretenen Tidehochwasser (HHThw) und dem zugehörigen, vorausgerechneten astronomischen Tidehochwasser (Thw_v))
 - eines Sicherheitszuschlags für das säkulare Steigen des MThw (rd. 0,30 m/Jhrdt.)
- zur Deichsollhöhe.

An der schleswig-holsteinischen Küste erfolgt gemäß dem Generalplan Küstenschutz für Schleswig-Holstein (MELF, 1986) eine Bemessung nach dem Vergleichswert-Verfahren (Abb. 7b). Es bezieht sich auf die sogenannte "maßgebende Sturmfluthöhe", die sich aus der Summe des maßgebenden Sturmflutwasserstands und des maßgebenden Wellenaufbaus zusammensetzt. Der maßgebende Sturmflutwasserstand (EAK, 1993)

- ist im Durchschnitt nicht häufiger als einmal pro Jahrhundert zu erwarten,
- unterschreitet die auf die Gegenwart umgerechneten Sturmflutwasserstände vom 03./04. Februar 1825 nicht,
- ist nicht niedriger als die Summe des größten beobachteten Windstaus und des möglichen höchsten Springtide-Hochwassers,
- entspricht mit Rücksicht auf den voraussichtlich säkularen und raumbedingten Wasserstandsanstieg den genannten Bedingungen bis zum Jahr 2000.

2.2.3 Probabilistisches Verfahren

Die zuvor genannten "traditionellen Bemessungsverfahren" können unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen zu einem probabilistischen Bemessungsschema erweitert werden. So kann die Wahrscheinlichkeit eines Versagens des Küstenschutzelements "Deich" bestimmt werden (CUR, 1990).

Die Belastung sowie die Belastbarkeit lassen sich aus den hydrologischen und meteorologischen Bedingungen am seeseitigen Rand des Schutzelements Deich bzw. aus den Eigenschaften des Deichs bestimmen (ZIMMERMANN/MAI, 1998). Für den Versagensmechanismus Wellenüberlauf wird die Belastung am Deich, d.h. Wasserstand, Seegang, Wellenaufbau und Wellenüberlaufmenge, z.B.

aus numerischen Modellen zur Simulation des Seegangs sowie Berechnungen des Wellenaufbaus/-überlaufs, bestimmt.

Die Belastbarkeit des Deichs entspricht bei Betrachtung des Versagensmechanismus "Wellenüberlauf" der zulässigen Überlaufmenge (REEVE, 1998). Diese wird, wie bei der Bemessung nach dem Einzelwert- bzw. dem Vergleichswertverfahren, der Wassermenge gleichgesetzt, welche bei einem Wellenüberlauf der 2% höchsten Wellen zu erwarten ist.

Wird das Versagen eines Deichs als Wellenüberlauf von mehr als 2% der Wellen definiert, so ergibt sich die Zuverlässigkeitsfunktion Z als Differenz von Deichhöhe h_D und Tidehochwasserstand Thw am Deichfuß sowie dem Wellenaufbau $R_{98\%}$:

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

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deiches gegenüber Wellenüberlauf $p_{Z < 0}$ bzw. die reziproke Wiederkehrzeit $T_{Z < 0}$ entspricht gemäß Gleichung 2:

$$\frac{1}{T_{Z < 0}} = p_{Z < 0} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} dZ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{h_D - Thw}^{\infty} p_{(Thw, R_{98\%})} dR_{98\%} dThw \quad (5)$$

mit:

$p_{(Thw, R_{98\%})}$ gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl. *joint probability function*) [-]

Der Wellenaufbau auf einen Deich ergibt sich für eine bestimmte Deichneigung 1:n aus den Seegangsparemtern, signifikante Wellenhöhe H_s und mittlere Wellenperiode T_m , am Deichfuß. Die Berechnung erfolgt z.B. nach BATTJES (1971):

$$R_{98\%} = \gamma \cdot 0,75 \cdot \frac{1}{n} \cdot T_m \cdot \sqrt{g \cdot H_s} \quad (6)$$

mit:

γ Beiwert zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit, des Einflusses der Wassertiefe und des Einflusses der Berme (DE WAAL/VAN DER MEER, 1992).

1:n Deichneigung [-]

T_m mittlere Wellenperiode [s]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

H_s signifikante Wellenhöhe [m]

Alternativ zu den Gleichungen 4 und 5 ist folgende Definition der Zuverlässigkeit möglich:

$$Z = q_{\text{zul.}} - q_{\text{vorh.}} \quad (7)$$

$q_{\text{zul.}}$ beschreibt die zulässige, $q_{\text{vorh.}}$ die tatsächlich vorhandene Überlaufmenge. Die zulässige Überlaufwassermenge kann für Grasdeiche konstant mit 2,0 bis 3,0 m³/m/h (TAUTENHAIN, 1981), für Sanddeiche mit schlechter Grasnarbe mit 0,36 m³/m/h und für mit einer Kleischicht gesicherte Deiche mit guter Grasnarbe bis 36 m³/m/h (VAN DER MEER/JANSSEN, 1994) angenommen werden.

Die Überlaufmenge am Deich wird in der vorliegenden Arbeit nach dem Ansatz von VAN DER MEER/JANSSEN (1994) bestimmt:

$$q = \sqrt{g \cdot H_S^3} \cdot \alpha_1(1/n, H_S, T_P) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\gamma} \cdot \alpha_2(1/n, H_S, T_P) \cdot \frac{R_C}{H_S}\right) \quad (8)$$

mit:

g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
H_S	signifikante Wellenhöhe [m]
α_1, α_2	vom Brechverhalten der Wellen abhängige Parameter [-]
1:n	Deichneigung [-]
T_P	Peak-Periode [s]
γ	Beiwert [-]
R_C	freie Kronenhöhe des Deichs über dem Ruhewasserspiegel [m]

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deiches $p_{Z < 0}$ bzw. die reziproke Wiederkehrzeit $T_{Z < 0}$ ergibt sich nach den Gleichungen 7 und 8 zu:

$$\frac{1}{T_{Z < 0}} = p_{Z < 0} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} dZ = \int_{-\infty}^{\infty} p_{q_{\text{zul.}}(q_{\text{zul.}}) \int_{q_{\text{zul.}}}^{\infty} p_{q_{\text{vorh.}}(q_{\text{vorh.}}) dq_{\text{vorh.}} dq_{\text{zul.}} \quad (9)$$

Die statistischen Verteilungen der Größen $R_{98\%}$ und $q_{\text{vorh.}}$ sind zunächst nicht bekannt. Sie werden mittels numerischer Simulationen des Seegangs und der Anwendung von Transferfunktionen für Wellauflauf und Wellenüberlaufmenge aus der Statistik von Tidehochwasserstand Thw und Wind (Geschwindigkeit und Richtung) abgeleitet.

3 Risikoanalyse für Bremerhaven, Butjadingen und Land Wursten

3.1 Übersicht über das Untersuchungsgebiet

Die Anwendung der Risikoanalyse wird exemplarisch für den Küstenraum Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten (Abb. 8) dargestellt. Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit bzw. des Wiederkehrintervalls eines Wellenüberlaufs erfolgt für die gekennzeichneten Deichprofile P1 bis P9. Die Profile unterscheiden sich dabei in ihrer Vorlandform (Vorlandhöhe und -breite) und weisen teilweise weitere Schutzelemente wie Lahnungen und Sommerdeiche auf. Exemplarisch sind charakteristische Profiltypen in Abbildung 9 dargestellt.

