

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

E *A*
07. JUNI 1999 29. JUNI 1999

**BUNDESMINISTERIUM
FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE
-Meerestechnik und Küsteningenieurwesen-**

**FORSCHUNGSVORHABEN BEMESSUNG AUF SEEGANG
GESAMTSCHAU DER ERGEBNISSE, ANWENDUNGSEMPFEHLUNGEN
UND AUSBLICK**

von

Hanz Dieter Niemeyer

**NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE
-Forschungsstelle Küste-**

Schlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Bemessung auf Seegang“ (MTK 0561) - Teil I

N^o 33281 - dit. P45

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Untersuchungsziele und -Strategien	2
3. Beteiligte Institutionen	3
4. Bearbeitung des Aufgabenspektrums	5
4.1. Struktur des Seegangs	5
4.2. Schräger Wellenangriff	7
4.3. Wirkung der Bauwerksgeometrie	9
4.4. Zusammenhänge von Wellenauflauf und -überlauf	12
4.5. Räumliche Verteilung des Wellenaufbaus aus Teekeinelementen	15
4.6. Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen	16
4.7. Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen	16
4.8 Wirkung lokaler Windfelder	19
5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	19
6. Literatur	21
7. Symbole und Zeichen	23

1. EINLEITUNG

Die Sturmflut von 1953 in den Niederlanden und die von 1962 im deutschen Nordseeküstengebiet hatten das Augenmerk der Küsteningenieure verstärkt auf das Problem der Seegangbelastung von Deichen gelenkt, insbesondere auf Wellenauf- und -überlauf. In den Niederlanden waren gezielte Untersuchungen zum Seegang vor Deichen und Dünen (THIJSSSE 1952) sowie dem Wellenauflauf an Deichen (WASSING 1967; TAW 1972) bereits Ende der dreißiger Jahre dieses Jahrhunderts begonnen worden, doch erst nach und nach konnten daraus Bemessungsregeln abgeleitet werden. In dem als Reaktion auf die Sturmflut von 1953 verabschiedeten Delta-Gesetz wurde aber bereits die sogenannte DELFTer Formel (WASSING 1967) als Grundlage zur Kostenermittlung festgeschrieben. Im Gegensatz zur rechnerischen Ermittlung der Sturmflutsicherheit von Randdünen ist für die Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus von Flußdeichen erst 1989 eine Empfehlung der vom Fachministerium dafür eingesetzten „Technischen Beraterkommission für den Hochwasser- und Küstenschutz“ (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) gegeben (TAW 1989), für Seedeiche existiert eine Empfehlung, welche die Hintergründe, Verwendungsmöglichkeiten und Verlässlichkeit der verfügbaren Verfahren erläutert (TAW 1972), ohne abschließend eine Auswahl zu treffen. Allerdings ist insbesondere von der TAW im Verlauf des letzten Jahrzehnts eine Vielzahl von Untersuchungen in Auftrag gegeben worden, auf deren Grundlage eine abschließende Bemessungsempfehlung formuliert werden kann.

In Deutschland ist der Frage des Bemessungswellenaufbaus -abgesehen von Einzelaktivitäten (HENSEN 1955; HUNDT 1962)- lange Zeit keine umfassende Aufmerksamkeit gewidmet worden, obwohl Facharbeitsgruppen die Defizite und Lösungsstrategien zu deren Behebung öffentlich gemacht hatten (TWB 1967). Mit der Errichtung des Großen Wellenkanals (GRÜNE & FÜHRBÖTER 1975) begannen -vor allem im Rahmen der ehemaligen Sonderforschungsbereiche 79 und 205- wesentlich intensivere Untersuchungen zum Problembereich Wellenauflauf (FÜHRBÖTER 1991). Allerdings war die Anlage dieser Untersuchungen stark grundlagenorientiert, so daß hieraus kein unmittelbarer Nutzen für die Bemessungspraxis gezogen werden konnte.

In der deutschen Verwaltungspraxis wurde und wird teilweise heute noch empirisch bemessen. Ein Versuch, zu einer verbesserten Objektivierung und Nachvollziehbarkeit der Bestimmung des Bemessungswellenaufbaus zu gelangen, war, -gründend auf der nach der Holland-Sturmflut von 1953 von der ARBEITSGRUPPE KÜSTENSCHUTZ (1955) ausgesprochenen Empfehlung-, regelmäßig nach Sturmfluten die den Wellenauflauf mittelbar beschreibenden Treibselmarken einzumessen. Hiermit konnten Einblicke in die regionale Verteilung des Wellenaufbaus an Seedeichen und Einwirkungen örtlicher Besonderheiten dokumentiert werden (ERCHINGER 1974; INGENIEURKOMMISSION 1979; ZITSCHER et al. 1979). Hierauf aufbauend wurden nach der Sturmflut von 1976 die Grundlagen eines Verfahrens zur rechnerischen Ermittlung des Wellenaufbaus gelegt (NIEMEYER 1976, 1977).

Fragen der Sicherheit einerseits, aber auch der Wirtschaftlichkeit und der planrechtlichen Belastbarkeit erfordern zunehmend verbesserte methodisch-nachvollziehbare Bestimmungsgrundlagen für den Bemessungswellenauflauf. Vor diesem Hintergrund wurde in der Beratergruppe Küstenforschung lange und intensiv erörtert, wie die erkannten Defizite behoben werden könnten.

Im Verlauf dieser Diskussion setzte sich zunehmend die Auffassung durch, vor dem Beginn neuer kostenintensiver Untersuchungen mit finalen Zielsetzungen eine Bestandsaufnahme mit Forschungscharakter vorzunehmen, innerhalb der eine Sichtung und Verwendbarkeitsprüfung von Daten und Methoden erfolgen sollte. Ausgehend von den Vorschlägen einer eingesetzten Arbeitsgruppe wurde das Forschungsvorhaben „Bemessung auf Seegang“ beantragt und bewilligt. Später wurde das Vorhaben hinsichtlich weiterführender Untersuchungen um eine Pilotphase „Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen“ erweitert. Es liegt inzwischen zu den Ergebnissen einzelner Fragestellungen von besonderer Bedeutung eine Reihe von Untersuchungsberichten vor, die teilweise Bestandteil des Gesamtschlußberichtes sind (Teile II, III, IV und V sowie Anlageberichte A und B). Hier wird über die Zielsetzungen und Ergebnisse zusammenfassend berichtet, wobei für intensiv bearbeitete Fragestellungen ohne Erörterung von Einzelheiten auf die erwähnten eigenständigen Teilberichte verwiesen wird.))

2. UNTERSUCHUNGSZIELE UND -STRATEGIEN

Ein elementares Ziel des Forschungsvorhabens „Bemessung auf Seegang“ war es, eine kritische Bestandsaufnahme von Bemessungsansätzen für Wellenauflauf und -überlauf vorzunehmen. Hierbei sollte im wesentlichen auf verfügbare Daten und Methoden zurückgegriffen werden. Diese Vorgabe entstand nicht aus einer vorgegebenen Mittelbegrenzung. Sie entsprang vielmehr der Einsicht, daß die Konsequenz aus einer Nichtberücksichtigung noch ungenutzter potentieller Ressourcen sowohl Doppelarbeit als auch Effizienzverluste sein würden.

In der Planungsphase des Projekts war eine Übersicht darüber gewonnen worden, aus welchen Quellen Daten und Methoden abgeschöpft werden konnten, ohne dafür eigene Aufwendungen hinsichtlich Datengewinnung und Verfahrensentwicklung erbringen zu müssen. Es waren dies vor allem folgende Bestände:

1. Aus Untersuchungen im Rahmen der ehemaligen Sonderforschungsbereiche 79 und 205 im Großen Wellenkanal durch das Teilprojekt A5 (Leitung: Professor Führbötter †; Dr.-Ing. Dette) standen noch Datensätze zur Verfügung, die hinsichtlich der hier gewählten Aufgabenstellung noch als nutzbringend eingeschätzt wurden. Von Seiten des Teilprojektleiters wurde die Nutzung der Daten gestattet. Hierdurch war gleichzeitig eine Möglichkeit gegeben, diese Daten für die Nachwelt verfügbar zu machen.
2. Bei den damaligen Ämtern für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum sowie bei der Forschungsstelle Küste wurden vor und während der Projektdauer Naturmessungen von Seegang und Wellenauflauf vorgenommen. Die Daten standen für das Projekt zur Verfügung.
3. Die Küstendienststellen der Länder Niedersachsen und Schleswig-Holstein hatten nach Sturmfluten wiederholt Einmessungen der Treibselkante, des Teek, vorgenommen. Diese Datensätze standen in verschiedenartig dokumentierter Form zur Verfügung. Auch in diesem Fall wurde mit der Einbeziehung in das Projekt eine Sicherung von Informationen als Zielsetzung verbunden.

4. Die niederländische TAW hatte mit dem Einsatz erheblicher Mittel Untersuchungen in Auftrag gegeben, die als Grundlage für eine verbesserte Berechnung des Bemessungswellenaufbaus dienen sollten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren zwar überwiegend nicht veröffentlicht; sie waren aber für den Projektleiter und damit auch für alle Projektbeteiligten zugänglich. Hiervon wurde Gebrauch gemacht, da hiermit eine effiziente Bereicherung des Projekts ermöglicht wurde.

Mit der Einbeziehung dieser Daten und Quellen waren erhebliche Vorteile gegenüber einer eigenständigen Datenerhebung und Versuchsausführung gegeben. Geschmälert wurden diese Vorteile lediglich durch die Abhängigkeit des Untersuchungsfortschritts von Basisinformationen, deren Qualität und Brauchbarkeit nur bedingt bei Projektbeginn abschätzbar war. Um diesem Risiko begegnen zu können, wurde die Untersuchungsstrategie von vornherein flexibel ausgerichtet. Bei unzureichender Eignung von Basisinformationen für eine bestimmte Fragestellung war vorgesehen, hier die Bearbeitungstiefe weniger weit zu führen als wünschenswert. Zum Ausgleich sollte die Bearbeitung einer anderen Fragestellung entsprechend vertieft werden. Hiermit sollte eine effiziente Nutzung der Untersuchungsressourcen gesichert werden.

Diese Untersuchungsstrategie war allerdings nur deshalb möglich, weil das zu bearbeitende Problemfeld größer war als durch den Projektumfang abdeckbar. Die Vorgehensweise hat sich im Verlauf des Projektes als ausgesprochen zweckmäßig erwiesen, da sich für einige Problemfelder nach ersten Untersuchungsschritten ergab, daß die Basisinformationen für weitergehend zielführende Untersuchungen nicht hinreichend waren. In solchen Fällen konnten die Untersuchungskapazitäten dann zielgerichtet auf andere Problemfelder angesetzt werden. Durch die Bearbeitung aller Problemfelder auf dem Einstiegsniveau konnte aber eine Gesamtschau des Daten- und Methodenstatus für die methodische Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus gewonnen werden. Auf diese Erkenntnisse aufbauend kann dann bei zukünftigen Untersuchungen von vornherein eine verbesserte Ausrichtung geplant werden.

