BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE

-Meerestechnik und Küsteningenieurwesen-

OPTIMIERUNG VON DEICHPROFILEN -Mathematische Modellierung von Wellenauf- und -überlauf-

von

Hanz Dieter Niemeyer, Ralf Kaiser, Markus Witting

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE -Forschungsstelle Küste-

INHALTSVERZEICHNIS

1. Veranlassung und Problemstellung	1
Stand der Forschung	3
2.1.1 Bilanz der TAW [1972]	3
2.1.2 Statusbericht von KLEIN-BRETELER [1990]	4
2.1.3 Empfehlungen nach VAN DER MEER & JANSSEN [1994]	l und VAN
DER MEER [1997]	
2.1.4 Untersuchungen von GRÜNE & WANG [1999]	6
2.1.5 Vorgehen von VAN GENT [1999]	
2.2 Mathematische Modellierungen	
2.2.1 Untersuchungen mit mathematischen Wellenkanälen und	
	7
2.2.2 Untersuchungen mit der Flüssigkeitsvolumen-Methode	7
3. Untersuchungsinhalte und Methodik	8
3.1 Untersuchungsinhalte	8
3.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens	10
	4.4
4. Ergebnisdarstellung	11
4.1 Allgemeines zu den numerischen Modellen	
4.1.1 Flachwassergleichungen	12
4.1.2 Allgemeines zur Modellbildung	13
4.1.3 Die Modelle OTT-1D und ODIFLOCS	
4.1.3.1 ODIFLOCS	
4.1.3.2 OTT-1D	
4.1.3.3 Numerische Methoden	
4.1.3.4 Modellbetrieb	
4.2 1D-Modelluntersuchungen	14
4.2.1 LWK-Versuche	
4.2.1.2 Versuchsprogramm	
4.2.2 GWK-versuche	
4.2.2.2 Versuchsprogramm	
4.2.3 Modelluntersuchungen der LWK-Versuche	
4.2.3.1 Kalibrierung des Modells ODIFLOCS	
4.2.3.1.1 Standardparameter	
4.2.3.1.2 Variation der Modellparameter	
4.2.3.1.2 Variation der Modeliparameter	
4.2.3.3 Vergleich der mittleren Überlaufraten	22
4.2.4 Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal	22
4.2.4.1 Ausbildung des mathematischen Wellenkanals .	
4.2.4.2 Vergleich der Wellenauflaufhöhen	
4.2.4.3 Vergleich der mittleren Überlaufraten	
4.2.4.3.1 Naturspektren	
4.2.4.3.1.1 Methodenvergleich	
4.2.4.3.1.2 Einfluß der Randbedingung am se	
Modellrand	

4.2.4.3.2 Versuche mit TMA –Flachwasserspektren . 4.2.4.3.3 Methodenvergleich	
4.3 2D-Modelluntersuchungen	
4.3.1 Versuche im Wellenbecken	
4.3.2 Das Modell OTT-2D	 37
4.3.3 Ausbildung des mathematischen Wellenbeckens	 38
4.3.4 Modelluntersuchungen	 39
4.3.4.1 Vergleich mit gemessenen Auflaufhöhen	 40
4.3.4.1.1 Versuch 1 – Angriffswinkel 0°	 40
4.3.4.1.2 Versuch 2 – Angriffswinkel 40°	 42
4.3.5 Bewertung der 2D-Modellergebnisse	 44
5. Zusammenfassung und Ausblick	 45
6 Literatur	 48
7 Symbole und Zeichen	 50

1. Veranlassung und Problemstellung

Die aus Untersuchungen in hydraulischen Modellen entwickelten Formeln zur Ermittlung des Wellenauf- und -überlaufs an Deichen berücksichtigen grundsätzlich nur einheitliche Neigungen der Außenböschungen [TAW 1972; NIEMEYER 1999]. In der Wirklichkeit weicht -insbesondere an der offenen Küste- die Geometrie der Deiche davon erheblich ab: Beispielsweise werden für die Gewährleistung der Standsicherheit und für die Aufnahme von Dauerlasten in Deiche Konstruktionselemente wie Außen- und Binnenbermen oder Fußdeckwerke integriert; dadurch entstehen im Bereich der Außenböschung wiederholt Neigungswechsel (Abb.1). Darüber hinaus weisen insbesondere ältere Deiche auch im Gesamtverlauf ihrer Außenböschungen unterschiedliche Neigungen auf; hierzu sei an die frühere Diskussion im deutschen Küsteningenieurwesen über die Vorteile von konvexen oder konkaven Außenböschungen bei Deichen [HENSEN 1955] erinnert. Darüber hinaus hat die Praxis der Deichverstärkungen -insbesondere nach der Sturmflut von 1962- mit dem Aufschlitzen vorhandener Kleideiche und der anschließenden Querschnittserweiterung durch das Einbringen eines Sandkerns zu einer großen Vielfalt von unterschiedlichen Profilen geführt.