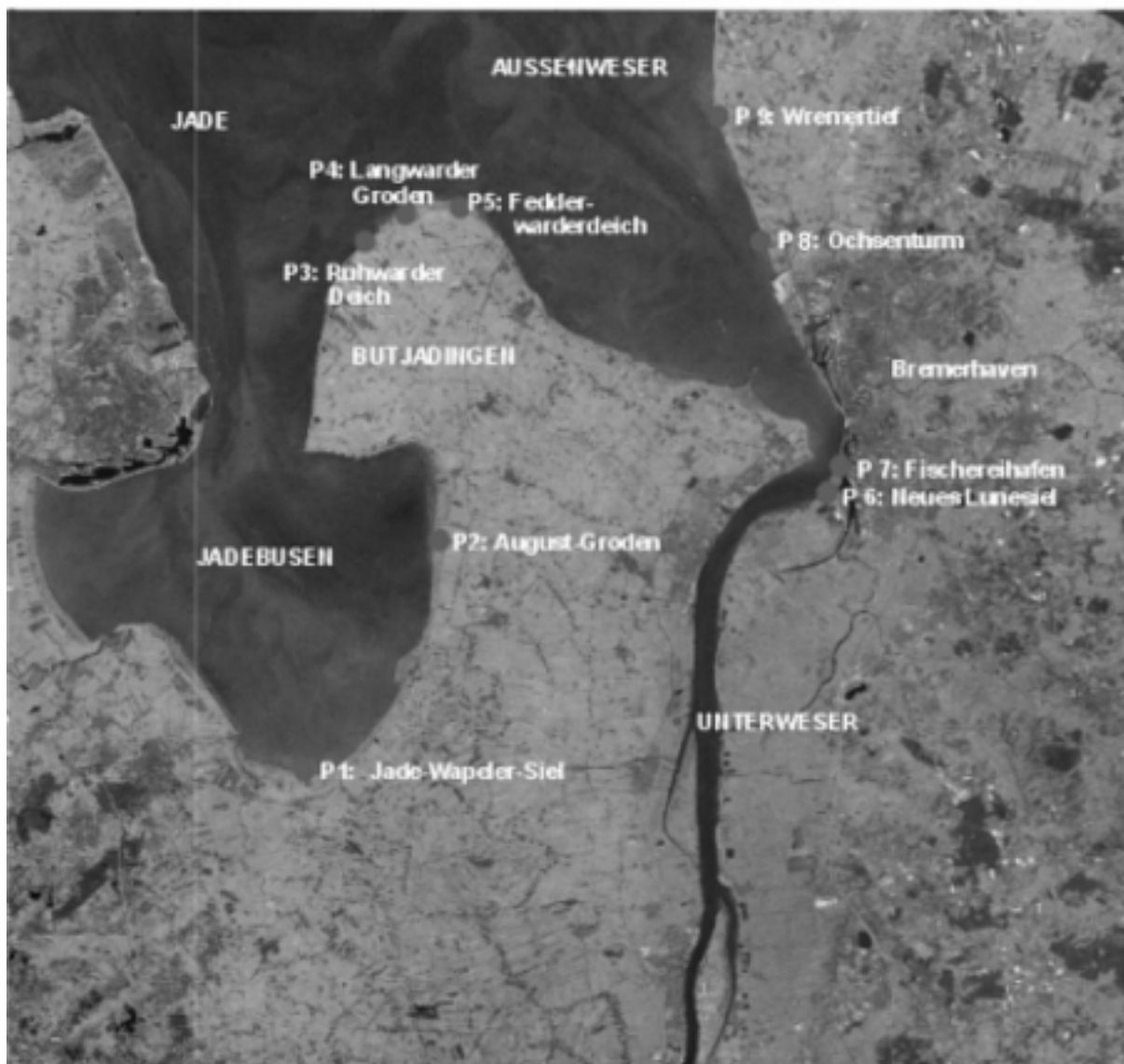


Abb. 8: Küstenschutzbauwerke im Untersuchungsgebiet
(Kartengrundlage: SCOUT SYSTEMS, 1996)

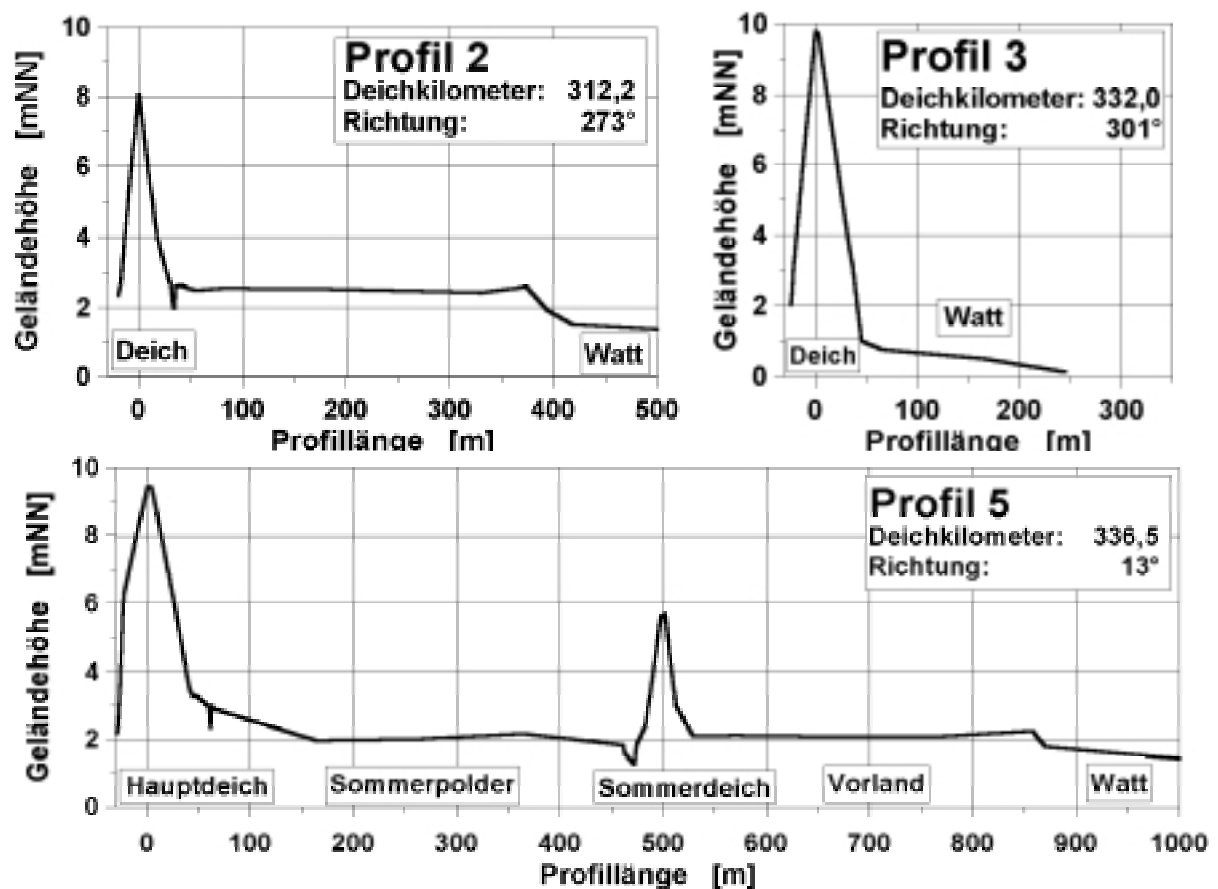


Abb. 9: Charakteristische Deichprofiltypen im Untersuchungsgebiet
(nach: VON LIEBERMAN/MAI, 1999b)

3.3 Belastbarkeit und Belastung

Die Belastbarkeit der Deiche, d.h. Deichneigung, Deichhöhe und Oberflächenbeschaffenheit, ist in einem Bauwerkskataster dokumentiert, welcher für den Raum zwischen Jade und Weser für verschiedene Küstenschutzbauwerke (Siele, Schöpfwerke, Sperrwerke, Schleusen, Deiche) erstellt und in internetbasierter Form umgesetzt wurde (VON LIEBERMAN/MAI, 1999b). Neben Bauwerksabmessungen können gleichfalls die örtlich vorhandenen Statistiken der Belastungsgrößen, Tidehoch- und Niedrigwasserstand sowie Seegang, entnommen werden.

Der Seegang wurde unter Anwendung der in Abbildung 10 dargestellten Modellkette für verschiedene Randbedingungen von Wasserstand und Wind ermittelt. Dazu wurde am nördlichen Modellrand der Eingangsseegang in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und -richtung parametrisiert (CERC, 1984). Die Seegangsausbreitung in Jade und Weser wurde mit Hilfe des numerischen Seegangsmodells *Shallow WAVes Nearshore* (Ris, 1995) simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen für ausgewählte Gebiete stehen in Form eines in internetbasierter Form umgesetzten Seegangsatlas` zur Verfügung (MAI/ZIMMERMANN, 1998).