3. BETEILIGTE INSTITUTIONEN

Das Vorhaben war von Dienststellen der im KFKI vertretenen Verwaltungen initiiert worden, die von ihrem Aufgabenfeld her besonderes Interesse an einer Minderung der bestehenden Defizite hatten. Insbesondere haben Vertreter der federführenden Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie, der Bezirksregierung Weser-Ems und des damaligen schleswig-holsteinisches Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide die Projektplanung betrieben, an der auch frühzeitig die Gemeinsame Zentrale Einrichtung Großer Wellenkanal der Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig beteiligt wurde. Die projektvorbereitende Arbeitsgruppe bestand aus den Herren Gärtner, Grüne, Niemeyer, Peters und Siefert. Nach Projektbeginn wurde der Kreis der begleitenden Projektgruppe erweitert, um sowohl externe Kompetenz für den Arbeitsfortschritt zu nutzen, als auch um die Informationen darüber umgehend anderweitig verfügbar zu machen. Der Projektgruppe gehörten an:

Akad. OR Dr.-Ing. Karl-Friedrich Daemrich
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen
Universität Hannover

RBD Dipl.-Ing. Jochen Gärtner
Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide

Dipl.-Ing. Joachim Grüne
Gemeinsame Zentrale Einrichtung Großer Wellenkanal Hannover

Dr. Jacobus Hoftstede
Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein

Dipl.-Ing. Frerk Jensen
Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum

Dipl.-Ing. Ralf Kaiser
Niedersächsisches Landesamt für Ökologie -Forschungsstelle Küste-

Dipl.-Ing. Hanz D. Niemeyer
Niedersächsisches Landesamt für Ökologie -Forschungsstelle Küste-
(Obmann)

BD Klaas H. Peters
Bezirksregierung Weser-Ems -Dezernat Wasserwirtschaft-

Prof. Dr.-Ing. Werner Richwien
Universität Essen
Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik

RD Dipl.-Met. Heiner Schmidt
Deutscher Wetterdienst -Seewetteramt Hamburg-

Prof. Dr.-Ing. Winfried Siefert †
Amt für Strom- u. Hafenausbau Hamburg

Dr.-Ing. Dietrich Weiss
Staatliches Amt für Natur und Umwelt Rostock
-Abteilung Küste-

Die inhaltliche Bearbeitung fand schwerpunktmäßig bei der Forschungsstelle Küste und bei der damaligen GEZ Großer Wellenkanal statt, wo auch das Ergänzungspersonal angesiedelt war. Von der Forschungsstelle Küste und den Ämtern für Land- und Wasserwirtschaft wurden zudem in erheblichem Umfang Eigenleistungen eingebracht.

Beim damaligen Seewetteramt war das Teilprojekt „Lokale Windfelder“ angesiedelt, das gemeinsam mit der Forschungsstelle Küste bearbeitet wurde. Beim Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik der Universität-GHS Essen wurden bodenmechanische Aspekte der Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen untersucht. Beide Teilaufgaben waren Bestandteil der später integrierten Pilotphase „Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen“, innerhalb der auch ein Auftrag durch das niederländische WLIDelft Hydraulics bearbeitet wurde.

In der Projektplanung war in der vorbereitenden Arbeitsgruppe eine Aufgabenteilung abgestimmt worden, die dann auch im Antrag festgehalten wurde. Im Verlauf des Projektes stellte die beteiligte GEZ Großer Wellenkanal den dafür erforderlichen Datenaustausch mit der Begründung ein, als wissenschaftliche Einrichtung liefere man keine Daten, sondern nur Ergebnisse. Die GEZ Großer Wellenkanal hat sich dann bemüht, das Aufgabenspektrum des Vorhabens über den ursprünglich vereinbarten Umfang hinaus soweit zu bearbeiten, wie dort Daten verfügbar waren. Diese Vorgehensweise wurde vom Projektleiter unter Protest hingenommen, um die weitere Bearbeitung nicht weitgehender zu beeinträchtigen und um Doppelarbeit zu vermeiden. Dies war vor allem deshalb möglich, da der Umfang des Aufgabenspektrums eine Umorientierung und vertiefte Bearbeitung anderer Untersuchungsinhalte erlaubte.

4. BEARBEITUNG DES AUFGABENSPEKTRUMS

4.1. Struktur des Seegangs

Die Untersuchungen erfolgten auf der Grundlage von Daten aus hydraulischen Modellversuchen im Großen Wellenkanal. Hierbei wurde Wellenauflauf mit regelmäßigen Wellen, parametrisierten und Naturspektren erzeugt. Ergänzend wurden Daten von Naturmessungen von vier Stationen an der schleswig-holsteinischen Küste genutzt. Die Ergebnisse sind in Teil IV des Schlußberichtes dargestellt.

Es zeigt sich aber, daß die Ergebnisse nicht als Grundlage für die künftige Bemessungspraxis herangezogen werden können, da sie zum einen nicht zu verallgemeinern sind und zum anderen auch nicht hinreichend belastbar. Die Fragestellung, ob Strukturunterschiede von Seegangsspektren Auswirkungen auf den Wellenauflauf haben, ist jedoch von grundlegender Bedeutung. Wie anhand gemessener Seegangsspektren in Deichnähe deutlich wird (Abb. 1.1), können diese Strukturunterschiede erheblich sein, aber über deren mögliche Auswirkungen auf den Wellenauflauf ist wenig bekannt. In der Regel werden in den Wellenaufformeln nur die kennzeichnenden Seegangparameter Wellenhöhen und -perioden berücksichtigt, nicht aber die Energiedichteverteilung über die Frequenzen. Bemerkenswerte Ausnahmen stellen in dieser Hinsicht der Beiwert für die spektrale Breite in der Formel von VAN OORSCHOT & D'ANGREMOND (1968) sowie die mögliche Berücksichtigung von Doppelpeak-Spektren über einen Beiwert durch VAN DER MEER & DE WAAL (1993) dar. Diese Ansätze zielen aber nicht auf die Strukturen von Spektren mit mehr als zwei Energiedichtemaxima.

Insofern ist die Problematik der hier aufgezeigten Mehrfachpeaks bei Spektren damit nicht lösbar; sie soll daher weiterverfolgt werden. Hierzu sind aufbauend auf vorliegenden Erfahrungen im Rahmen der Vorbegutachtung zum beantragten KFKI-Forschungsvorhaben „Überlaufbelastung von Deichbinnenböschungen“ entsprechende Empfehlungen abgegeben worden, die in Abstimmung mit dem Projektträger in den Antrag aufgenommen worden sind.

Eine weitere Studie erfolgte im Rahmen des Projektes als Eigenleistung in Zusammenhang mit einer aktuellen Problemstellung der Praxis. Hierbei zeigte sich, daß die damals als gängig angesehenen Formeln zur Ermittlung des Wellenaufbaus bei völlig gleichartigen Randbedingungen zu stark differierenden Ergebnissen führen (NIEMEYER 1995).

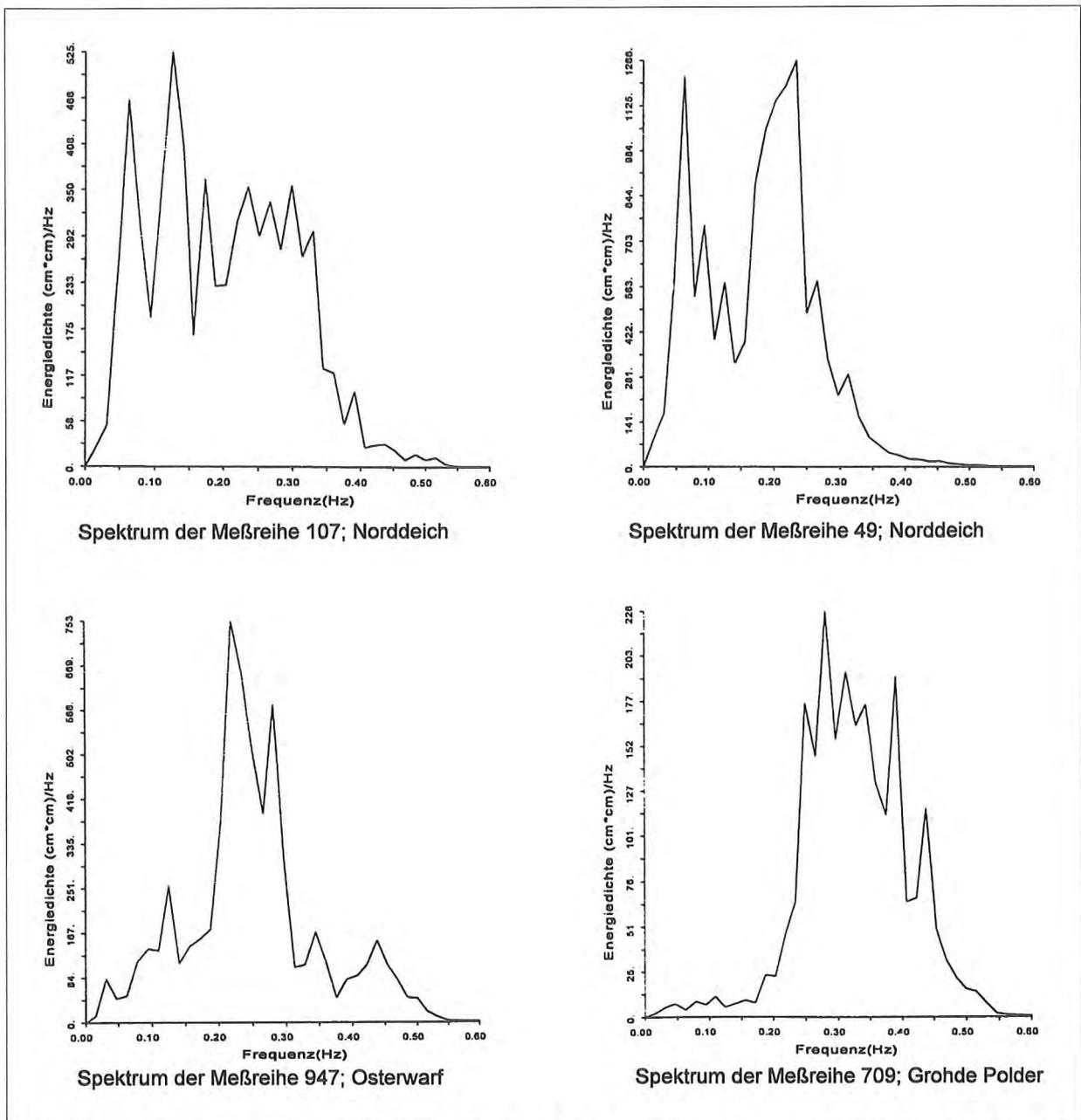


Abb. 1.1: Beispiele von Mehrfachpeaks bei Spektren im Watt vor Deichen (NIEMEYER et al. 1995)

Die mit dieser Untersuchung aufgeworfenen Fragen sind im Vorhaben nicht geklärt worden. Hinsichtlich der Bemessungspraxis wird empfohlen, bis auf weiteres den Ansatz nach VAN DER MEER & DE WAAL (1993) zu befolgen, der sowohl auf klein- als auch auf großmaßstäblichen Modellversuchen beruht (Abb. 1.2). Dieser Ansatz sollte bei Zulassen eines Überlaufs von 3% der anlaufenden Wellen nach der Empfehlung des TWB (1967) ohne die Erhöhung des Sicherheitsbeiwerts nach VAN DER MEER & JANSSEN (1994) verwendet werden:

$$A_{97} = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot H_s \cdot T_p \cdot \tan \alpha} \quad (1)$$