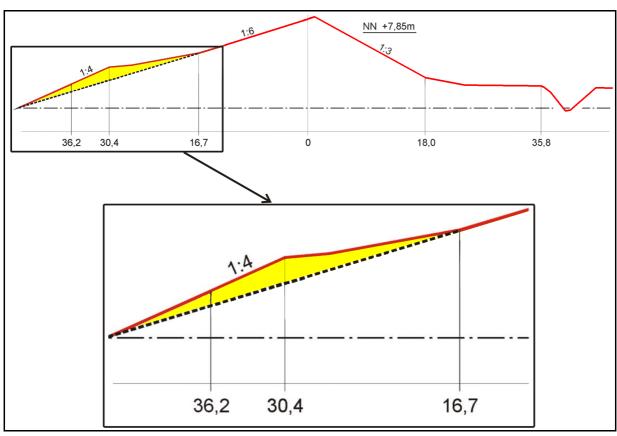


Abb. 1: Geometrie der Außenböschung eines Seedeiches mit vorgelagertem Heller (Elisabethgrodendeich, Wangerland) im Vergleich zu einer fiktiven einheitlichen Böschungsneigung

Es ist eingängig, daß der Wellenauflauf und damit auch der Wellenüberlauf auf derartigen, modular zusammengesetzten Außenböschungen eine andere Beeinflussung erfährt als auf solchen mit durchgehend einheitlicher Neigung (Abb. 1). Das hier gezeigte Beispiel eines Vorlanddeichs wird dabei in seiner geometrischen Komplexität noch von Schardeichen mit Fußdeckwerken übertroffen.

Um dieser Gegebenheit bei der Ermittlung des Bemessungswellenauflaufs in der Praxis des Küsteningenieurwesens Rechnung zu tragen, sind die folgenden Vorgehensweisen verfügbar:

- 1. Es wird nur die Neigung oberhalb des Bemessungswasserstandes berücksichtigt, der in der Regel oberhalb der Konstruktionselemente liegt, deren Neigungen von denen der eigentlichen Außenböschung abweichen.
- 2. Für den Gesamtverlauf der Deichaußenböschung wird geometrisch eine mittlere Neigung errechnet.
- 3. Die hydrodynamische Wirkung der modular zusammengesetzten Außenböschung wird in den Formeln zur Ermittlung des Wellenauf- und -überlaufs über Terme berücksichtigt, die empirisch oder über hydraulische Modellversuche abgeleitet worden sind.

Die erstgenannte Vorgehensweise liegt in der Regel auf der sicheren Seite. Ihre Anwendung ist aber mit der Hinnahme einer Überbemessung verbunden und führt somit zu einer unwirtschaftlichen Konstruktion.

Für die zweite Vorgehensweise findet sich weder vom Aspekt der Sicherheit, noch von dem der Wirtschaftlichkeit her eine nachvollziehbare Begründung. Dieser vereinfachte Ansatz ist nicht identisch mit dem von SAVILLE [1955] auf experimenteller Grundlage ermitteltem, bei dem die Mittelung über den hydrodynamisch beim Wellenauflauf beaufschlagten Teil erfolgt.

Bei der dritten Kategorie ist eine abschließende Bewertung dadurch erschwert, daß die Verifikationen für diese Ansätze keine einheitlichen Ergebnisse ausweisen und zudem überwiegend in kleinmaßstäblichen hydraulischen Modellversuchen entwickelt worden sind. Zusammenfassend ist aber festzuhalten, daß für keinen der bisher verfügbaren Ansätze die umfassende Eignung für die Anwendung in der Bemessungspraxis nachgewiesen werden konnte. Eine Prüfung der Konzepte ist ohne eingehende Modellversuche mit vielfältigen Variationen der Bauwerksgeometrie nicht möglich, da den bisher entwickelten Ansätzen kein theoretisch abgeleitetes physikalisches Konzept zu Grunde liegt und die Übertragbarkeit daher stets fragwürdig bleibt. Überdies müssen experimentelle Überprüfungen -zumindest teilweise- großmaßstäblich ausgeführt werden, da zum einen bei den Wechselwirkungen von Bauwerksstrukturen mit dem Wellenauf- und -überlauf Wasser-Luft-Gemische entstehen können und somit Maßstabseffekte nicht auszuschließen sind. Zum anderen wachsen die -ohnehin nicht unbeträchtlichen- meßtechnischen Probleme bei der Erfassung der Auflaufzungen umso mehr, je kleiner der Maßstab des Modells ist.

Derartige Untersuchungen sind mit sehr hohen Kosten verbunden: Hierin liegt wahrscheinlich die Ursache dafür, daß derartige Untersuchungen bisher nicht systematisch ausgeführt worden sind, obwohl nicht nur im deutschen Küsteningenieurwesen, sondern auch in dem vieler anderer Länder wie Dänemark, Großbritannien, Niederlande, Vereinigte Staaten Interesse an belastbaren Ergebnissen hierzu besteht. Eine Möglichkeit in dieser Frage Fortschritte zu erzielen, ohne den hohen Aufwand für großmaßstäbliche Modellversuche aufzubringen, wird in der Anwendung mathematischer Modelle für den Wellenauf- und -überlauf gesehen.

Das Konzept einer Untersuchung der Wirkung der Geometrie von Deichaußenböschungen auf den Wellenauf- und -überlauf mit mittlerweile verfügbaren mathematischen Modellen wie ODIFLOCS [VAN GENT 1993, 1994] sowie OTT-1D und OTT-2D der Modell-Familie ANEMONE [DODD 1998; 2000] bietet dazu eine kostengünstige und weniger zeitaufwendige Alternative. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, anhand verfügbarer Daten aus hydraulischen Modellen deren Leitungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eingehend zu prüfen.