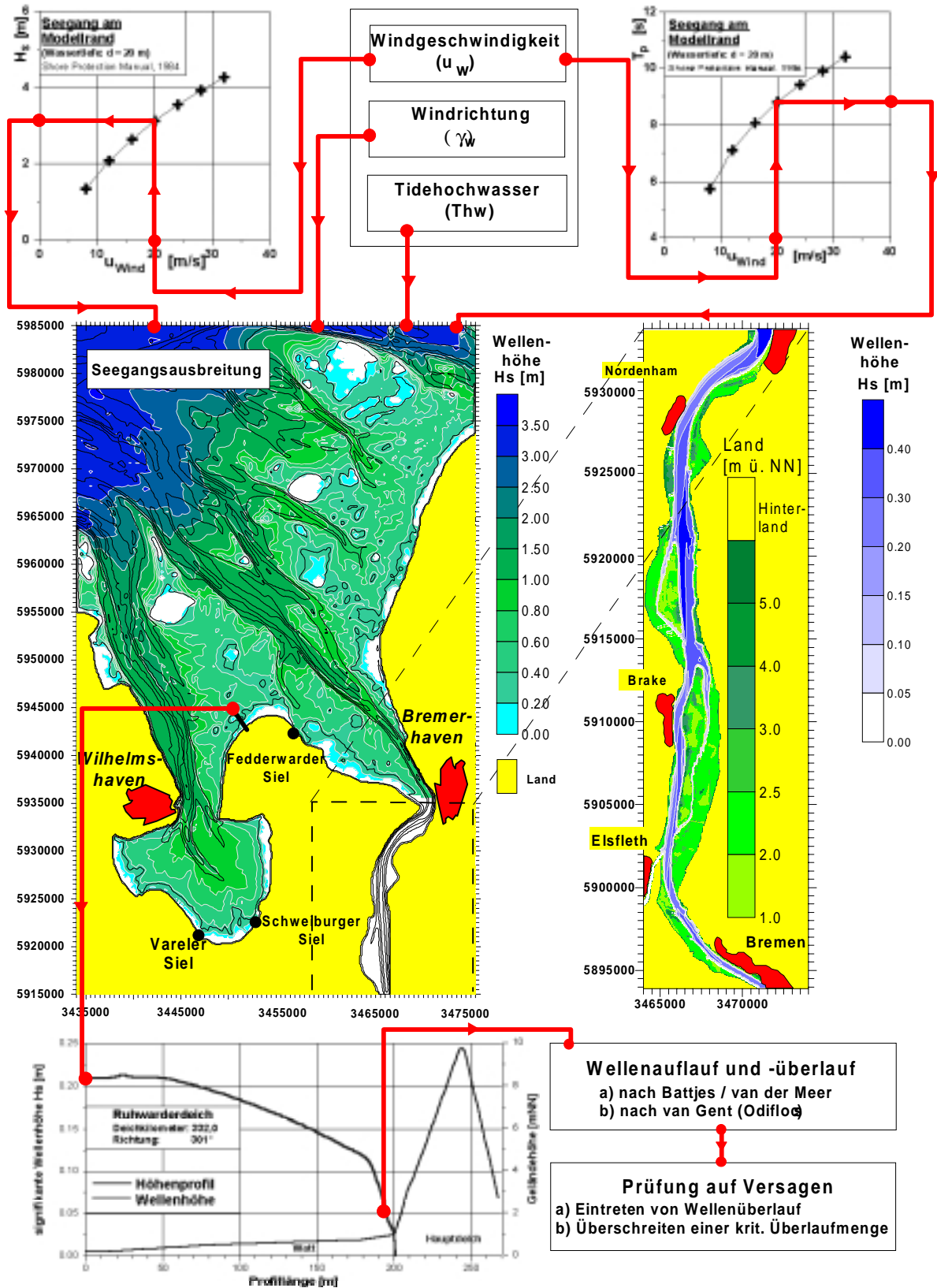


Abb. 10: Modellkette zur Ermittlung der Zuverlässigkeit

Großräumig weisen die Simulationen eine Auflösung von 100 m x 100 m in Jade und Außenweser und 50 m x 50 m in der Unterweser auf. Küstennah liegt für die ausgewählten Profile eine eindimensionale Auflösung von 1 m vor. Die Eingangsparameter für die eindimensionale Simulation werden aus dem großräumigen Modell gewonnen. Unter Anwendung der Gleichungen 6 und 8 bzw. des numerischen Programms ODIFLOCS (van Gent, 1996) sowie der Simulationsergebnisse (Wellenhöhe und -periode) wird der Wellenauflauf und -überlauf berechnet. Basierend auf den aus langjährigen Messungen abgeleiteten Wasserstands- (Abb. 11) und Windstatistiken (Abb. 12) ergibt sich dann die Seegangsstatistik (Abb. 13).

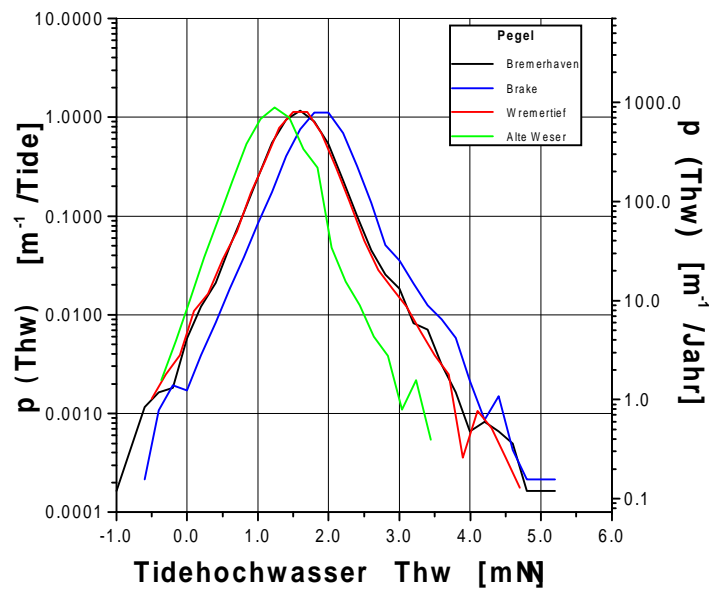


Abb. 11: Wahrscheinlichkeitsdichte des Tidehochwassers (Thw) an den für das Untersuchungsgebiet relevanten Pegeln Bremerhaven, Brake, Wremertief und Alte Weser (Datenbasis: GEWÄSSERKUNDLICHE JAHRBÜCHER, Abflußjahre 1940 bis 1993)

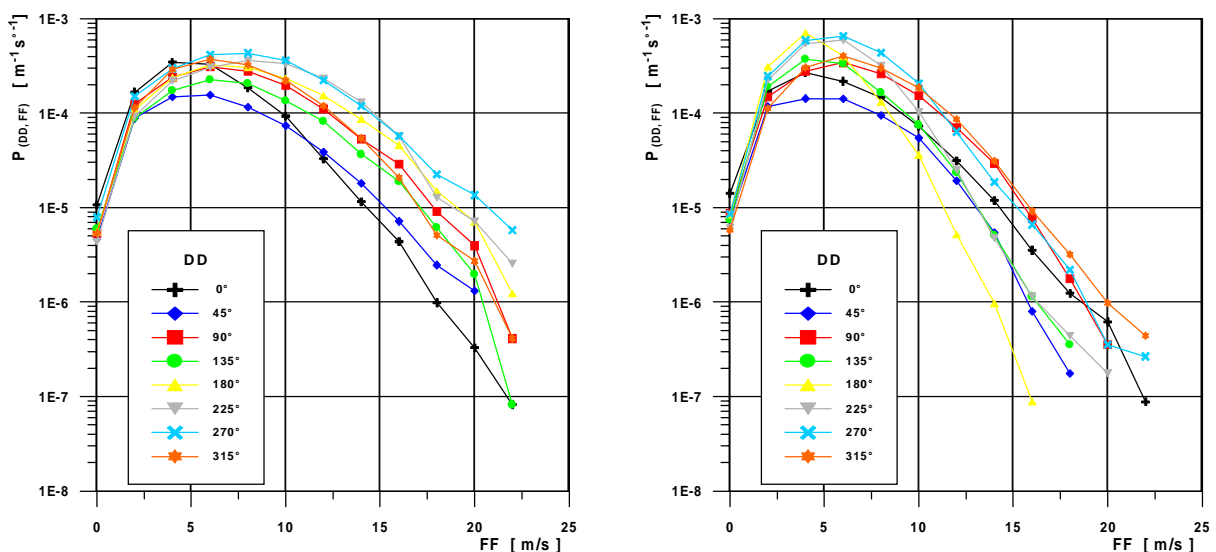


Abb. 12: Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeiten (FF) in Abhängigkeit von der Windrichtung (DD); Stationen Helgoland (links) und Cuxhaven (rechts) (Datenbasis: DEUTSCHER WETTERDIENST)

Die Statistik des Tidehochwasserstands ergibt sich für einzelne Küstenabschnitte aus den langjährigen Pegelaufzeichnungen, welche in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern dokumentiert sind. Dadurch wird insbesondere berücksichtigt, daß sich das Tidehochwasser von der Außen- zur Unterweser erhöht (vgl. Abb. 11). So ist z.B. der wahrscheinlichste Tidehochwasserstand am Pegel Leuchtturm Alte Weser in der Außenweser rd. 1,20 mNN, während er am Pegel Brake in der Unterweser 1,95 mNN beträgt.

Die Statistik von Windgeschwindigkeit und -richtung bestimmt sich aus langjährigen Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) an den Stationen Cuxhaven und Helgoland (vgl. Abb. 12). Es zeigt sich, daß die höchsten Windgeschwindigkeiten (> 15 m/s) für beide Stationen aus nordwestlichen Richtungen am häufigsten auftreten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Windgeschwindigkeiten ist an der Station Cuxhaven im Mittel etwa um das Zehnfache reduziert.