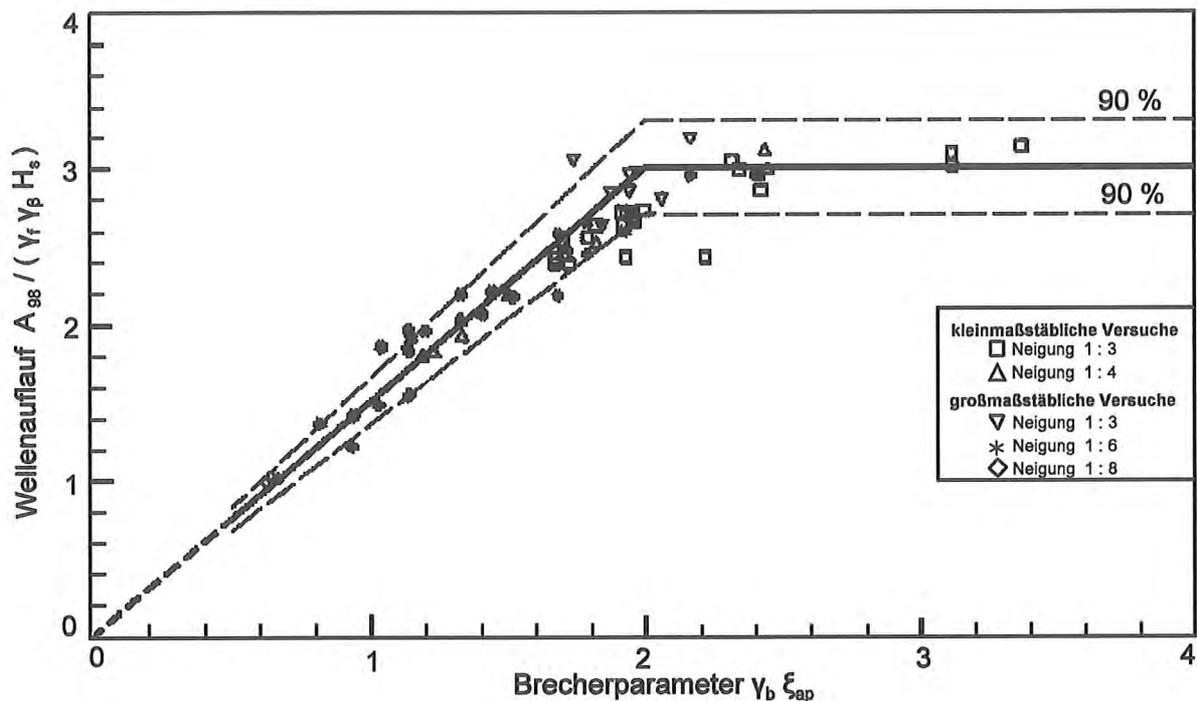


Abb. 1.2: Datengrundlagen für die Wellenaufbaumformel nach VAN DER MEER & DE WAAL (1993)

4.2. Schräger Wellenangriff

Es standen Daten von vier Meßstationen im Watt und am Elbeufer der schleswig-holsteinischen Wattküste zur Verfügung. Die Ergebnisse sind im Teil IV des Schlußberichtes dargestellt. Es zeigte sich bei der Analyse der Meßwerte, daß die morphologische Prägung des Seegangs vor den Deichen zu stark ist, um eine für systematische Untersuchungen hinreichende Bandbreite der Wellenangriffsrichtung zu erhalten. Die Anlaufrichtungen der Wellen differieren bei verschiedenen Sturmfluten bei gleichzeitiger Streuung zu wenig, so daß eine abgesicherte Analyse des Richtungseinflusses auf den Wellenaufbau mit dem Ziel einer allgemeinen Aussage auf dieser Grundlage nicht möglich war.

Um dennoch für die Bemessungspraxis zu nutzbaren Aussagen zu kommen, sind eine ergänzende Literaturstudie und ein Informationsaustausch mit Fachinstitutionen in den Nachbarländern Dänemark und Niederlande vorgenommen worden, wie es bei Antragstellung als Alternative bei Nichtverfügbarkeit geeigneter Daten angezeigt worden war. Auch bei der nochmaligen Literaturrecherche zeigte sich, daß bei Untersuchungen zum schrägen Wellenangriff auf Deiche eine Verstärkung des Wellenaufbaus eintreten kann (VAN DER MEER & DE WAAL 1990; MÜHLESTEIN 1995). Bei kleinen Winkeln der Wellenanlaufrichtung zur Deichnormalen (Abb. 2.1) waren bei früheren Untersuchungen höhere Werte für den Wellenaufbau oder -überlauf als bei senkrechtem festgestellt worden (OWEN 1980; TANTENHAIN 1982). Die Ergebnisse von MÜHLESTEIN (1995) aus Untersuchungen mit PIERSON-MOSKOWITZ-Spektren bestätigen tendenziell die von OWEN (1980) und TANTENHAIN (1982) bei Versuchen mit regelmäßigen Wellen ermittelten Ergebnisse.

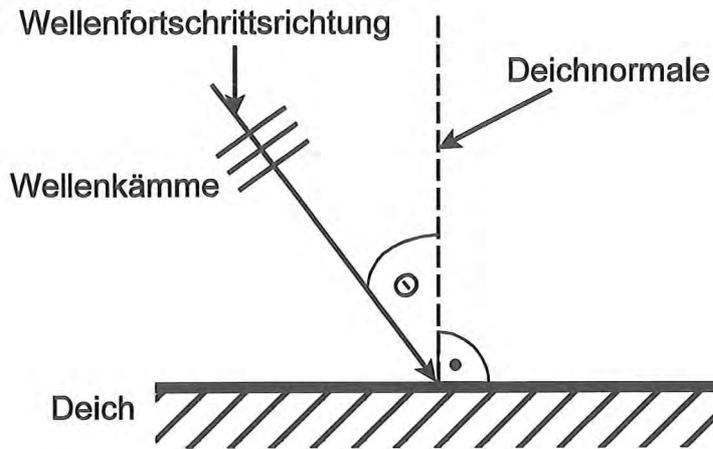


Abb. 2.1: Schema des schrägen Wellenangriffs auf Deiche

Einen wesentlichen Erkenntnisfortschritt erbringen die Untersuchungen von VAN DER MEER & DE WAAL (1993), die diesen Effekt sowohl für langkämigen Seegang als auch für kurzkämigen Seegang untersuchen. Bei langkämigem Seegang zeigt sich auch hier bei der Effekt einer Erhöhung des Wellenaufbaus bei schrägem Wellenangriff unter kleinen Winkeln (Abb. 2.2). Bei kurzkämigem Seegang tritt dieser Effekt hingegen nicht auf (Abb. 2.3). Da der Seegang an der deutschen Nordsee- und Ostseeküsten insbesondere bei Sturm kurz-

kämig ist, wird bis auf weiteres empfohlen, den Einfluss schrägen Wellenangriffs auf den Wellenaufbau nach VAN DER MEER & DE WAAL (1993) bis auf weiteres wie folgt zu berücksichtigen:

$$\gamma_R = 1 - 0,0022 \cdot \beta$$

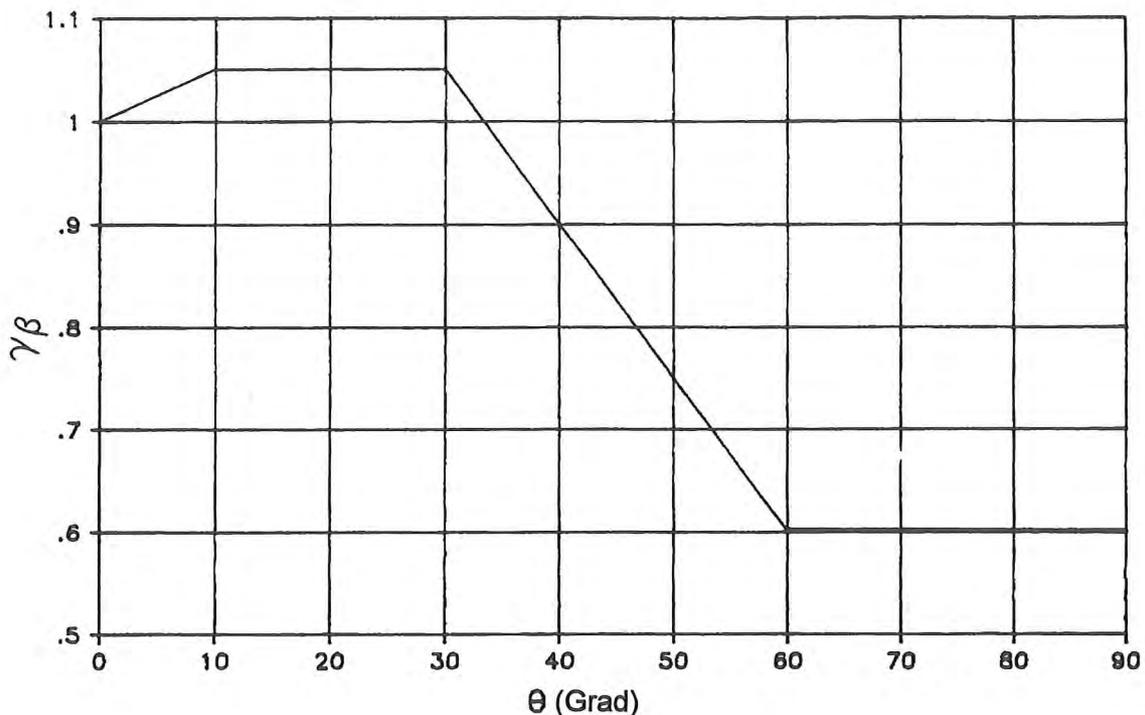


Abb. 2.2: Einfluß der Wellenangriffsrichtung auf den Wellenaufbau bei langkämigen Seegang (VAN DER MEER & DE WAAL 1993)

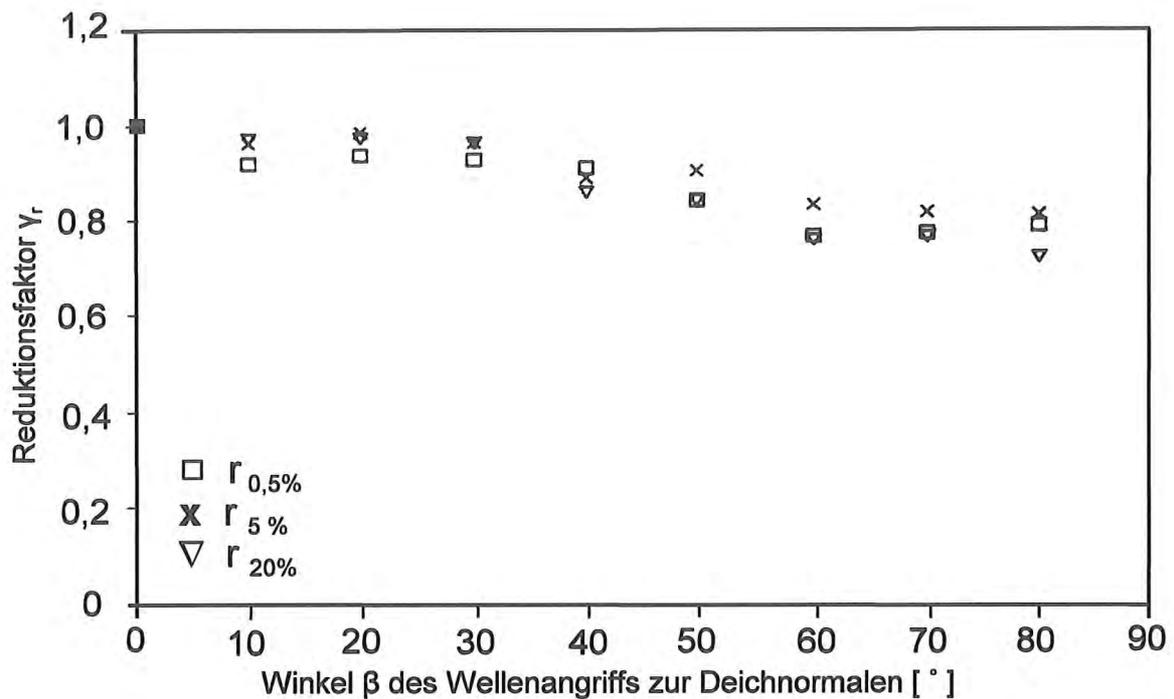


Abb. 2.3: Einfluß der Wellenangriffsrichtung auf den Wellenauflauf bei kurzkämmigen Seegang (VAN DER MEER & DE WAAL 1990)

Es ist aber vorgesehen, hierzu im Rahmen eines derzeit projektierten KFKI-Forschungsvorhabens Grundsatzuntersuchungen vorzunehmen, um abschließend zu klären, ob bei kurzkämmigem Seegang Erhöhungen des Wellenaufbaus durch schrägen Wellenangriff ausgeschlossen werden können.