2. Stand der Forschung

2.1 Empirische Ansätze

2.1.1 Bilanz der TAW [1972]

Seit der umfassenden und gründlichen Bestandsaufnahme der TAW [1972] ist dem Antragsteller kein vergleichbares Standardwerk zum Wellenauf- und -überlauf mehr bekannt geworden. Spätere Versuche zu grundsätzlichen Bewertungen weisen hingegen trotz des im Laufe der Zeit erfolgten Erkenntnisfortschritts häufig im Vergleich dazu erhebliche Defizite auf, vielfach sogar im Bereich elementarer Grundlagen. Zur Beurteilung des Stands der Forschung zu den Wechselwirkungen der Geometrie von Deichaußenböschungen mit Wellenauf- und -überlauf ist es daher erforderlich, aufbauend auf die seinerzeitigen Bewertungen der TAW [1972] die Ergebnisse seither erfolgter Untersuchungen hinsichtlich ihrer Naturähnlichkeit und damit ihrer Anwendbarkeit für die Bemessungspraxis einzuordnen.

Von der TAW [1972] ist seinerzeit der Stand der Wissenschaft bewertet worden; im Mittelpunkt stand dabei die Naturähnlichkeit des Ansatzes von SAVILLE [1955] der Bestimmung einer einheitlichen, äquivalenten Böschungsneigung für geometrisch gegliederte Profile als Neigung der Verbindungsgeraden zwischen folgenden zwei Punkten der gegliederten Außenböschung: vom seeseitigen Brechpunkt der Wellen bis zum maximalen Wellenauflauf. Die Schwierigkeiten bei der Erfassung dieser Punkte vermindert die Praktikabilität dieses Ansatzes erheblich. Insbesondere gilt dies, wenn statt regelmäßiger Wellen Seegang zu betrachten ist.

Einen Vergleich des Ansatzes mit Daten von Modellversuchen für geknickte Profile und Bermen, die SAVILLE [1955] selbst vorgenommen hatte, zeigen gute Übereinstimmungen mit Ausnahme der Daten für breite Bermen [TAW 1972]. Diese Tendenz wird durch die Untersuchungen von HERBICH, SORENSEN und WILLENBROCK [1963] bestätigt: Nach ihren Untersuchungen liegt der Grenzwert für die Anwendbarkeit des Ansatzes von SAVILLE bei einer maximalen Bermenbreite von einem Siebtel der Wellenlänge:

B = 1/7 L

Bei einer Überprüfung des Ansatzes von SAVILLE [1955] mit den Daten aus den hydraulischen Modellversuchen von HENSEN [1955] ergaben sich folgende Tendenzen [TAW 1972]:

1. Bei einem Außenprofil mit zwei ebenen unterschiedlichen Neigungen ergaben sich gute Übereinstimmungen.

- bei konvexen Profilen ergaben sich ebenfalls gute Übereinstimmungen; die Auffassung der TAW [1972] wird allerdings nicht für die höchsten Werte als zutreffend angesehen,
- 3. bei konkaven Profilen ergibt der Ansatz von SAVILLE zu niedrige Werte.

Weiterhin werden die von DROGOS-WAWRZYNIAK mitgeteilten Ansätze von PISHKIN und SHANKIN [TAW 1972] untersucht. Beide Ansätze weisen grundsätzliche Defizite auf, die ihre uneingeschränkte Gültigkeit ausschließen. Ihre Anwendung kann daher solange nicht empfohlen werden, wie auf der Grundlage der den Ansätzen zugrunde liegenden Daten kein verläßlicher Gültigkeitsbereich ausgewiesen werden kann.

Ergänzend ist anzumerken, daß all diese Verifikationen für monochromatische Wellen vorgenommen wurden, sodaß die hier bestätigte begrenzte Gültigkeit des Ansatzes nicht auf natürlichen Seegang übertragbar ist.

2.1.2 Statusbericht von KLEIN-BRETELER [1990]

Spätere Untersuchungen von KLEIN-BRETELER [1990] beinhalteten neben Literaturstudien auch kleinmaßstäbliche Versuche zur Ermittlung der Bermenwirkung, wobei neben regelmäßigen Wellen auch unregelmäßiger Seegang entweder als PIERSON-MOSKOWITZ- oder als JONSWAP-Spektren eingesteuert wurde. Hieran zeigte sich, daß die Bermenwirkung bei unregelmäßigem Seegang schwächer ist als bei monochromatischen Wellen. Von daher beinhaltet die Übernahme von Ansätzen zur Bermenwirkung, die auf Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen fußen, stets das Risiko der Unterbemessung.

Übereinstimmend zeigte sich für regelmäßige Wellen und unregelmäßigen Seegang bei Wasserständen auf Bermenhöhe die Tendenz ab, daß die Bermenwirkung bei steilen Wellen vorrangig vom Verhältnis von Bermenbreite zu Wellenhöhe abhängt, während bei langen Wellen das Verhältnis von Bermenbreite zu Wellenlänge dominiert. Insgesamt unterscheidet KLEIN-BRETELER [1990] bei den Wechselwirkungen von Bermenbreite und Seegang auf den Wellenauflauf drei Wertebereiche für den dimensionslosen Parameter

$$W_B = B^2/(H_S \cdot L_{OP})$$

bei der Ermittlung des Reduktionsfaktors r_B für die Bermenbreite bei einer Neigung der Außenböschung des Deiches von 1:3:

$${f r}_{\rm B} = {f 1}$$
 $\forall \ {\sf W}_{\rm B} \le 0.01$ ${f r}_{\rm B} = {f 0.65} \cdot ({\sf B}^2/({\sf H}_{\rm S} \cdot {\sf L}_{\sf OP}))^{0.1}$ $\forall \ 0.01 < {\sf W}_{\rm B} < 1$ $\forall \ {\sf W}_{\rm B} \ge 0.01$