Abbildung 13 zeigt die Statistik der Wellenhöhen an den Positionen P1 bis P5 in Butjadingen bzw. P6 bis P9 in Bremerhaven und im Land Wursten. Demnach treten die höchsten Wellen am scharliegenden Deich des Profils P3 an der Küste Butjadingens auf. Seegang mit signifikanten Wellenhöhen von mehr als 0,80 m tritt dort etwa einmal pro Jahr auf, während er am sommerdeichgeschützten Profil P5 etwa nur alle 1.000 Jahre eintritt. In Bremerhaven, z.B. am Profil P6, tritt Seegang mit einer 0,80 m hohen signifikanten Wellenhöhe etwa alle 100 Jahre auf, im Land Wursten (P8 bzw. P9), beeinflusst durch Vorlandlänge und -höhe, etwa alle 10.000 Jahre bzw. etwa alle 500 Jahre auf.

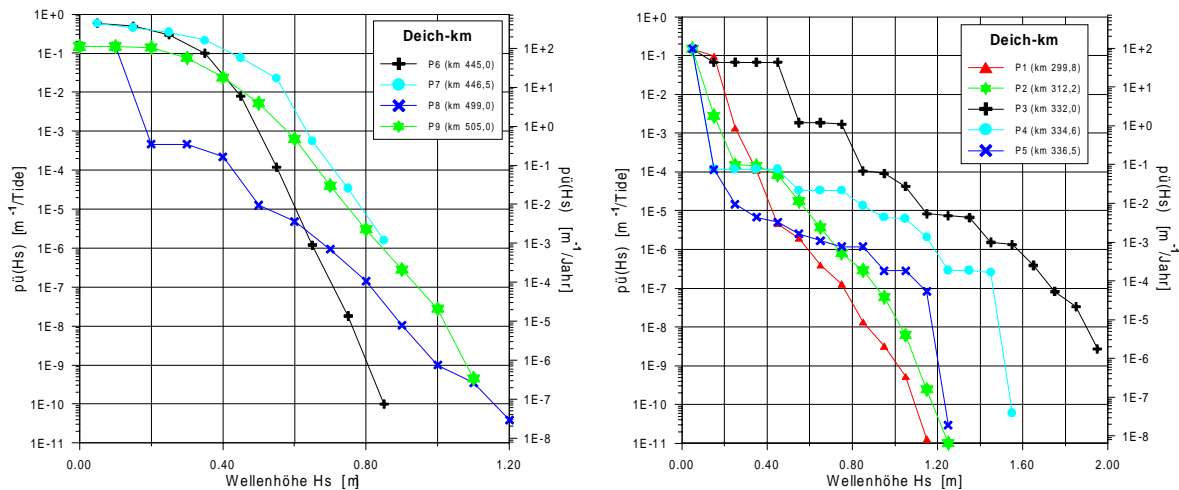


Abb. 13: Überschreitungswahrscheinlichkeit der signifikanten Wellenhöhe an ausgewählten Positionen im Untersuchungsgebiet; Butjadingen (links) sowie Bremerhaven und Wurster Küste (rechts)

3.4 Zuverlässigkeit der Hauptdeiche in Bezug auf Wellenüberlauf

Aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Wellenhöhen im deichnahen Bereich bzw. am Deichfuß wird der Wellenauflauf und die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens bestimmt. Unter Anwendung der Gleichung 5 kann daraus die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeitsfunktion ermittelt werden (Abb. 14). Im grau schattierten Bereich tritt per definitionem Versagen ein.

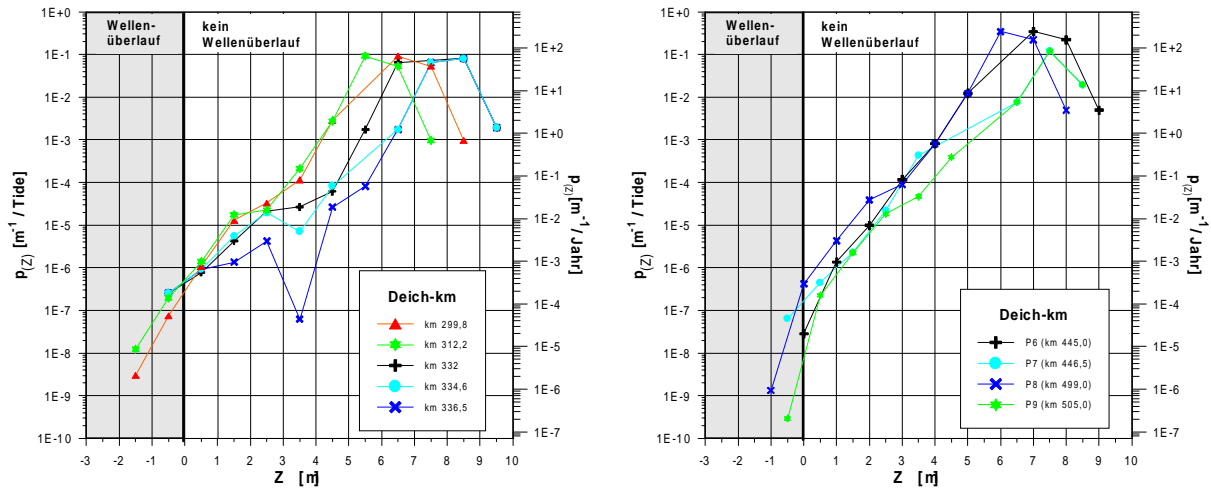


Abb. 14: Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeit an ausgewählten Positionen im Untersuchungsgebiet

3.5 Wiederkehrintervall des Wellenüberlaufs am Hauptdeich

In den Abbildungen 15 und 16 sind die nach Gleichung 5 bestimmten rechnerischen Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs dargestellt. Durch Integration des schraffierten Bereichs ergeben sich für die aktuellen Deichprofile P1 bis P5 (Aufmaß 1995) des Küstenabschnitts zwischen Jadebusen und Butjadingen Wiederkehrzeiten eines Wellenüberlaufs von etwa 1.000 bis 1.200 Jahren, im Bereich Bremerhaven bzw. Land Wursten von etwa 50.000 bzw. 2.500 bis 4.000 Jahren. Insgesamt können die Deiche als zuverlässig beurteilt werden. Auffällig ist, daß für den Abschnitt zwischen Jadebusen und Butjadingen die Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufes nahezu konstant ist, obwohl sich sowohl die Deichhöhen als auch das Vorlandprofile unterscheiden. Im Bereich Bremerhaven und Land Wursten weisen die Deichprofile deutlich unterschiedliche Wiederkehrzeiten von Wellenüberlauf auf. Hier sei insbesondere auf das Profil P6 mit einem Wiederkehrintervall von 50.000 Jahren verwiesen. Dieses sehr große Wiederkehrintervall ist auf die im Vergleich zu Profil P7 höhere Deichhöhe bei gleichzeitig geringerer Seegangbelastung zurückzuführen.