4.3. Wirkung der Bauwerksgeometrie

Die allgemein bekannten Formeln zur Ermittlung des Wellenaufbaus sind auf der Grundlage von hydraulischen Modellversuchen ermittelt worden, bei der die Deichaußenböschungen eine einheitliche Neigung hatten (BATTJES 1970, 1971). Ästuar- und insbesondere Seedeiche weisen aber -vor allem im Bereich der Außenbermen- eine wesentlich komplexere Geometrie auf (Abb. 3.1).

Aus diesem Grund wurde deren Wirkung auf den Wellenaufbau besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Hierfür standen Daten von Naturmessungen an der schleswig-holsteinischen Westküste zur Verfügung; die Daten von der niedersächsischen Küste waren dafür nicht hinreichend geeignet: Die verfügbaren Daten waren bei Sturmflutwasserständen erfaßt worden, die zu niedrig waren, um die Aufhebung der Bermenwirkung zu ermöglichen. Weiterhin lagen umfangreiche Datensätze des ehemaligen Teilprojekts A5 des Sonderforschungsbereiches 205 vor. Die darauf fußenden Untersuchungsergebnisse sind im Teil IV des Schlußberichtes zusammengestellt.

Für die Bermenwirkung wird ein modifizierter Ansatz vorgeschlagen, der für Daten von Laboruntersuchungen mit regelmäßigen Wellen und PIERSON-MOSKOWITZ-Spektren

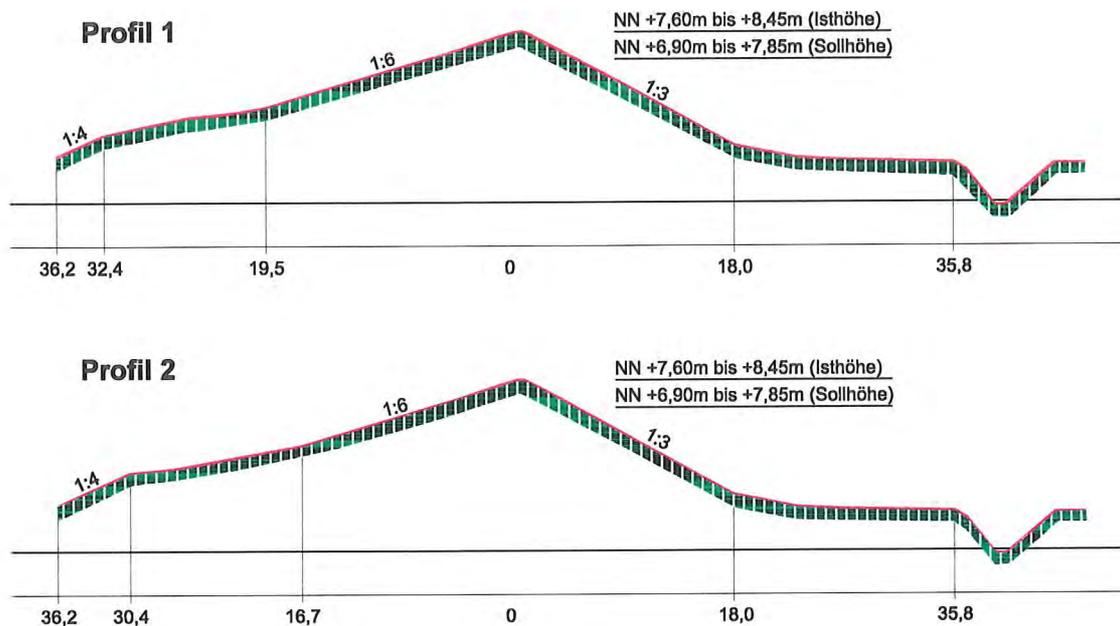


Abb. 3.1: Beispiel für Deichaußenböschungen mit Außenbermen (Versuchsprofile Elisabethgradendeich im Wangerland)

gute Übereinstimmungen aufweist. Allerdings gilt dies weniger für Naturspektren im hydraulischen Modell und noch weit weniger für die Übertragung auf Naturbedingungen.

Parallel zur Datenanalyse ist eine Literatur-Recherche vorgenommen worden, deren Ergebnisse derzeit für die Bemessungspraxis wie folgt zusammengefaßt werden können:

a) Bermenwirkung: Die reduzierende Wirkung auf den Wellenauflauf ergibt sich dann nach folgendem Ansatz (Abb. 3.2; VAN DER MEER & JANSSEN 1994):

$$\gamma_B = 1 - \frac{B_B}{L_B} \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \left[\frac{h_B}{H_S} \right]^2 \right)$$

für $-1,0 \leq h_B/H_S \leq 1,0$ und $0,6 \leq \gamma_B \leq 1,0$

Um noch eine wesentliche Bermenwirkung beim Bemessungswasserstand zu gewährleisten, muß ihre Höhenlage nach dem angegebenen Gültigkeitsbereich der Formel oberhalb folgenden Niveaus liegen:

$$N_B \geq \text{BWSt} - H_{S(\text{BWSt})}$$

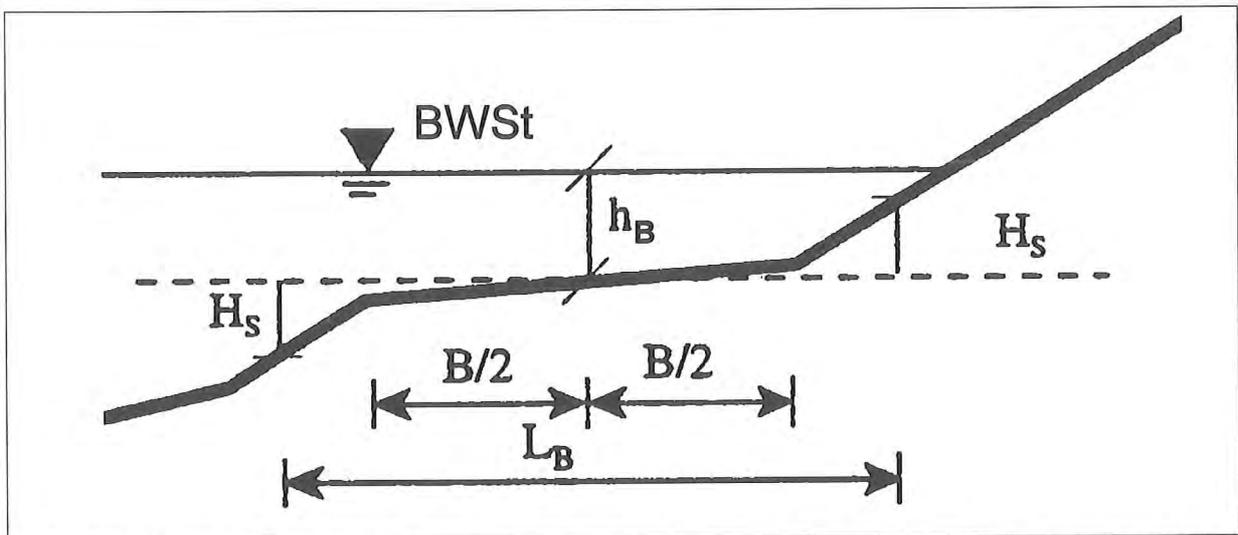


Abb. 3.2: Prinzipskizze zur Ermittlung des Reduktionsfaktors γ_B für die Bermenwirkung beim Wellenauflauf

Hierin liegt ein Widerspruch zur Formel selbst, die eine weitergehende Bermenwirkung bis zum Wert

$$\frac{h_B}{H_s} = \sqrt{2}$$

ergibt. Außerhalb des -ohne physikalische Plausibilisierung- definierten Hauptwirkungsbereichs von $h_B/H_s \leq \pm 1$ erfolgt eine ausgesprochen willkürliche Festlegung auf eine lineare Bermenwirkung, für die auch in der Hintergrundliteratur keine physikalisch nachvollziehbare Erläuterung zu finden ist. Ebenso ist die Festlegung des unteren und oberen Grenzwerts für die Bermenwirkung nicht physikalisch hergeleitet; sie sind nicht nachvollziehbar.

Auf dem Gebiet der Bermenwirkung verbleibt ein erheblicher Forschungsbedarf. Aufgrund der hier gewonnenen Erfahrungen wird aber dringend empfohlen, derartige Untersuchungen zukünftig in begrenzten, aufeinander aufbauenden Einzelschritten vorzunehmen, die jeweils zu abschließenden Ergebnissen führen. Die hohen Kosten physikalischer Modelle und das hohe Maß an Unwägbarkeiten der Datenverfügbarkeit bei Naturmessungen lassen es geboten erscheinen, hierfür verstärkt mathematische Wellenauflaufmodelle heranzuziehen und sie dabei hinreichend zu verifizieren. Eine solche Vorgehensweise soll in einem einjährigen Pilotprojekt des KFKI „Optimierung von Deichprofilen“ auf seine Belastbarkeit getestet werden.

b) Knickprofile: Die Wirkung von Knickprofilen wird durch die Annahme einer durchgehenden Ersatzböschung (Abb. 3.3) substituiert. Hierbei werden die beiden Punkte eines Profils mit unterschiedlichen Deichneigungen linear miteinander verbunden, die um das Eineinhalbfache der signifikanten Wellenhöhe ober- und unterhalb des Bemessungswasserstandes liegen (VAN DER MEER 1997).