KLEIN-BRETELER [1990] hat den Gültigkeitsbereich dieser Formeln auf Deichaußenböschungen mit Neigungen von 1:3 oder flacher eingegrenzt, da die zu Grunde liegenden Versuche mit einer Neigung der Außenböschung von 1:3 ausgeführt wurden. Für flachere Böschungen gibt er folgende Transformation vor:

$$\mathbf{r}_{B (1:n)} = (\mathbf{r}_{B (1:3)})^{3 \cdot \tan \alpha}$$

Der Reduktionsfaktor r_B für die Verringerung der Wassertiefe durch die Berme ergibt sich für den Wellenauflauf A_{98} mit einem Überlaufanteil von 2% aus folgendem Zusammenhang:

$$r_{hB} = 1 - 0.5 \cdot (h_B/H_S)^2$$

Insgesamt ergibt sich daraus nachfolgender Reduktionsfaktor γ_B für die Wirkung der Berme in Abhängigkeit von ihrer Höhenlage und Breite in Bezug auf den einschwingenden Seegang:

$$\gamma_{\rm B} = 1 - r_{\rm hB} \cdot (1 - r_{\rm B})$$

2.1.3 Empfehlungen nach VAN DER MEER & JANSSEN [1994] und VAN DER MEER [1997]

Im Zusammenhang mit der Analyse eigenständiger großmaßstäblicher Modellversuche zum Wellenauf- und -überlauf haben VAN DER MEER UND DE WAAL [1993] eine ausführliche Inventur der ihnen zugänglichen, für die Ermittlung des Bemessungswellenauflaufs relevanten Daten vorgenommen; dazu ist auch eine Kurzfassung im internationalen Fachrahmen veröffentlicht worden [DE WAAL & VAN DER MEER 1993]. Es sind auch die von KLEIN-BRETELER [1990] ermittelten Untersuchungsergebnisse zur Bermenwirkung einbezogen worden. Ihre Ergebnisse bildeten wiederum die Grundlage für die Zusammenfassungen mit Empfehlungscharakter von VAN DER MEER und JANSSEN [1994] und VAN DER MEER [1997].

Ergänzend zu den hier dargestellten Ergebnissen von KLEIN-BRETELER [1990] haben VAN DER MEER und JANSSEN [1994] sowie VAN DER MEER [1997] das Prinzip der äquivalenten Böschungsneigung von SAVILLE [1955] in modifizierter Form auf Knickprofile und Profile mit Bermen übertragen, wobei Anfangs- und Endpunkte der imaginären äquivalenten Böschung durch den einer signifikanten Wellenhöhe entsprechenden vertikalen Abstand vom mittleren Bermenniveau festgelegt werden. Dabei wird der Dämpfungsfaktor für die Bermenbreite wie folgt bestimmt:

$$r_B = B/H_S \cdot (2 \cot \alpha + B/H_S)^{-1}$$
 [van der Meer & Janssen 1994]

$$r_B = B/L_B$$
 (Abb. 2)

Weder bei VAN DER MEER & JANSSEN (1994) noch bei VAN DER MEER (1997) erfolgt ein Hinweis darauf, ob und inwieweit eine Verifikation für diese Formulierungen vorliegt. Ebensowenig erläutert VAN DER MEER [1997] seine vereinfachte Formel. Darüber hinaus ist die hier erfolgte Festlegung der äquivalenten Böschungsneigung über den Höhenbereich $N_{\rm B} \pm H_{\rm S}$ zwar praktikabel, doch es wird dafür weder eine exakte physikalische Begründung geliefert noch werden die Grenzen des Höhenbereichs als eine plausible Näherung ausgewiesen.

Diese Ansätze werden dennoch mangels besser geeigneter Alternativen als derzeitiger Stand der Technik auch im deutschen Küsteningenieurwesen empfohlen [NIEMEYER 1999a, 1999b; OUMERACI & SCHÜTTRUMPF 2000].

2.1.4 Untersuchungen von GRÜNE & WANG [1999]

Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Bemessung auf Seegang" sind an der Forschungseinrichtung Großer Wellenkanal der Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig Untersuchungen zur Bermenwirkung an Deichen vorgenommen worden [GRÜNE & WANG 1999]. Grundlage waren einerseits Daten aus großmaßstäblichen Modelluntersuchungen des früheren Sonderforschungsbereichs 205 und andererseits von Naturmessungen an der schleswig-holsteinischen Westküste. Aller-