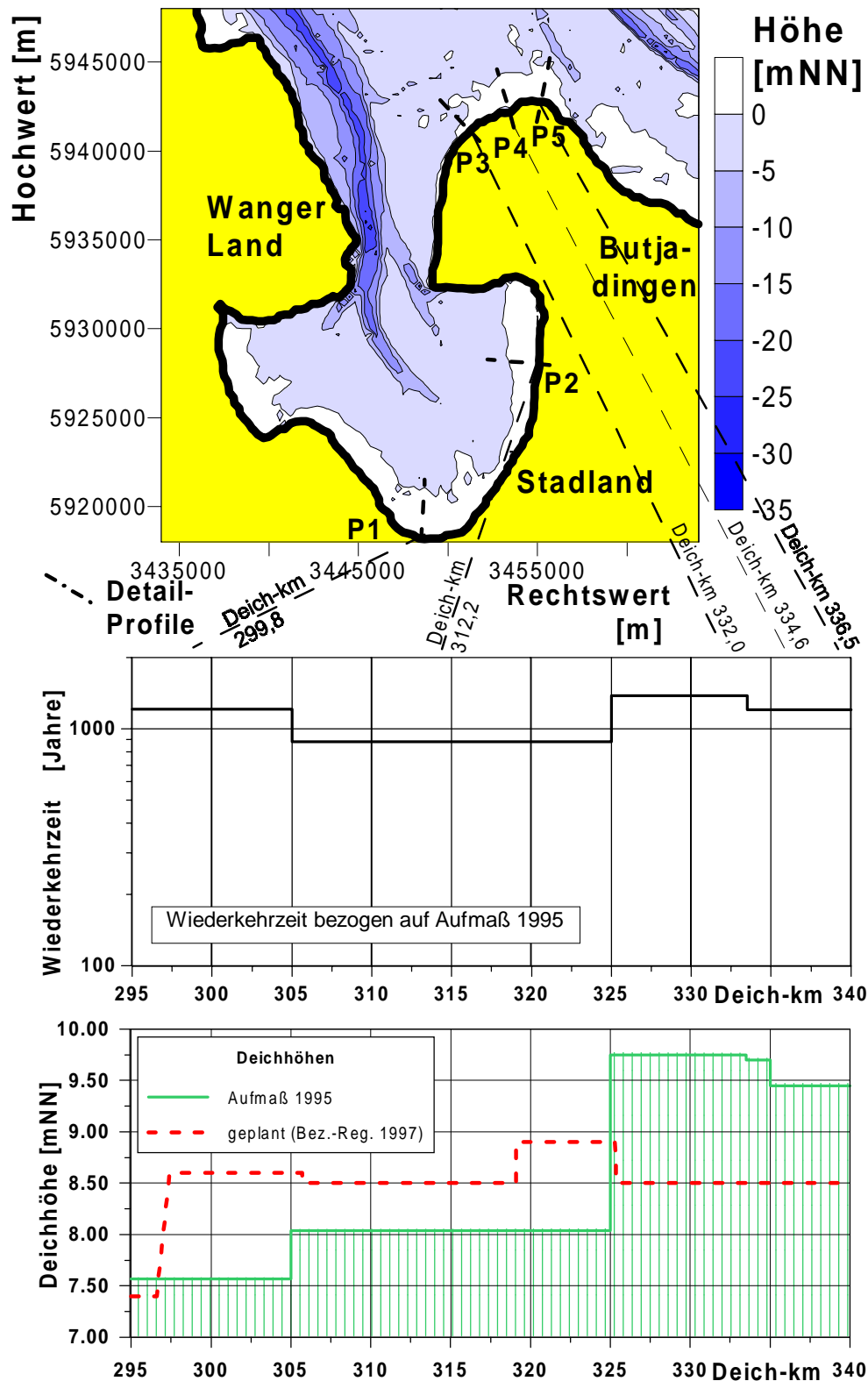


Abb. 15: Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs an Deichen Butjadingens

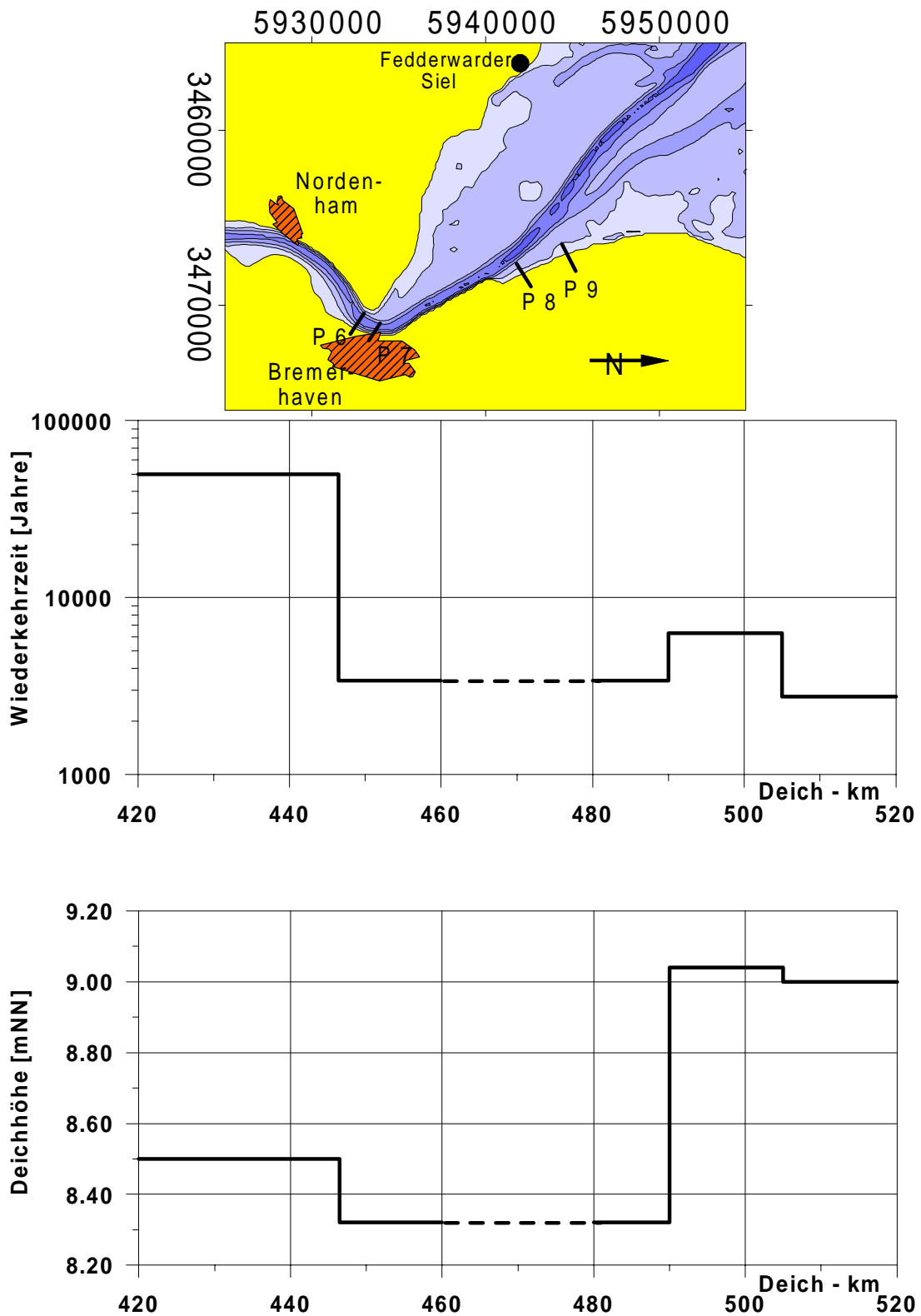


Abb. 16: Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs an Deichen
 in Bremerhaven und im Land Wursten

3.6 Methode zur Ermittlung von Folgeschäden

Nach Kapitel 1.2.2 erfordert die Ermittlung von Folgeschäden, d.h. die Bestimmung des Anteils der Schäden am Gesamtvermögen. Aus dem "Bewertungsgutachten für Deichbauvorhaben an der Festlandküste – Modellgebiet Wesermarsch –" (BUNDESMINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1990) liegt für das Gebiet Butjadingen eine Zusammenstellung des Gesamtvermögens vor. Der Schadensanteil am Gesamtvermögen wurde durch Verschneiden topographischer Karten mit dem bei Versagen eingetretenen Hochwasserstand ermittelt. Beispiele einer derartigen Ermittlung von potentiellen Überflutungsflächen sind in den Abbildungen 17 und 18 für die Wasserstände von 1 mNN und 4 mNN dargestellt.

Unterhalb einer Höhe von 1 mNN liegen nur geringe Teile des Untersuchungsgebietes. Abbildung 17 zeigt, hier auch das Problem einer Beurteilung von Schäden durch die o.g. Methode, da bei Wasserständen von 1 mNN aufgrund der Höhenlage von mehr als 1 mNN unmittelbar hinter den Deichen keine Überflutung der tiefer gelegenen Gebiete möglich ist. Bei einem Wasserstand von 4 mNN hingegen wäre bei Deichbruch eine weiträumige Überflutung des Untersuchungsgebietes denkbar. Auch hierbei wird jedoch nicht berücksichtigt, wie weit die potentiellen Überflutungsflächen von der Deichlinie entfernt sind, so daß auch bei geringen Standzeiten einer Sturmflut weit vom Deich entfernte Gebiete als überflutet angenommen werden. Dennoch bietet das Verschneiden topographischer Karten mit dem Hochwasserstand die Möglichkeit, erste Abschätzungen des Ausmaßes von Schäden zu bestimmen.

Numerische Simulationen des Überflutungsvorganges lösen hingegen weitgehend die o.g. Probleme. Für einen angenommenen Deichbruch in der Nähe des Schweiburger Siels ist in den Abbildung 19 das Ergebnis einer derartigen Überflutungssimulation mit dem Finite-Differenzen-Modell MIKE21[®]-HD (ABBOTT, 1997) sechs Stunden nach Tideniedrigwasser der angenommenen Sturmflut vom 03.01.1976 dargestellt. Die Simulationen sind unter Voraussetzung einer 100 m breiten Deichlücke nach einem Bruch mit einer Auflösung von 25 m x 25 m durchgeführt worden. Es zeigt sich, daß nach sechs Stunden etwa eine Fläche von 16 km² überflutet ist und die Flutwelle ca. 3 km ins Landesinnere vorgedrungen ist.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.5 ermittelten Wiederkehrzeiten eines Wellenüberlaufs sowie der bei Deichbruch eintretenden Überflutungsschäden ist die Ermittlung des Risikos nach Gleichung 3 möglich.