Darüber hinaus sind mittlerweile mathematische Modelle des Wellenaufbaus an Deichen verfügbar (VAN GENT 1995). Die dafür ausgeführten Verifikationen lassen es als angemessen erscheinen, hiermit die Wirkung komplexer Geometrien auf den Wellenaufbau

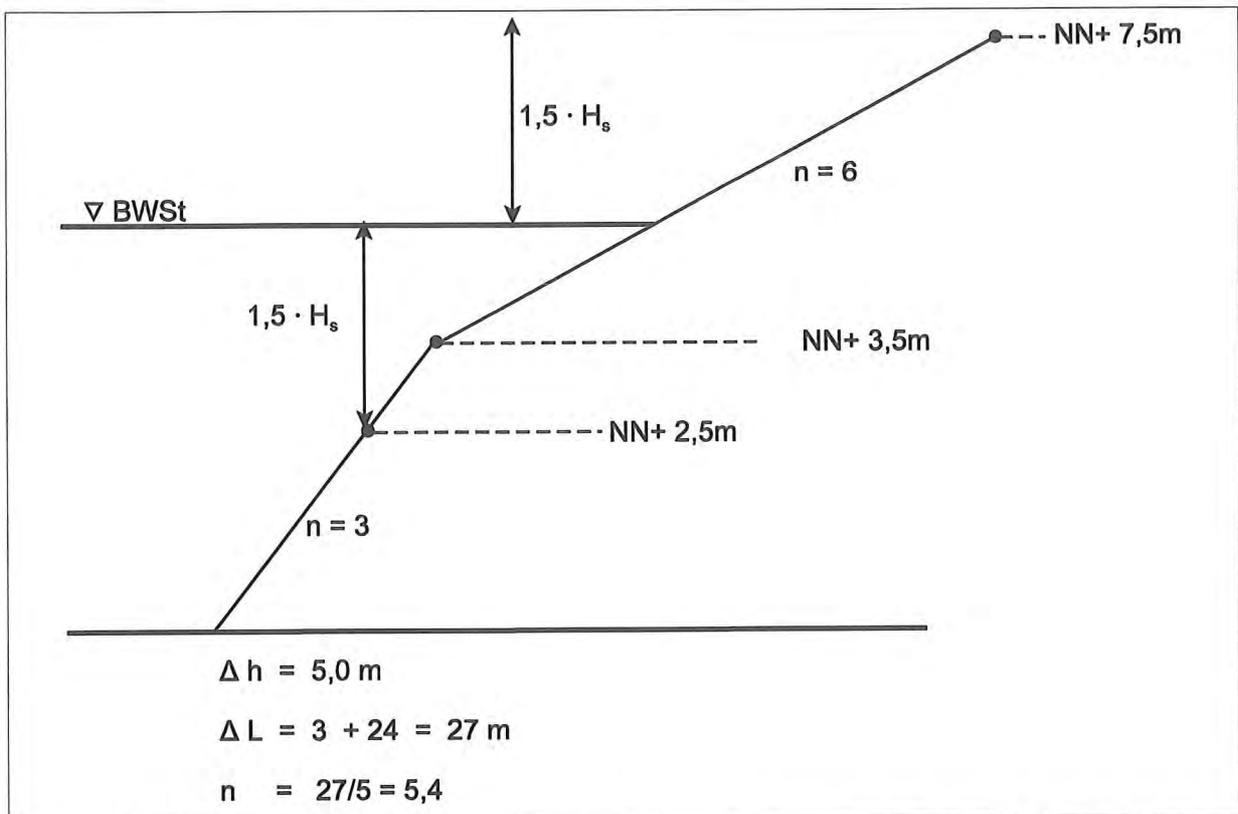


Abb. 3.3: Schema zur Ermittlung der effektiven Neigung für den Wellenauflauf von Deichaußenböschungen mit Knickprofilen

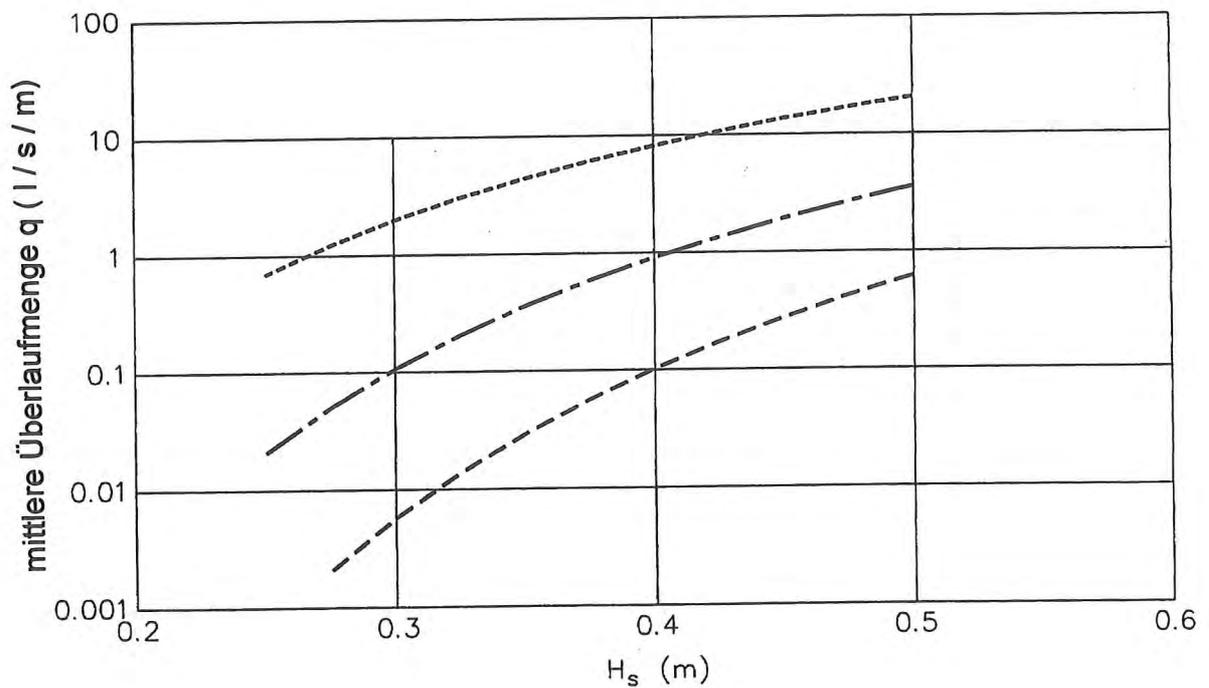
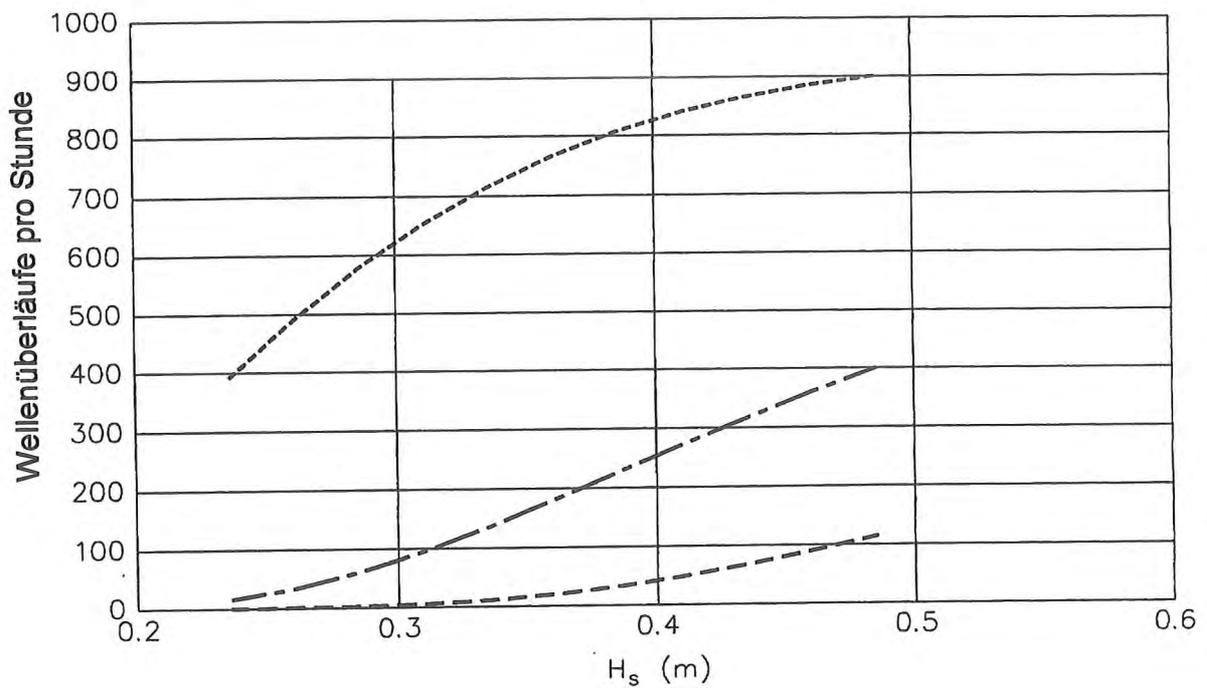
-zumindest relativ- zu bewerten (NIEMEYER 1997; NIEMEYER & KAISER 1998a, 1998b). Diese Vorgehensweise soll in dem bereits erwähnten KFKI-Pilotprojekt „Optimierung von Deichprofilen“ auch in dieser Frage hinsichtlich seiner Belastbarkeit und der Möglichkeit der Verifizierung eingehend überprüft werden.

4.4. Zusammenhänge von Wellenauflauf und -überlauf

Es war vorgesehen, aufbauend auf einer Schriftumsanalyse den Zusammenhang von Wellenauf- und -überlauf auf der Grundlage von Daten hydraulischer Modellversuche im Großen Wellenkanal eingehend zu analysieren und daraus Rückschlüsse für die Bemessungspraxis zu ziehen.

Es zeigte sich aber, daß die bei der GEZ Großer Wellenkanal verfügbaren Daten diesen Ansprüchen nicht genügten. Die Versuche im Rahmen des ehemaligen Sonderforschungsbereichs 205 waren ohne Feststellung von Wellenüberlauf vorgenommen worden.

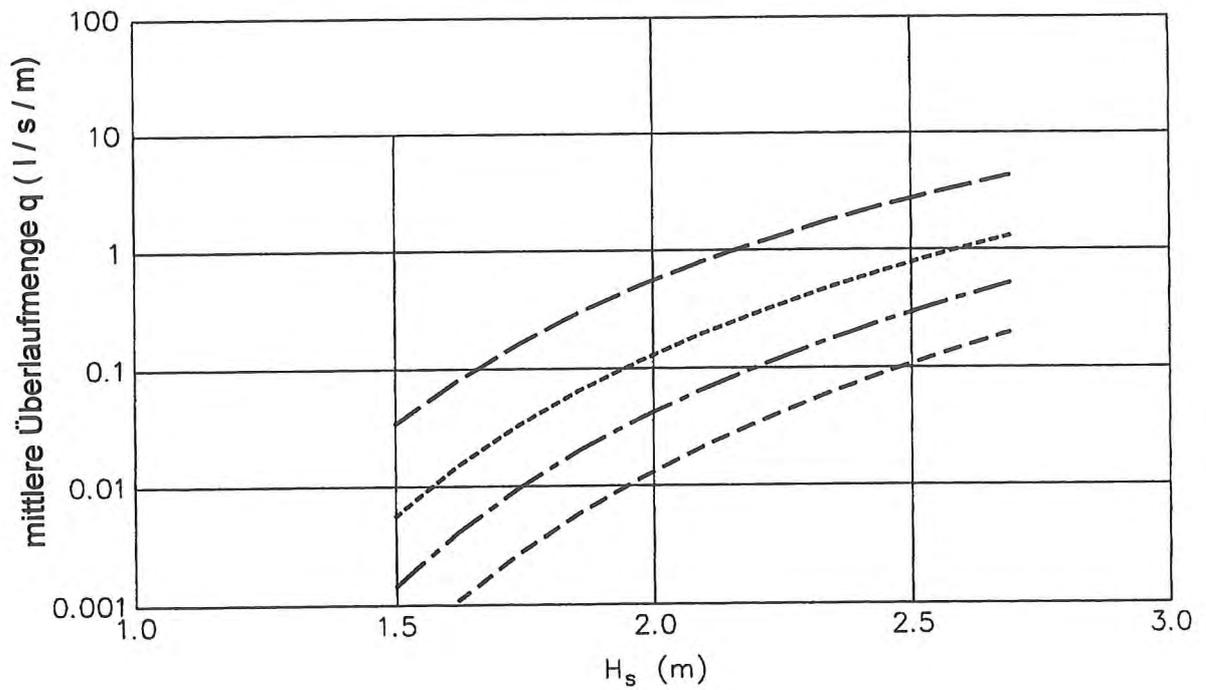
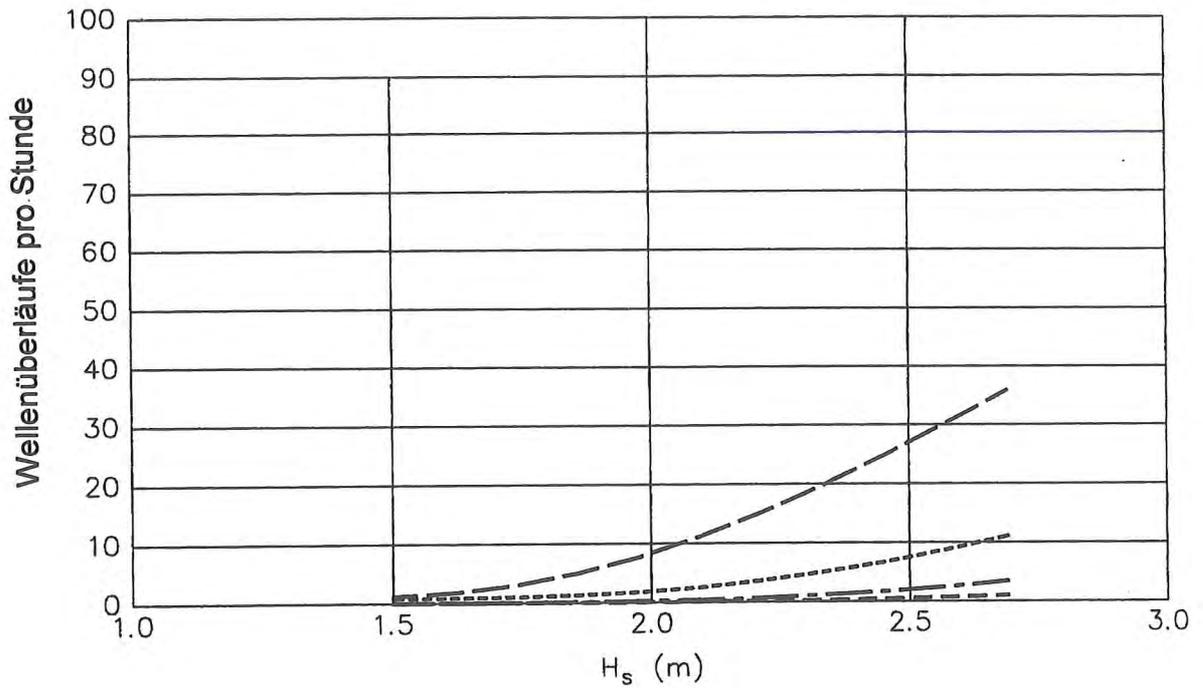
Die Fragestellung konnte dann eingehender im Rahmen einer Auftragsstudie untersucht werden, die vom WLI/Delft Hydraulics im Rahmen der Pilotphase „Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen“ vorgenommen wurde (DE WAAL 1996). Hierbei zeigte sich deutlich, daß die in den meisten Formeln zur Ermittlung des Wellenaufbaus enthaltene Angabe einer bezogen auf die Zahl der Wellenaufäufe prozentualen Überlauf-toleranz für die Belastung der Binnenböschungen ein unzureichendes Kriterium darstellen (Abb. 4.1 + 4.2). Es wird aber -insbesondere in Zusammenhang mit den boden-