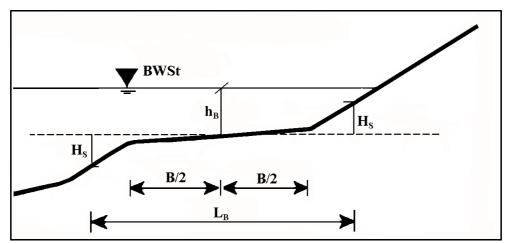


Abb. 2: Definition der Parameter für einen Deich mit Außenberme (van der Meer 1997)

dings muß hierzu angemerkt werden, daß insbesondere die Naturdaten wegen meßtechnisch bedingter Mängel in ihrer Aussagekraft nicht einschätzbar sind. Darüber hinaus werden die nach Einschätzung der Autoren "neuesten niederländischen Ansätze" von DE WAAL & VAN DER MEER [1993] herangezogen. Es wird eine Modifikation für die Wirkung der Wassertiefe auf der Berme für unregelmäßigen Seegang vorgeschlagen:

$$r_{hB} = 1 - 0.5 \cdot (h_B/H_S)$$

Die Modifikation des Ansatzes von DE WAAL & VAN DER MEER [1993] durch GRÜNE & WANG [1999] erfährt keine physikalische Begründung; nach Auffassung der Autoren gestattet sie eine bessere Näherung der Datensätze. Diese Aussage ist allerdings nicht nachvollziehbar, da eine Gegenüberstellung der eigenen Modifikation mit dem originären Ansatz von DE WAAL & VAN DER MEER [1993] unterbleibt. Andere Ansätze aus der Literatur bleiben unberücksichtigt.

Die Vergleiche von modifizierten Ansätzen und Daten bei GRÜNE & WANG [1999] zeigen gute Übereinstimmungen für regelmäßige Wellen und parametrisierte Spektren. Für Naturspektren läßt allerdings nicht einmal eine tendenzielle Übereinstimmung feststellen. Damit ist eine Umsetzung in die Bemessungspraxis unangebracht.

2.1.5 Vorgehen von VAN GENT [1999]

VAN GENT [1999] hat hydraulische Modellversuche vorgenommen, wobei die Wirkung von durch abnehmende Wassertiefen verformten Spektren mit Doppelpeaks auf den Wellenauf- und überlauf an Deichen im Mittelpunkt stand. Die Versuche wurden in Anlehnung an das Deichprofil bei Petten an der Küste der niederländischen Provinz Noordholland durchgeführt, für das auch umfangreiche Datensätze von Naturmessungen zur Verfügung stehen.

Ohne auf Einzelheiten einzugehen und Verifikationen aufzuzeigen, führt VAN GENT [1999] an, daß die Geometrie dieser Außenböschung mit zwei unterschiedlichen Neigungen und einer dazwischenliegenden Berme zur rechnerischen Ermittlung des Wellenauf- und -überlaufs mit einer äquivalenten Böschungsneigung repräsentiert werden konnte, deren Anfangs- und Endpunkt auf der Außenböschung durch die vertikalen Marken $N_{\rm B} \pm 2$ x $H_{\rm S}$ bestimmt werden (Abb. 2). Spezifizierte Verifikationen werden nicht dargestellt, da keine vergleichenden Untersuchungen ohne Berme und Neigungswechsel vorgenommen wurden.

2.2 Mathematische Modellierungen

2.2.1 Untersuchungen mit mathematischen Wellenkanälen und -becken

Das mathematische Kanalmodell ODIFLOCS ist von seinem Entwickler VAN GENT (1995) auch auf verfügbare Datensätze für Wellenauf- und -überlauf angewandt worden (VAN GENT 2003). Dabei handelt es sich aber durchweg um Datensätze mit geringer Variation der hydrodynamischen Randbedingungen und nahezu einheitlicher Geometrie. Von daher erfüllen diese Tests -trotz guter Ergebnisse- nicht in hinreichender Form die mit diesem Vorhaben verbundenen Ansprüche. Gleiches gilt auch für die wenigen Grundsatzverifikationen, die für die Modelle OTT-1D und OTT-2D vorliegen (DODD 1998; DODD & TOZER 2000).

Das Modell ODIFLOCS ist im Projekt OPTICREST (DE ROUCK et al. 2002) auf die Messdaten des Wellenkanals des Leichtweiß-Institutes angewandt worden. Bezüglich der berechneten Überlaufraten zeigte sich das Modell gegenüber der Art der Randbedingung als weitgehend unempfindlich. So waren die Ergebnisse nicht signifikant besser bei Verwendung von gemessenen Auslenkungen als bei der Verwendung von aus einem Spektrum abgeleiteten Wellenzügen. Auch für den Koeffizienten für die Sohlreibung ergaben sich bei den Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede auf die simulierten Überlaufraten: Mit einem Standardkoeffizient sind im Mittel gleichwertige Ergebnisse erzielt worden wie mit kalibrierten, räumlich differenzierten Werten (DE ROUCK et al. 2002).

2.2.2 Untersuchungen mit der Flüssigkeitsvolumen-Methode

Der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Eignung mathematischer Modelle zur Seegangsbelastung von Bauwerken im Projekt OPTICREST (DE ROUCK et al. 2002) lag

auf der Anwendung und Verbesserung von Modellen, welche auf der Flüssigkeitsvolumen-Methode (VOF: Volume of Fluid) beruhen. Hier sind insbesondere alternative Turbulenzmodelle (sogenannte 0-, 1- und 2-Gleichungsmodelle) implementiert und getestet worden. Weitere Anstrengungen galten der Realisierung einer vollkommenen aktiven absorbierenden offenen Randbedingung, also einer Randbedingung die sowohl Wellen generieren kann als auch herauslaufende Anteile passieren lässt.