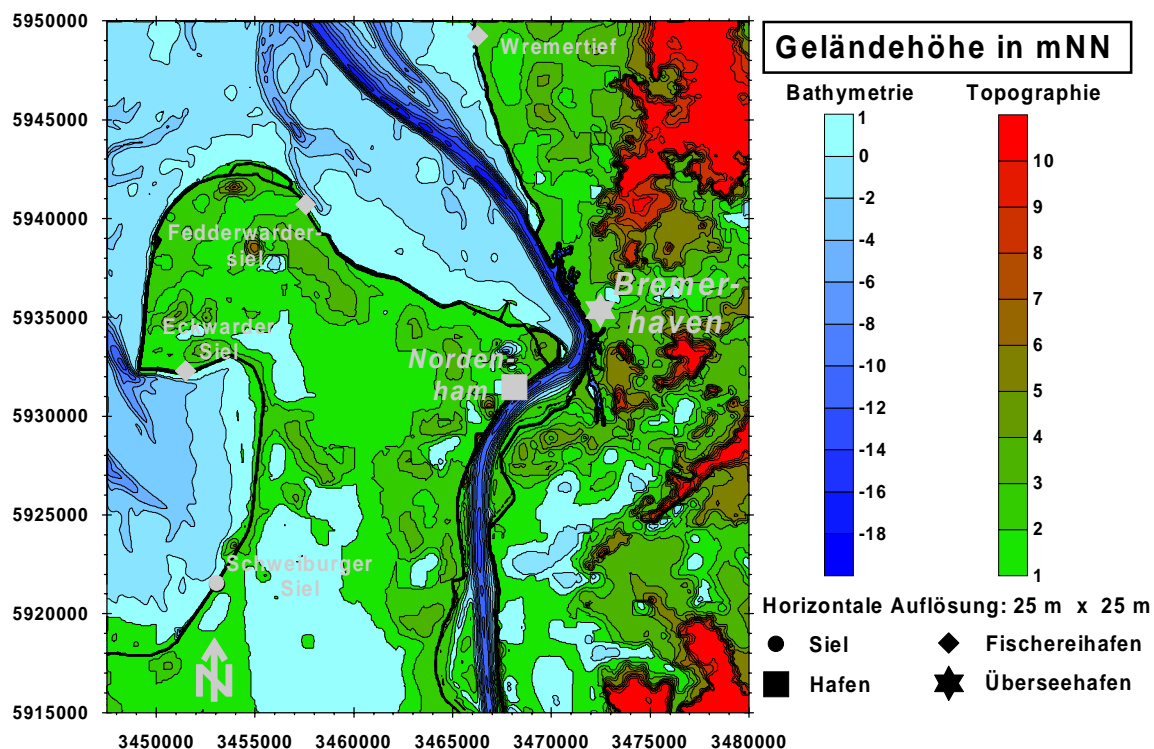


Abb. 17: Potentielle Überflutungsflächen bei einem Wasserstand von 1 mNN
(Zum Vergleich: Pegel Bremerhaven HHThw₁₉₇₆ = 5,19 mNN)

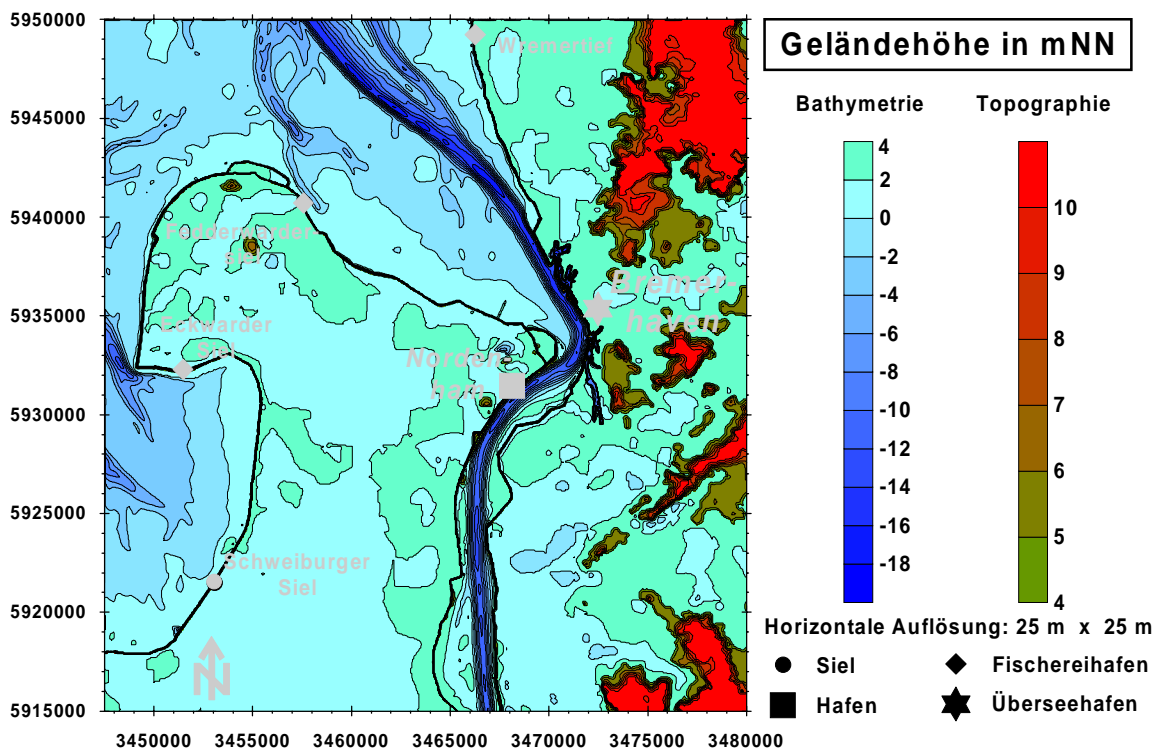


Abb. 18: Potentielle Überflutungsflächen bei einem Wasserstand von 4 mNN
(Zum Vergleich: Pegel Bremerhaven HHThw₁₉₇₆ = 5,19 mNN)

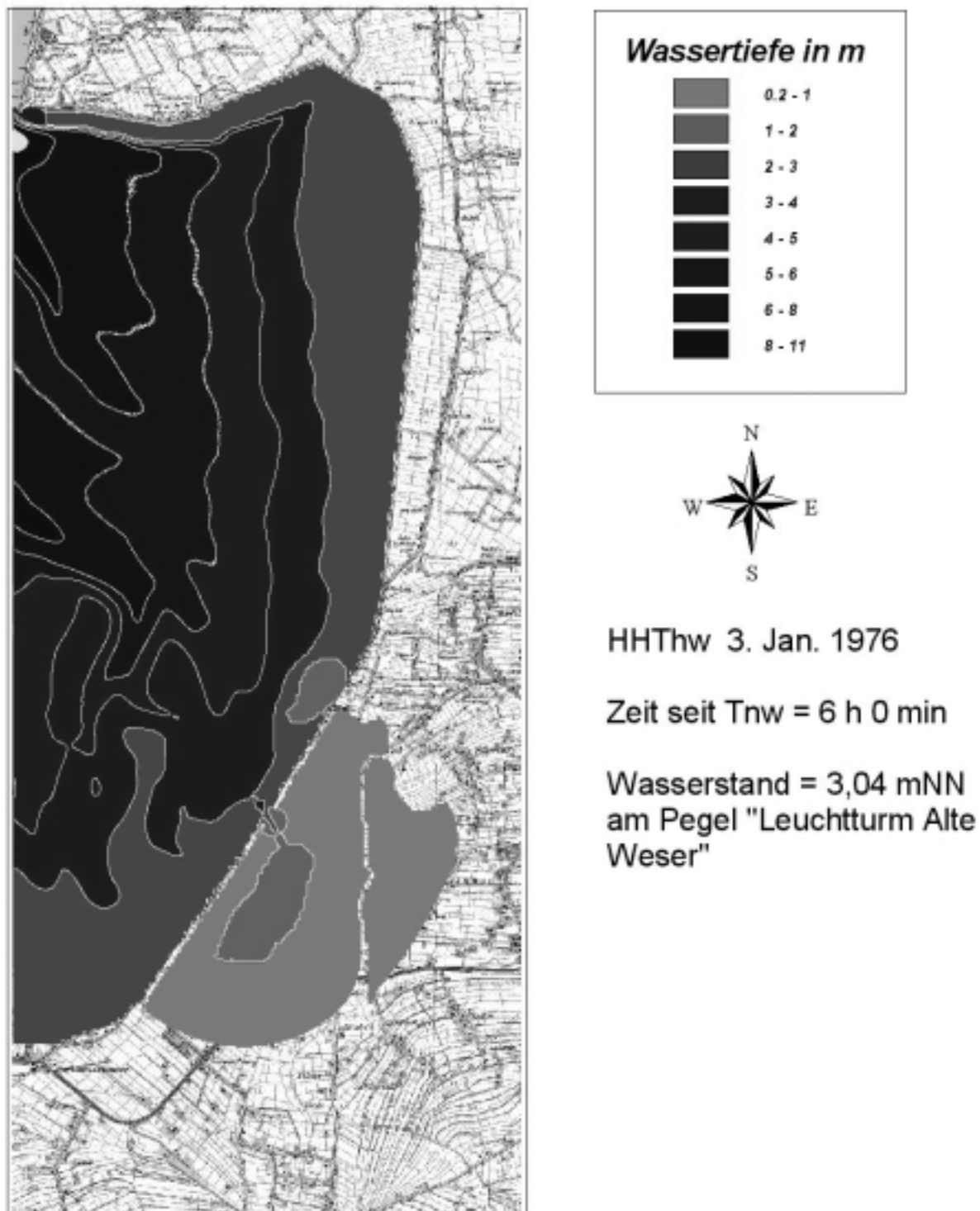


Abb. 19: Überflutungssimulation bei einem Deichbruch am Schweiburger Siel
sechs Stunden nach Tideniedrigwasser

4 Sicherheit der Deichlinie bei Klimaänderung

4.1 Veränderte Belastung bei Klimaänderung

Neben der Beurteilung der aktuellen Sicherheit eines Küstenabschnittes kann die Risikoanalyse eine Grundlage zur Beurteilung des Einflusses geänderter Randbedingungen, z.B. Wasserstandsänderungen, auf die Sicherheit liefern (MAI ET AL., 1997).