BWSt [NN+ m]

- 8.30
- 8.00
- 7.70

Abb. 4.1: Überlaufmengen und Zahl der überlaufenden Wellen pro Stunde an einem Ästuardeich (niedersächsisches Elbufer-km 13)



BWSt [NN+ m]

- — — — 6.60
- · · · · 6.20
- · - · - 5.90
- - - - - 5.60

Abb. 4.2: Überlaufmengen und Zahl der überlaufenden Wellen pro Stunde an einem Seedeich (schleswig-holsteinische Westküste-Speicherkoog Dithmarschen-Süd)

mechanischen Untersuchungsergebnissen zur Belastbarkeit von Deichbinnenböschungen (RICHWIEN & WEISSMANN 1995)- auch deutlich, daß die in Niedersachsen -aus Gründen planrechtlicher Belastbarkeit- geübte Praxis, statt 2 % eine Überlaufrate von 3 % zulassen, nicht nur wirtschaftlicher, sondern auch hinreichend sicher ist (Abb. 4.1 und 4.2). Dies gilt umso mehr, je kleiner die jeweils den Auflauf verursachenden Wellen sind.

4.5. Räumliche Verteilung des Wellenaufbaus aus Teekleinmessungen

Ziel des Vorhabens war, die bei den Küstendienststellen verfügbaren Teekdaten in einer Datenbank zu inventarisieren, dann in Zusammenarbeit mit den Datenbesitzern die Datensätze hinsichtlich der wesentlichen Randbedingungen zu ergänzen und die Daten auf Plausibilität zu prüfen. Diese Daten sollten als ein Belastungskataster Aufschluß über die räumliche Verteilung der Wellenaufbaus an der deutschen Nordseeküste geben. Dieses Kataster sollte -bei erfolgreicher Verifikation des Extrapolationsverfahrens (NIEMEYER 1976, 1977)- in eine räumliche Verteilung des Bemessungswellenaufbaus überführt werden.

Es zeigte sich bald, daß die Datenmenge in einigen Bereichen wie Ostfriesland, Jadeküsten, Butjadingen, Dithmarschen und Nordfriesland vielfach größer war als vermutet. Insbesondere in den Tideästuarien Ems, Weser und Elbe waren hingegen nur vereinzelt Daten verfügbar, so daß ein flächendeckendes Kataster nicht verwirklicht werden konnte.

Viele Datensätze erwiesen sich aber bereits bei der Inventarisierung als ergänzungsbedürftig hinsichtlich der Randbedingungen um überhaupt in die Plausibilitätsprüfungen einsteigen zu können. Es hat über die Inventarisierung hinaus eine arbeitsintensive zweite Bearbeitungsphase gegeben, deren Produkte umfangreiche Fragenkataloge zu fehlenden Randbedingungen und Plausibilitätskriterien waren. Zwar wurden diese Aktivitäten von den Behörden einhellig begrüßt und auch teilweise bearbeitet. Es zeichnete sich jedoch nach etwa einem Jahr ab, daß in der durch die Verwaltungsreformen mit Unsicherheiten über die zukünftigen Aufgaben und Stellenabbau gekennzeichneten Situation die Spielräume für die Erledigung dieser Aufgaben neben dem Tagesgeschäft fehlten und fehlen. Verschärft gilt dies für diejenigen Datensätze, die von ehemaligen Bediensteten erhoben und festgehalten worden sind. So ist es trotz des glaubwürdigen Bekundens des Eigeninteresses der datenerhebenden Küstendienststellen nur in sehr begrenztem Umfang gelungen, Datensätze so zu ergänzen und in Kooperation mit der messenden Dienststelle hinreichend auf Plausibilität zu prüfen, daß sie problemlos für zukünftige Untersuchungen genutzt werden können.

Als erkennbar wurde, daß die ursprüngliche Aufgabenstellung trotz erheblichen Einsatzes der verfügbaren Personalkapazität nicht erfüllt werden kann, wurden in Abstimmung mit der begleitenden Projektgruppe die Arbeiten eingestellt. Dabei wurden die Datensätze mit erkannten Defiziten in einer relationalen Datenbank archiviert, so daß später -bei Vorliegen eines dringenden Bedarfs- auf den erreichten Stand der Arbeiten aufgebaut werden kann. Allerdings wird eine erfolgreiche Bearbeitung umso schwieriger werden, je länger der Zeitraum seit ihrer Erhebung ist. Für die Plausibilisierung ist es oft unerlässlich, persönliches Randwissen der mit den Einmessungen Befassten verfügbar zu haben.

Unabhängig von der Inventarisierung und Plausibilitätsprüfung der Gesamtheit der Teekleinmessungen im deutschen Küstengebiet der Nordsee wurden frühzeitig verfügbare Datensätze für zwei verschiedene Sturmfluten aus zwei verschiedenen Regionen so

weitgehend hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft, daß sie als Grundlage für eine Verifikation des Extrapolationsverfahrens (NIEMEYER 1976, 1977) herangezogen werden konnten. Vorgehensweise und Ergebnisse werden im Teil II des Schlußberichtes dargelegt.

Wenngleich das verifizierte Extrapolationsverfahren nicht im Sinne der ursprünglichen Zielsetzung genutzt werden konnte, so ist ein über das eigentliche Vorhaben hinausgehender Nutzeffekt feststellbar: Aufgrund der erfolgreichen Verifikation konnte das Verfahren seither bereits bei Deichbauprojekten - für die ansonsten weniger befriedigende Bemessungsgrundlagen vorlagen- zur Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus genutzt werden (NIEMEYER 1997; NIEMEYER & KAISER 1999).

4.6. Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen

Diese Teilaufgabe war ursprünglich in einer engeren Form in das Arbeitsprogramm aufgenommen worden. Es war dabei lediglich vorgesehen, in Ergänzung zu früheren Untersuchungen die Analyse zusätzlich verfügbarer Datensätze vorzunehmen. Die erfolgreiche Verifikation des mathematischen Seegangmodells HISWA (HOLTHUIJSEN & BOOIJ 1987; BOOIJ & HOLTHUIJSEN 1992) für diesen Problembereich gab dann Anlaß dazu, diesen Fragestellungen mehr Raum zu geben und sie wesentlich intensiver und grundsätzlicher zu untersuchen als ursprünglich vorgesehen. Vorgehensweise und Ergebnisse sind im Teil III des Schlußberichtes dargestellt.

Die Aufnahme in das Arbeitsprogramm erfolgte ursprünglich unter reinen technischen Gesichtspunkten. Seit Beginn des Vorhabens hat sich durch die Teilaspekte dieser Untersuchungen ein hohes gesellschaftspolitisches Interesse ergeben: Die Frage der Sicherheitsverträglichkeit der Öffnung von Sommerpoldern zur Eingriffskompensation steht in engem Zusammenhang mit den in diesem Vorhaben erzielten Ergebnissen.

4.7. Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen

Im Rahmen der Pilotphase "Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen" wurden hydrodynamische und bodenmechanische Fragestellungen zur Standsicherheit von Deichen untersucht:

- a) Indikationen für Belastungsreserven nach den Generalplänen ausgebaute Seedeiche bei einer höheren Überlauftoleranz.
- b) Einschränkung der Versagensbedingungen für Binnenböschungen bei Wellenüberlauf.

Zur unter a) genannten Fragestellung wurde ein Auftrag an das WLI Delft Hydraulics vergeben; die Untersuchungsinhalte und Ergebnisse sind im Anlagebericht A dargestellt.

Wesentliches Ergebnis ist, daß bei -als durchaus möglich anzusehenden- zukünftigen Überlauftoleranzen bestehende Ästuar- und Seedeiche ohne Verstärkung einem stärkeren Meeresspiegelanstieg als eingeplant widerstehen können. Hiermit ergäben sich bei einem zukünftig sich beschleunigenden Meeresspiegelanstieg Sicherheitsreserven (Abb. 7.1 + 7.2), die erheblich größere Reaktionszeiten erlauben würden als bisher angenommen (Abb. 7.3).