Vergleichende Anwendungen von VOF-Modellen auf die Kanaldaten zeigten - bei allen erzielten modelltechnischen Verbesserungen - die Nachteile dieser Modellgruppe bezüglich der praktischen Anwendbarkeit auf. So sind bei den VOF-Modellen mehr physikalische und numerische Parameter vorzugeben, was einen großen Aufwand in die Einarbeitung in die Modelle bedeutet. Obwohl vom physikalischen Standpunkt exakter, erzielen die VOF-Modelle dabei keine bessere Ergebnisse bezüglich der relevanten Größen Auflaufhöhe und Überlaufvolumen (DE ROUCK et al. 2002). Die Anwendung von VOF-Modelle wird daher vorerst auf den akademischen Bereich beschränkt bleiben. Für ein anwendungsorientiertes Vorhaben wie "Optimierung von Deichprofilen" sind sie deshalb noch nicht geeignet.

3. Untersuchungsinhalte und Methodik

3.1 Untersuchungsinhalte

Arbeitsinhalte des Forschungsvorhabens sind im Wesentlichen die Überprüfung der Eignung von eindimensionalen mathematischen Modellen für Wellenauf- und überlauf an Deichen auf Basis der Flachwassergleichungen. Als Grundlagen dafür standen Daten von physikalischen Modellversuchen im Großen Wellenkanal (GWK) der Universität Hannover und der TU Braunschweig in Hannover und dem Kleinen Wellenkanal (LWK) des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig aus dem KFKI-Forschungsvorhaben "Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen" (03KIS032) sowie aus dem Wellenbecken des Franzius-Instituts der Universität Hannover aus dem KFKI-Forschungsvorhaben "Schräger Wellenangriff auf Deiche" (03KIS032) zur Verfügung. Die Validierung der Modelle wurde im Wesentlichen über den Vergleich berechneter und gemessener mittlerer Überlaufmengen vorgenommen, da hierfür geeignete Datensätze aus den physikalischen Modellen vorlagen. Ergänzend sind aber im Sinne einer Überprüfung der Naturähnlichkeit der mathematischen Modelle auch singuläre Auflaufereignisse über die jeweiligen Auflaufhöhen verglichen worden. Im Sinne zukünftig zu formulierender Bemessungsansätze für Deiche (NIEMEYER 2001) sind allerdings mittleren Überlaufraten oder die zeitlich gemittelte Schichtdicke auf der Deichkrone (WEIßMANN 2003) die geeigneteren Parameter. Dies entspricht auch dem sich abzeichnenden internationalen Standard, wobei hinsichtlich der Formulierung kritischer bodenmechanisch oder konstruktiver Grenzwerte noch erhebliche Unsicherheiten bestehen. In der Literatur bereits vereinzelt auftauchende Schemata für die Gefährdung von Bauwerken (Abb. 3) sind lediglich als Indikator anzusehen; wegen der mangelnden Differenzierung nach bodenmechanischen oder konstruktiven Merkmalen ist ihre Anwendung auf die Bemessung mit unangemessenen Risiken hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit verbunden.

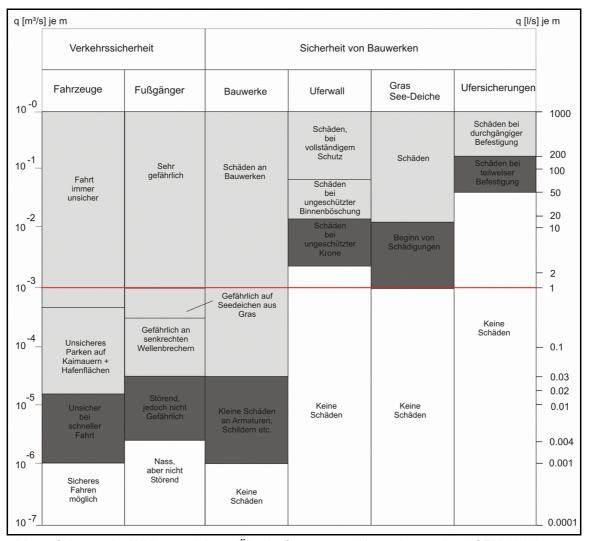


Abb. 3: Schema der Wirkung mittleren Überlaufmengen an Küstenbauwerken (CEM 2002)

Im KFKI-Forschungsvorhaben "Optimierung von Deichprofilen – Mathematische Modellierung von Wellenauf- und überlauf" sind folgende innovative Untersuchungen vorgenommen worden:

- Es sind Vergleiche der Ergebnisse von zwei eindimensionalen mathematischen Wellenauf- und -überlauflaufmodellen mit physikalischen Modellversuchen in Wellenkanälen vorgenommen worden.
- Es sind erstmalig Messdaten aus großmaßstäblichen physikalischen Modellversuchen zur Validierung mathematischer Modelle für Wellenauf- und -überlauf herangezogen worden.
- Es konnten Validierungen für ein zweidimensionales mathematisches Wellenauf- und überlaufmodell im Vergleich mit den Daten aus einem Wellenbecken ausgeführt werden.
- Es sind Untersuchungen relevanter Fragestellungen für die Anwendung der Modelle wie die Wahl der seeseitigen Modellgrenze und die Ausbildung der Randbedingung in phasengemittelter oder -aufgelöster Form vorgenommen worden.

Damit geht es inhaltlich wesentlich weiter als frühere Vorhaben wie beispielsweise das im Jahr 2001 beendete EU-MAST3-Projekt OPTICREST (<u>OPTI</u>misation of <u>CREST</u> level design of sloping coastal structures through prototye monitoring and modelling), in dem keine dieser Fragestellungen bearbeitet worden sind.