Abbildung 20 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte des Tidehochwasserstands (Thw) am Pegel Fedderwardsiel. Neben dem heutigen Zustand sind mögliche Szenarien eines Anstiegs des Tidehochwassers (Thw + Δh), z.B. als Folge von Klimaänderungen, unter Voraussetzung einer unveränderten Form der Verteilungsfunktion, wie sie nach VON STORCH/REICHARDT (1996) näherungsweise berechtigt erscheint, dargestellt. Diese Szenarien wurden analog auch auf die übrigen Pegel Bremerhaven, Brake, Wremertief und Alte Weser übertragen. Mit diesen veränderten Eintrittswahrscheinlichkeiten wurde der Einfluß eines Wasserstandsanstiegs auf die Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs am Deich berechnet. Untersuchungen des IPCC (1990) erwarten bis zum Jahr 2100 einen Wasserstandsanstieg um rd. $0,70 \text{ m} \pm 0,30 \text{ m}$.

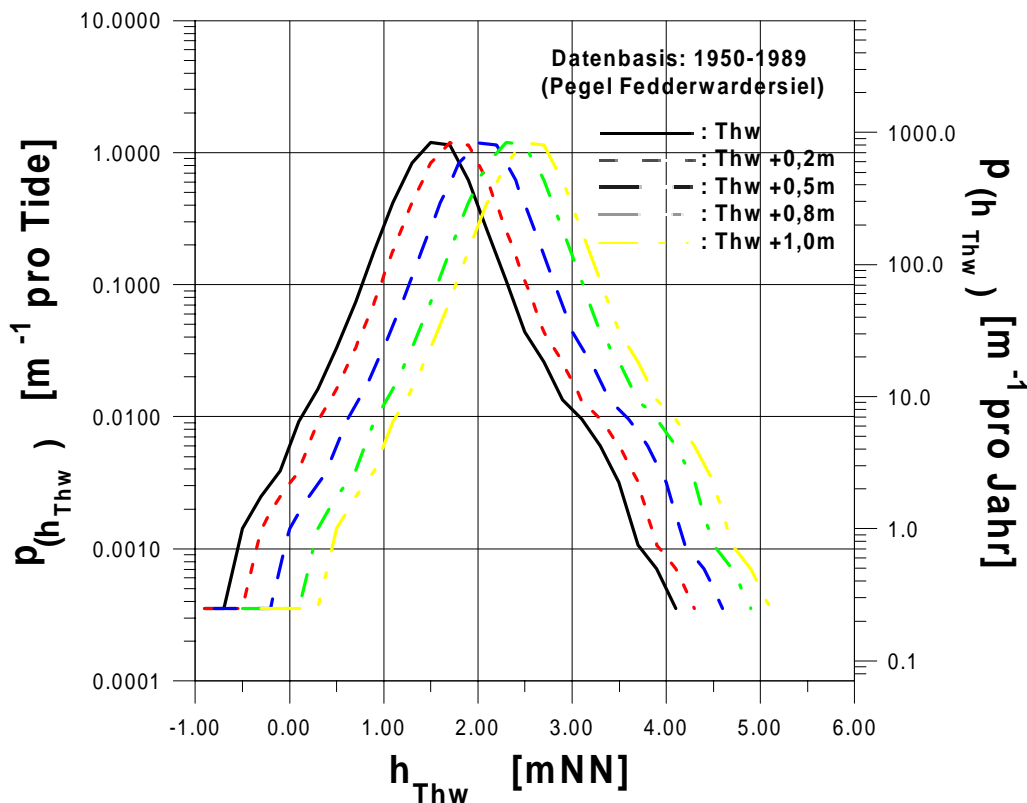


Abb. 20: Szenarien der Wahrscheinlichkeitsdichte des Tidehochwasserstandes am Pegel Fedderwardsiel (VON LIEBERMAN/MAI, 1999a)

Bezüglich der Windbedingungen bei Klimaänderung zeigen neuere Untersuchungen, z.B. von BUSCH/ROTH (1997) bzw. BUSCH (1998), daß nicht mit signifikanten Änderungen zu rechnen ist. Daher wurden derartige Einflüsse bei den vorliegenden Untersuchungen vernachlässigt.

4.2 Änderung der Wiederkehrintervalle des Wellenüberlaufs

Die sich für die fünf Deichprofile P1 und P5 des Küstenabschnitts Butjadingen bzw. die Profile P6 bis P9 Bremerhavens und Land Wurstens ergebenden Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs sind in den Abbildungen 21 und 22 dargestellt. Während die Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs im Raum Jadebusen/Butjadingen derzeit etwa 1.000 bis 1.200 Jahre beträgt (Kap. 3.5), reduziert sie sich bei einem Anstieg des Thw um 0,5 m auf 400 Jahre. Ein Anstieg des Thw um 1,0 m würde zu einer Reduzierung auf 100 Jahre führen.

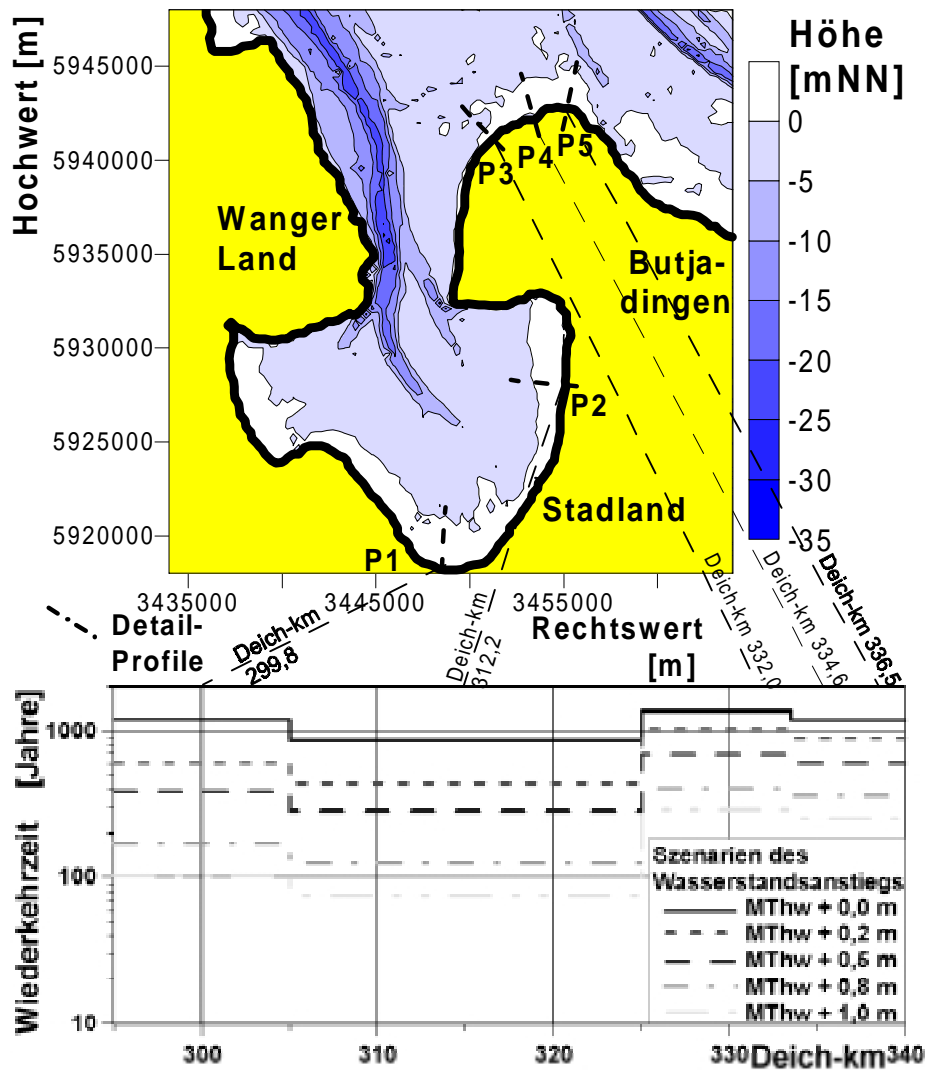


Abb. 21: Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs an Deichen der Küste Butjadingens bei verschiedenen Szenarien des Thw-Anstiegs (VON LIEBERMAN/MAI, 1999a)

Ähnlich stellt sich die Situation für das Gebiet Bremerhaven und Land Wursten dar. Bei einem Anstieg des Wasserstandes um 1,00 m wird hier das Wiederkehrintervall eines Wellenüberlaufs um etwa den Faktor zehn reduziert. Ein Anstieg um 0,50 m führt zu einer Reduktion des Wiederkehrintervalls auf ein Viertel.