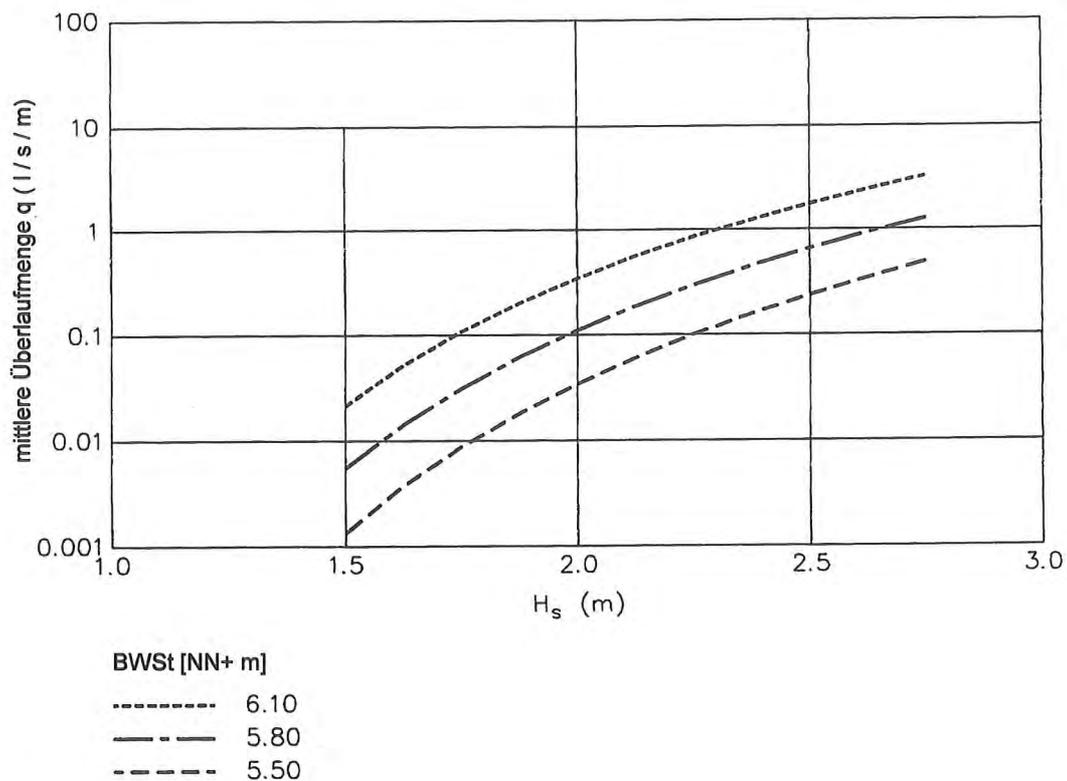


Abb. 7.1: Überlaufmengen für einen Ästuardeich bei Brunsbüttel für den gegenwärtigen Bemessungswasserstand sowie dessen Erhöhung um 0,3 m und 0,6 m

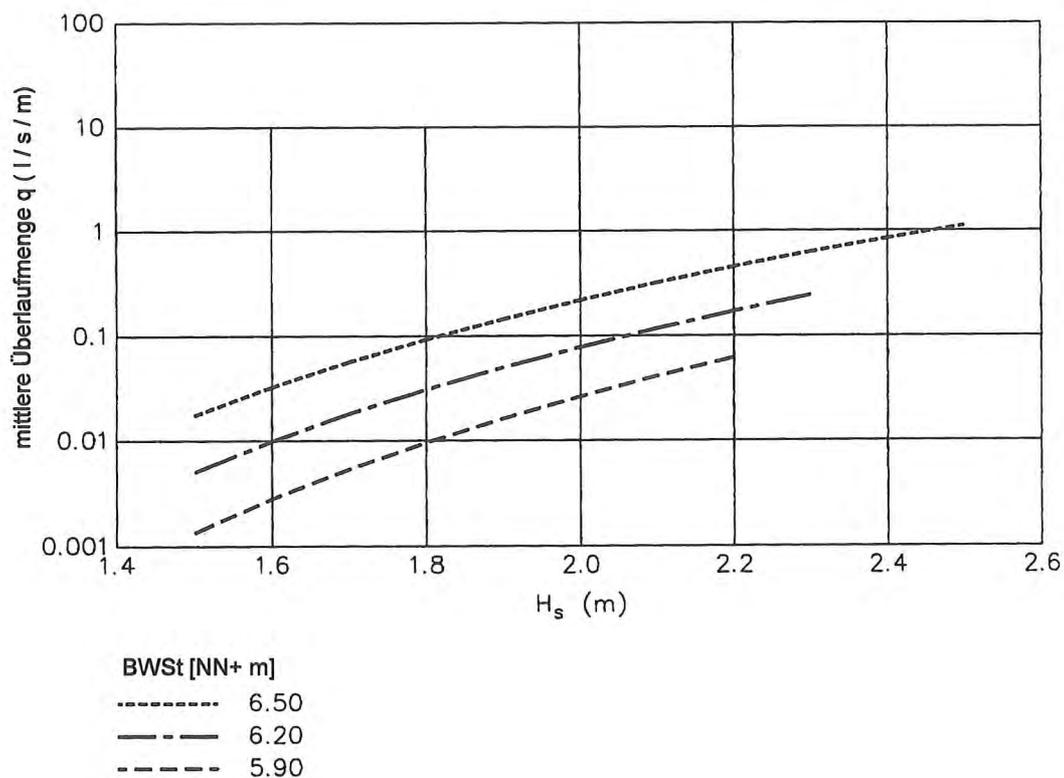


Abb. 7.2: Überlaufmengen für einen Seedeich am Dollart für den gegenwärtigen Bemessungswasserstand sowie dessen Erhöhung um 0,3 m und 0,6 m

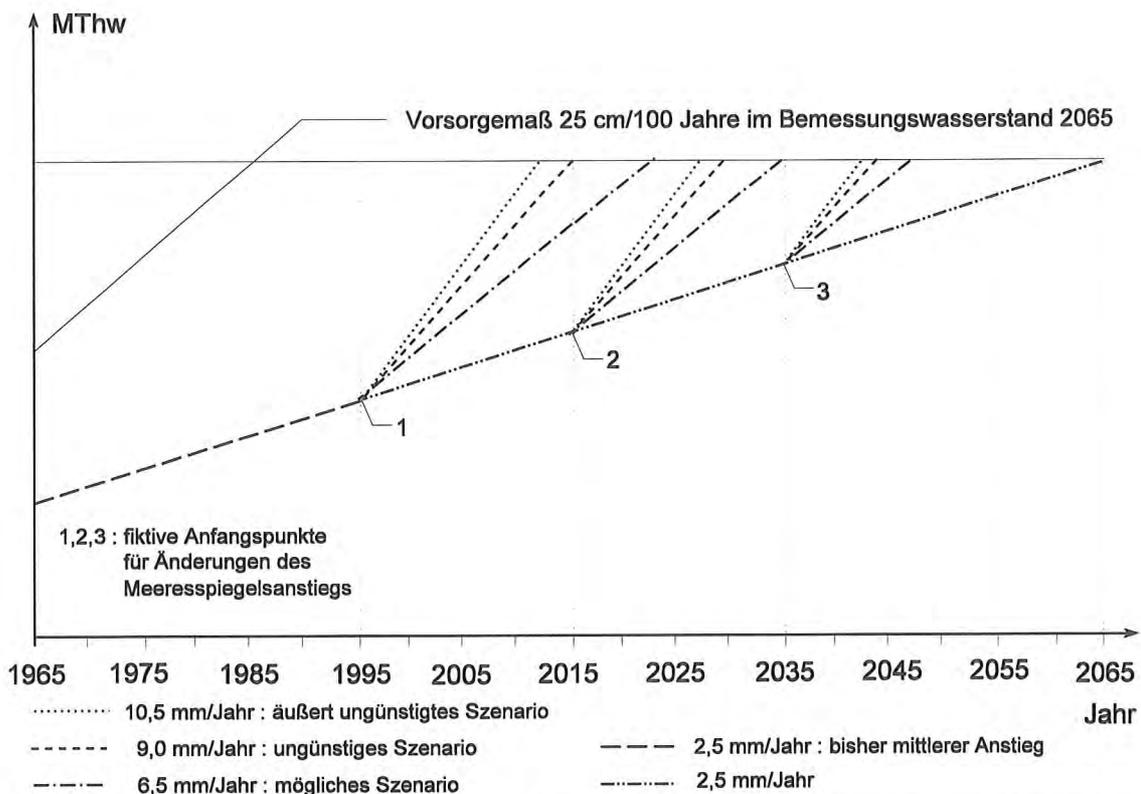


Abb. 7.3: Reaktionszeiten bei einem sich beschleunigendem Meeresspiegelanstieg unter alleiniger Nutzung des gegenwärtigen Wertes ohne zusätzliche Belastungsreserven

Zur Fragestellung b) wurde ein Auftrag an das Fachgebiet für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Essen vergeben. Untersuchungsinhalte, Vorgehensweisen und Ergebnisse sind im Anlagebericht B enthalten, der lediglich die Zusammenfassung (Teil I) von folgenden Ergebnisberichten zu spezifischen Themen darstellt:

- Teil II: Literaturübersicht
- Teil III: Bodenmechanische Grundsatzuntersuchungen
- Teil IV: Felduntersuchungen
- Teil V: Infiltration
- Teil VI: Erosion
- Teil VII: Erosionsuntersuchungen
- Teil VIII: Versagensformen von Deichbinnenböschungen bei Wellenüberlauf
- Teil IX: Konzept und Zielsetzung für einen 1:1 Großversuch

Wesentliches und zu einer Neuorientierung zwingendes Ergebnis der Untersuchungen war, daß nicht -wie bisher angenommen- Erosion auf der Binnenseite bei Wellenüberlauf entscheidend für den Versagensmechanismus ist, sondern Infiltration. Der Bezug zum

tolerierbaren Überlauf wird in einem ersten Ansatz mengenunabhängig über die Dauer in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Kleis hergestellt:

$$D = \frac{n_s \cdot d}{v}$$

Für eine aus Erhebungen an bestehenden Deichen hergeleitete Bandbreite lassen sich Überlauftoleranzen herleiten. Bei hoher Infiltrationsgeschwindigkeit und Sättigung ergibt sich folgende tolerierbare Überlaufdauer als unterer Wert:

$$v = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}; n_s = 0,05 \rightarrow D = 21 \text{ Minuten}$$

Bei niedriger Infiltrationsgeschwindigkeit und trockener Böschung wird dieser Zeitraum erheblich länger:

$$v = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}; n_s = 0,3 \rightarrow D = 35 \text{ Stunden}$$

Die Ergebnisse lassen bei Verifikation und Differenzierung Überlauftoleranzen erwarten, mit denen die antizipierten Belastungsreserven von Seedeichen realisiert werden könnten.

4.8 Wirkung lokaler Windfelder

Bei der mathematischen Modellierung von Seegang in Küstengebieten war bisher mangels näherer Informationen von einem gleichförmigen Windfeld ausgegangen worden. Es hat sich aber gezeigt, daß in Küstennähe -insbesondere bei vorgelagerten Inseln- die Windgeschwindigkeiten gegenüber der offenen See abnehmen. Dieser Effekt kann für den Bemessungsseegang und Bemessungswellenauflauf insofern von Bedeutung sein, als seine Nichtbeachtung zu unwirtschaftlichen Überdimensionierungen von Deichen führen kann. Im Rahmen der Pilotphase „Wellenüberlaufwirkungen auf Deichbinnenböschungen“ konnten erste Ergebnisse zur Lösung dieses Problems erarbeitet werden; sie werden im Teil V des Schlußberichts dargestellt.

Das Problem ist aufgrund dieser Ergebnisse als relevant hinsichtlich einer realistischen Ermittlung des Bemessungsseegangs im Küstengebiet anzusehen. Es wird daher in dem angelaufenen KFKI-Forschungsvorhaben „Bemessungsseegang für Küstenschutzwerke und Randdünen“ eingehender untersucht werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNGEN

Im KFKI-Forschungsvorhaben „Bemessung auf Seegang“ und der angeschlossenen Pilotphase „Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen“ ist eine Bestandsaufnahme von Literatur, Daten und Verfahren mit Forschungscharakter zur Problemstellung Wellenauflauf an Seedeichen vorgenommen worden. Für folgende Themenschwerpunkte sind auf dieser Grundlage Untersuchungen zur Verbesserung des Wissensstandes und damit der Bemessungspraxis vorgenommen worden:

1. Wirkung der Struktur des Seegangs vor Deichen auf den Wellenauflauf, Eignungstest von Berechnungsverfahren,

2. Wirkung schrägen Wellenangriffs auf den Wellenauflauf an Deichen,
3. Wirkung komplexer Geometrien von Deichaußenböschungen auf den Wellenauflauf,
4. Zusammenhänge von Wellenauflauf und -überlauf,
5. Bestimmung des Bemessungswellenaufbaus aus Teekeineinmessungen,
6. Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen,
7. Wellenüberlaufwirkung von Deichbinnenböschungen,
 - a) mögliche Belastungsreserven bei höherer Überlauf-toleranz,
 - b) bodenmechanisch begründete Überlauf-toleranzen,
8. Struktur und Ermittlung lokaler Windfelder.