Untersucht worden sind im Rahmen des Forschungsvorhaben die beiden eindimensionalen Modelle OTT-1D und ODIFLOCS im Rahmen. Es zeigte sich, dass das Modell ODIFLOCS einer Kalibrierung im Sinne einer Untersuchung der Sensitivität von Modell-parametern unterzogen werden musste. Diese ist in der ersten Projektphase durchgeführt worden (NIEMEYER et al. 2002).

In der zweiten Projektphase konnte dann aus parallel durchgeführten Simulationen ein Vergleich der beiden mathematischen Kanalmodelle bezüglich der Qualität der Ergebnisse und der Modellperformance gezogen werden.

In der letzten Phase sind dann -nach Verfügbarkeit der Daten aus den hydraulischen Modellversuchen- räumliche Untersuchungen mit dem 2-dimensionalen Modell OTT-2D ausgeführt worden. Eine Modellvalidierung konnte in Ansätzen anhand von Beckendaten des Franzius-Institutes vorgenommen werden, dabei wurde auch das Modell OTT-1D herangezogen, um das Modellverhalten der beiden Versionen direkt gegenüberstellen zu können.

In Hinblick auf die praktische Anwendung der Modelle ist die Lage und Art der seeseitigen Randbedingung von besonderem Interesse. Simulationen von VAN GENT und DOORN (2001) legen nahe, spektrale Randbedingungen nur eingeschränkt für Flachwasserwellenmodelle zu verwenden. Dies konnte bezüglich der Ergebnistreue im Vergleich zur direkten Eingabe von Auslenkungen bisher nicht mit einer ausreichenden Datenmenge geprüft werden. Die Aussagen von VAN GENT und DOORN (2001) konnten mit systematischen Vergleichsrechnungen relativiert und präzisiert werden. Bezüglich der Lage des offenen, seeseitigen Randes sind ebenfalls Sensitivitätsanalysen vorgenommen wurden.

Konventionelle Berechnungsverfahren zur Ermittlung der mittleren Überlaufraten sind im Rahmen eines Methodenvergleiches auf die Messdaten des Großen Wellenkanals angewandt worden. Die Gegenüberstellung der Ergebnisdatensätze belegt die gute Qualität der Modellergebnisse.

3.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war einerseits möglich, weil mathematische Modelle zur Ermittlung von Wellenauf- und überlauf erstmals zur Verfügung standen. Andererseits konnten die für die Validierung dieser Modelle erforderlichen Daten aus physikalischen Modellversuchen dadurch gesichert werden, dass der Geldgeber den Projektbetreibern der KFKI-Forschungsvorhaben "Wellenüberlaufwirkung auf Deichbinnenböschungen" und "Schräger Wellenangriff auf Deiche" die Auflage erteilte, entsprechende Datensätze für das Forschungsvorhaben "Optimierung von Deichprofilen" zur Verfügung zu stellen.

Damit war aber gleichzeitig für dieses Vorhaben eine hohe Abhängigkeit vom Untersuchungsfortschritt der anderen Vorhaben gegeben. Aus diesem Grund wurde die Planung des Vorhabens und der vorgesehene Arbeitsumfang so ausgelegt, dass eine diskontinuierliche Bearbeitung in Schwerpunktphasen entsprechend der Datenverfügbar-

keit erfolgen konnte. Von daher wurde aus Projektmitteln kein wissenschaftliches Personal eingestellt, sondern die wissenschaftliche Bearbeitung auf Planpersonal des Antragstellers verlagert.

Die zu Beginn des Vorhabens getroffene Einschätzung hat sich als richtig erwiesen: Der Datentransfer aus den anderen Projekten erfolgte erheblich später als vorgesehen; die Daten des Projekts "Schräger Wellenangriff auf Deiche" standen sogar erst nach Ende der eigentlichen Projektdauer zur Verfügung, da dort ein kurzfristiger Personalwechsel stattgefunden hatte. Dem steht für den Projektbetreiber Forschungsstelle Küste der Vorteil gegenüber, dass der bei Vorhaben mit Drittmittelpersonal zur Sicherung des Erkenntnisgewinns erforderliche Wissenstransfer zum Planpersonal, der häufig mit partiellen Filterwirkungen verbunden ist, nicht bewerkstelligt werden mußte.

4. Ergebnisdarstellung

4.1 Allgemeines zu den numerischen Modellen

Die Flachwassergleichungen bilden die physikalische Grundlage der in diesem Vorhaben angewandten Modelle. Klassische numerische Anwendungen der Flachwassergleichungen finden sich überall dort, wo es sich um großräumige, in erster Linie horizontale Strömungen handelt. Ein Vorteil dieser Gleichungen ist ihre rechentechnisch unkomplizierte Anwendung mit standardisierten, recht stabilen, schnell zu lösenden numerischen Schemata.

Die Anwendung von numerischen Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen für die Wellenauflaufzone widerspricht erstmal der Annahme von rein horizontalen Strömungen. So existieren in brechenden Wellen und in der Wellenauflaufzunge auch starke vertikale Strömungskomponenten sowie Strömungsschichtungen, die von diesen Modellen nicht physikalisch detailliert wiedergegeben werden können. Betrachtet man jedoch die Phänomene, die aufgrund der horizontalen Impuls- und Massenerhaltung auftreten, wie z.B. Höhe und Intensität der auflaufenden Wassermassen, scheint die Anwendung dieser Modelle berechtigt, wie z.B. von VAN GENT et al. (2001), und RICH-ARDSON et al. (2001) dargelegt wurde.