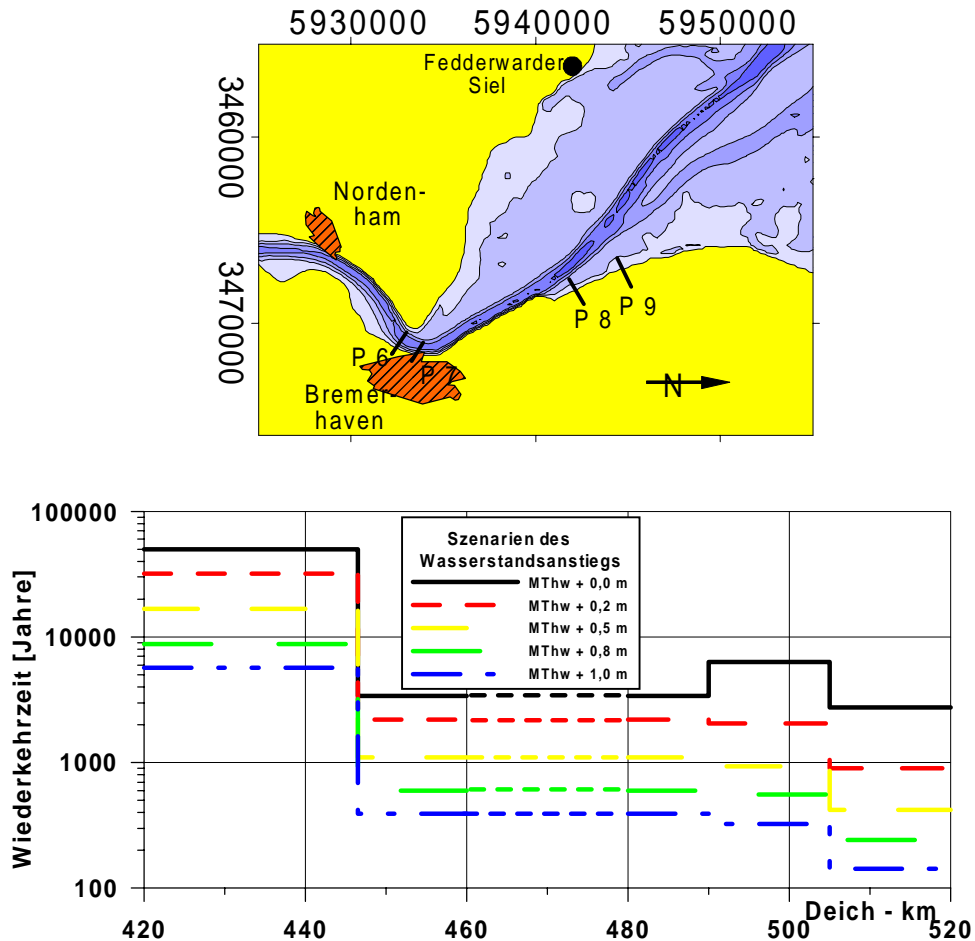


Abb. 22: Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs an Deichen in Bremerhaven und im Land Wursten bei verschiedenen Szenarien des Thw-Anstiegs

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag dargestellte Anwendung der Risikoanalyse auf den Küstenabschnitt Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten zeigt die im Vergleich zur traditionellen Bemessung von Deichen erweiterten Möglichkeiten zur Beurteilung der Sicherheit von Küstenschutzsystemen. Die probabilistische Bemessung ermöglicht dabei insbesondere eine Abschätzung der Auswirkungen von klimatisch bedingten Änderungen der hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen sowie eine bezüglich der Wiederkehrzeit von Wellenüberlauf oder bezüglich des Risikos ausgewogene Bemessung von Deichen. Das heutige Bemessungsverfahren hingegen liefert sowohl bezüglich der Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs als auch hinsichtlich des Risikos regionale Unterschiede.

6. Schrifttum

1. ABBOTT, M.B. Range of Tidal Flow Modeling.
J. Hydr. Eng., No. 4, 1997.
2. AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken.
EAK, Die Küste, H. 55, 1993.
3. BEZIRKSREGIERUNG WESER EMS (HRSG.) Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems.
Oldenburg, 1997.
4. BUNDESMINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN Bewertungsgutachten für Deichbauvorhaben an der Festlandküste – Modellgebiet Wesermarsch –. Untersuchungsbericht, 1990.
5. BUSCH, U. Eine Parametrisierung zur Erkennung von Starkwind- und Sturmweatherlagen in globalen Klimasimulationen. Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Bd. 58, 1998.
6. BUSCH, U. ROTH, R. Synoptic and Statistical Analysis of Storms in the German Bight.
Proc. of the 10th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, 1997, S. 144-148.
7. CENTRE FOR CIVIL ENGINEERING RESEARCH AND CODES (CUR) Probabilistic Design of Flood Defences.
Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW), Report 141, 1990.
8. COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (CERC) Shore Protection Manual.
Vol. 1, Washington, 1984.
9. VAN GENT, M.R.A. Numerical Modelling of Wave Interaction with Dynamically Stable Structures.
Proceedings of the 25th international Conference Coastal Engineering, 1996.
10. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) Climate Change – The IPCC Scientific Assessment.
Cambridge University Press, 1990.
11. VON LIEBERMAN, N. MAI, S. Küstenschutz an der Unterweser vor dem Hintergrund von Naturraum und Nutzung.
Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, 1999a (im Druck).

12. VON LIEBERMAN, N.
MAI, S. Sturmflutschutz des Natur- und Wirtschaftsraumes zwischen Jade und Weser – eine Beurteilung der Deichsicherheit.
Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, 1999b (im Druck).
13. MAI, S.
ZIMMERMANN, C. Seegangsatlas der Niedersächsischen Küste, Teil II: Gebiet des Jade-Weser-Ästuars.
1998.
14. MAI, S.
SCHWARZE, H.
ZIMMERMANN, C. Konzepte und Techniken im Küstenschutz in Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen.
In: STERR, H. / C. PREU (Hrsg.): Beiträge zur aktuellen Küstenforschung: Aspekte – Methoden – Perspektiven, Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, Bd. 18, 1996, S. 209f.
15. MAI, S.
SCHWARZE, H.
ZIMMERMANN, C. Safety of Coastal Defense Systems – An Assessment of the Reliability of Coastal Systems in the Event of Rising Water Levels due to Climate Change.
Proc. of the 1st International Conference "Port Coast Environment", Varna, Bulgaria, 1997, S. 11-120.
16. MAI, S.
SCHWARZE, H.
ZIMMERMANN, C. Safety Variation of Coastal Defense Systems
Proc. of the 2nd Indian National Conference on Harbour and Ocean Engineering (INCHOE), Trivandrum, India, 1997, S. 1226-1235.
17. 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.
18. MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG,
LANDWIRTSCHAFT UND
FORSTEN (MELF) Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein.
Kiel, 1986.
19. NIEDERSÄCHSISCHER MINISTER
FÜR ERNÄHRUNG,
LANDWIRTSCHAFT UND
FORSTEN
(NMELF) Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen.
Bericht des Niedersächsischen Ministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
Die Küste, H. 33, 1979, S. 1-70.
20. REEVE, D.E. Coastal Flood Risk Assessment.
Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, No. 5, 1998.

21. RIS, R.C. Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, 1998.
22. SCOUT SYSTEMS D-SAT 2, Satellitenatlas für Deutschland. 1996.
23. VON STORCH, H. REICHARDT, H. A Scenario of Storm Surge Statistics for the German Bight at the Expected Time of Doubled Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. GKSS 96/E/18, 1996.
24. TAUTENHAIN, E. Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus. Mitteilungen des Franzius-Instituts, H. 53, 1981.
25. DE WAAL, J.P. VAN DER MEER, J.W. Wave Run-up and Overtopping on Coastal Structures. Proc. ICCE, Venedig, 1992.
26. ZIMMERMANN, C. MAI, S. Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten. HANSA, Nr. 6, 1998, S. 67-70.