Die Bearbeitungstiefe erfolgte in Abhängigkeit von der -bei Antragstellung nicht vollständig erkennbaren- Verfügbarkeit und Eignung der Basisinformationen und Verfahren. Wesentlich Erkenntnisse, die zu einer präziseren und zielgerichteten Ausrichtung zukünftiger Forschungsvorhaben als bisher führten, konnten in folgenden Themenbereichen erzielt werden:

- Wirkung der Struktur des Seegangs auf den Wellenauflauf,
- Wirkung schrägen Wellenangriffs auf den Wellenauflauf an Seedeichen
- Zusammenhänge von Wellenauf- und überlauf,
- Wirkung komplexer Deichgeometrien auf den Wellenauflauf.

Die hierbei erzielten Erkenntnisfortschritte sind aber nicht nur für die Planung von zukünftigen Forschungsvorhaben von Bedeutung, sondern sie beinhalten gleichzeitig die Formulierung des gegenwärtigen Stands der Wissenschaft, der in Form von Anwendungsempfehlungen formuliert wird.

Wesentliche Klarheit konnte in zwei weiteren Fragestellungen erzielt werden:

- Die Nutzung der vielfach verfügbaren Teekeineinmessungen als Grundlage für die Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus ist durch die Verifikation des Extrapolationsverfahrens auf eine gesicherte Grundlage gestellt worden. Hiermit steht - insbesondere in Bereichen mit ansonsten unzureichenden Datengrundlagen- eine verlässliche Alternative zur schulmäßige Vorgehensweise zur Verfügung.
- Es ist eindeutig aufgezeigt worden, daß Lahnungen, Heller und Sommerdeiche mit wachsenden Wasserständen ihre seegangsdämpfende Wirksamkeit verlieren. Aus einer solchen Sekundärwirkung dieser Landschaftsform oder Bauwerke neben ihrer originären Funktion kann somit nicht eine schwächere Bemessung der landseitigen Ästuar- oder Seedeiche abgeleitet werden. Von daher ist ihr Erhalt oder gar Errichtung auch nicht über diese Zusatzfunktion zu begründen.

Diese beiden Erkenntnisse haben nicht nur technisch-wissenschaftliche Aspekte; sie stellen auch einen Beitrag zur erhöhten Wirtschaftlichkeit im Küstenschutz dar. Der letztgenannte Gesichtspunkt hat zudem aktuelle gesellschaftspolitische Relevanz.

Hinsichtlich der Ausrichtung sowohl der Forschungsinhalte als auch der Strategie künftigen Schutzes von Niederrückküsten durch Deiche sind die Ergebnisse der Pilotphase „Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen“ in zweifacher Hinsicht von hoher Bedeutung:

- Die bodenmechanisch abgesicherten Erkenntnisse zur Überlauftoleranz von Deichbinnenböschungen tragen nicht nur zu einer berechenbareren Sicherheit bei, sie sind zugleich richtungweisend für zukünftige Forschungen und bieten Perspektiven zu höherer Wirtschaftlichkeit ohne Risikozuwachs im Insel- und Küstenschutz.
- Die Anhaltspunkte über akzeptabler Überlaufmengen bei -aufgrund der gewonnenen bodenmechanischen Erkenntnisse als durchaus möglich anzusehenden künftigen Überlauftoleranzen weisen auf ein Potential an Belastungsreserven bei den nach den Generalplänen Küstenschutz an der Nordsee verstärkten Deichen hin. Sollten Forschungen der nächsten Jahre hier zu einer Bestätigung führen, so stünde damit ein größerer Handlungsspielraum zur Verfügung als bisher angenommen werden durfte, um gegebenenfalls erforderliche Reaktionen auf einen sich infolge von Klimaänderungen beschleunigenden Meeresspiegelanstieg zielsicherer und ressourcenschonender vornehmen zu können.

6. LITERATUR

Arbeitsgruppe Küstenschutz [1955]: Allgemeine Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz. Die Küste, Jg. 4

Battjes; J. A. [1970]: Een oude Golfoploopformule bezien in het Licht van moderne Theorieën. De Ingenieur, Jrg. 82, Nr. 45, Bouw- en Waterbouwkunde 12

Battjes; J. A. [1971]: Run-up distributions of waves breaking on slopes. Proc. ASCE, Vol. 97, WW 1

Booij, N. & Holthuijsen, L. [1992]: HISWA user manual. Prediction of short-crested, stationary waves with ambient currents. TU Delft, Facult. Civ. Techn.

Erchinger, H.F. [1974]: Wellenaufbau an Seedeichen-Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 41

Führböter, A. [1991]: Wellenbelastung von Deichen und Deckwerksböschungen. Jb. Hafentechn Ges., Bd. 46

van Gent, M.R.A. [1995]: Wave Interaction with Permeable Coastal Structures. Proefschrift, Technische Universiteit Delft

Grüne, J. & Führböter, A. [1975]: Large Wave Channel for Full-Scale Modelling of Wave Dynamics in Surf Zones. Proc. Symp. Model. Techn., San Francisco/Ca., USA

Hensen, W. [1955]: Modellversuche zur Bestimmung des Einflusses der Form eines Seedeiches auf die Höhe des Wellenauflaufes. Mitt. Franzius-Inst., H. 7

Holthuijsen, L. H. & Booij, N. [1987]: A grid model for shallow water waves. Proc. 20th Int. Conf. Coast. Eng. Taipei/RoC Taiwan, ASCE, New York

Hundt, C. [1962]: Der maßgebende Sturmflutseegang und Wellenaufbau für das Deichbestück der deutschen Nordseeküste auf Grund der Sturmflut vom 16. Februar 1962. Die Küste, Jg. 10, H. 2

- Ingenieurkommission [1979]:** Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. (Autoren: Heinsohn, Kramer, Krause, Luck, Meyer-Toelle, Müller). Die Küste, H. 33
- van der Meer, J.W. [1997]:** Golfoploop en golfoverslag bij dijken. WLIDelft Hydraul., Rapp. H 2458/3051
- van der Meer, J.W. & Janssen, J.P.F.M. [1994]:** Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Delft Hydr. Pub. No. 485
- van der Meer, J.W. & de Waal, J.P. [1990]:** Invloed van scheve golfinval en richtingspreiding op golfoploop en overslag. WLIDelft Hydraul., Rapp. H 638
- van der Meer, J.W. & de Waal, J.P. [1993]:** Waterbeweging op taluds. WLIDelft Hydraul.. Rapp. H 1256
- Mühlestein, D. [1995]:** Bemessung von Deichen südliches Elbufer, Dkm 0 - Dkm 25, Niedersachsen. Danish Hydraulic Institute
- Niemeyer, H.D. [1976]:** Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 29. 1976.
- Niemeyer, H.D. [1977]:** The estimation of design wave run-up on sea dykes in consideration of overtopping security. Proc. 17th IAHR-Congress Baden-Baden
- Niemeyer, H.D. [1995]:** Machbarkeitsstudie zur Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus für Elbdeiche mit Modell- und Naturdaten. Dienstber. NLO-Forschungsstelle Küste-, 05/95 (unveröff.)
- Niemeyer, H.D. [1997]:** Ermittlung des Deichbesticks vor dem Augustgroden, Jadebusen. Ber. Forsch.-Stelle Küste, Bd. 41
- Niemeyer, H.D. & Kaiser, R. [1998a]:** Überprüfung der Bestickhöhen für die Rheider Deiche zwischen Nenndorp und Dollart. NLO-Forschungsstelle Küste-, 03/98 (unveröff.)
- Niemeyer, H.D. & Kaiser, R. [1998b]:** Untersuchungen zum Bestick von Versuchsaußenböschungen am Elisabethgroden-Deich, Wangerland. Dienstber. NLO-Forschungsstelle Küste-, 10/98 (unveröff.)
- Niemeyer, H.D. & Kaiser, R. [1999]:** Ermittlung der Bestickhöhen für die Verstärkung des Südstrandpolderdeiches auf Norderney. NLO-Forschungsstelle Küste-, 01/99 (unveröff.)
- van Oorschot, J.H. + D'Angremond, K. [1968]:** The effect of wave energy spectra on wave run-up. Proc. 11th Int. Coastal Engineering Conference London/UK, ASCE
- Owen, M.W. [1980]:** Design of Seawalls allowing Wave Overtopping. Hydraul. Res. Wallingford, Rep. EX 924
- Richwien, W. & Weißmann, R. [1995]:** Zur Standsicherheit von Deichbinnenböschungen bei Wellenüberlauf. Grundbau u. Bodenmechanik, Teil I - IX (unveröff.)
- Tautenhain, E. [1981]:** Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus - Ein Beitrag zur Bemessung. Mitt. Franzius-Inst., H. 53
- Thijssse, J.T. [1952]:** Growth of Wind-generated Waves and Energy Transfer. Nat. Bur. o. Standards, Circul. 521
- TAW (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) [1972]:** Golfoploop en golfoverslag. Staatsuitgeverij, s'Gravenhage
- TAW (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) [1989]:** Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Uitgeverij Waltmann, Delft
- TWB (Technisch-Wissenschaftlicher Beirat [1969]:** Empfehlungen der ehemaligen Arbeitsgruppe "Sturmfluten" und ihre Nutzanwendung für den Seedeichbau. Die Küste, H. 17. 1969
- de Waal, J.P. [1996]:** Evaluation of Wave Overtopping characteristics at six dikes in Germany. WLIDelft Hydraulics, Rap. H2119
- Wassing, F. [1967]:** Model Investigations of Wave Run-up on Dikes Carried out in the Netherlands in the Past Twenty Years. Proc. 6th Conf. Coast. Eng. Gainesville/Fl., USA, ASCE
- Zitscher, F.F.; Scherenberg, R.; Carow, U. [1979]:** Die Sturmflut vom 3. und 21. Januar 1976 an den Küsten Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 33

7. SYMBOLE UND ZEICHEN

$A_{97,98}$:	Wellenauflauf mit einer Überlauftoleranz von 3%, 2% [m]
B_B	:	Bermenbreite [m]
BWSt	:	Bemessungswasserstand [NN +m]
d	:	Dicke der Kleiabdeckung [m]
D	:	Infiltrationsdauer [min, h]
g	:	Erdbeschleunigungskonstante [m/s^2]
h_B	:	Wassertiefe über der Berme [m]
H_S	:	signifikante Wellenhöhe [m]
L_B	:	Bermenlänge [m]
n_S	:	Sättigung [-]
N_B	:	Höhenlage der Berme [NN +m]
T_P	:	Periode des Energiedichtemaximums [s]
v	:	Infiltrationsgeschwindigkeit [m/s]
α	:	Winkel der Deichaußenböschung [°]
β	:	Winkel des Wellenfortschritts zur Deichnormalen [°]
Y_B	:	Reduktionsfaktor beim Wellenauflauf für die Bermenwirkung
Y_R	:	Reduktionsfaktor beim Wellenauflauf bei schrägem Wellenangriff [-]