Eine anderer Modellgruppe, die zur Berechnung von Wellenauflauf verwendet werden kann, arbeitet auf Basis der Navier-Stokes-Gleichung. Die Wassersäule ist hier in der Vertikalen aufgelöst und es werden auf direktem Wege vertikale Geschwindigkeiten und eine Schichtung des Wasserkörpers simuliert. Diese zweidimensional-vertikalen (2DV) Modelle lösen das Problem der numerischen Beschreibung der Wasserlinie oft mit Hilfe der Volume-Of-Fluid-Methode und werden daher auch oft als VOF-Modelle bezeichnet. Einige der nur im wissenschaftlichen Umfeld verwendeten Modelle wurden im Projekt OPTICREST (DE ROUCK et al. 2002) getestet. Die Güte dieser Modelle in Bezug auf Wellenauf- und überlauf ist jedoch deutlich geringer als die auf den Flachwassergleichungen basierenden (DE ROUCK et al. 2002). VOF-Modelle sind in diesem Vorhaben nicht untersucht worden.

4.1.1 Flachwassergleichungen

Die Flachwassergleichungen werden im Küsteningenieurwesen schon länger zur Berechnung von horizontalen Meeresströmungen verwendet; Neuland ist die Anwendung bezüglich des Wellenauflaufs. Die Herleitung der Flachwassergleichungen erfolgt aus der Navier-Stokes-Gleichung unter der Annahme eines idealen Fluids, und Vernachlässigung von vertikalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Somit repräsentieren die Gleichungen den Erhalt von Masse und Impuls in einer vertikal über die Wassersäule integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung der Sohlreibung. Die eindimensionalen Flachwassergleichungen schreiben sich:

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = gh \frac{\partial h_{SWL}}{\partial x} - \frac{f_W}{2} u \mid u \mid$$

Gleichung 1

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) = 0$$

Gleichung 2

Gleichung 1 steht für die Bilanz des horizontalen Impulses, Gleichung 2 ist die Massenerhaltungsgleichung. Hierin ist u über die Wassertiefe integrierte horizontale Geschwindigkeit, h die momentane lokale Wassertiefe und h_{SWL} der Ruhewasserspiegel. Der zweite Term der rechten Seite der Gleichung 1 steht für die Bodenreibung mit dem Rauhigkeitsbeiwert für Wellen f_{w} . Eine Herleitung der Flachwassergleichung kann z.B. bei ABBOTT (1979) gefunden werden.

Bezüglich der Anwendung der Flachwassergleichungen hat RICHARDSON et al. (2001) gezeigt, dass sogar der Auflauf an beinahe vertikale Böschungen (10:1) berechnet werden kann, obwohl dies theoretisch den Annahmen der Herleitung der Flachwassergleichungen aus der Navier-Stokes-Gleichung widerspricht. Da nur eine über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit berechnet wird, sollten die Modelle (theoretisch) nur für Bedingungen angewandt werden, in denen die Wellen ein entsprechend gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil aufweisen, also unter extremen Flachwasserbedingungen. Die wichtigsten Eigenschaften, nämlich der Erhalt von Masse- und Impuls bleiben jedoch auch bei Verletzung dieser Bedingung erhalten, weshalb die Arbeitsweise dieser Modelle für tieferes Wasser generell unbeeinträchtigt ist.

Ein wichtiger Aspekt der Flachwassergleichungen ist der, dass das Wellenbrechen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Flachwasserwellen c= $(g^*h)^{0.5}$ implizit enthalten ist. So propagiert der Wellenberg aufgrund der größeren Wassertiefe h schneller als das Wellental, was zur Ausbildung einer beinah vertikalen Front führt, die als Bore angesehen wird und somit die laufende, brechende Welle modelliert.

4.1.2 Allgemeines zur Modellbildung

Die numerischen Modell benötigen als Eingabe prinzipiell alle Daten, die sich aus der Natur bzw. den Laborversuchen ableiten lassen. Dies gilt vor allem für die geometrischen Abmessungen der physikalischen Versuchsanordnung bzw. des zu untersuchenden Bauwerkes. Strebt man einen Vergleich von gemessenen zu simulierten Größen an, ist auch die exakte Lage der Messstellen zu beschreiben. Was im physikalischen Modell das Wellenpaddel ist, wird im numerischen Modell zu einem offenen Rand mit einer Einstrom-Randbedingung- auch offener Rand genannt. Darüber hinaus müssen auch die Eigenschaften der anderen Beckenränder bzw. Modellränder beschrieben werden, hier unterscheidet man grundsätzlich zwischen absorbierenden und reflektierenden Rändern.

Definitionen, die wichtig sind für das numerische Modell, jedoch im Laborversuch nicht explizit definiert werden müssen, betreffen den Rauhigkeitsbeiwert f_w , die minimale Wassertiefe, die das Modell berechnen soll, und die Wassertiefe, die als Wellenauflauffront angesehen werden soll. Da das numerische Modell Raum und Zeit in diskrete Kontinua zerlegt, muss deren Größe, also die Güte der Auflösung in Raum (räumlicher Diskretisierungsschritt Δx) und in der Zeit (Rechenzeitschritt Δt) definiert werden. Dabei sollten die Auflösungen so gewählt werden, dass die relevanten Phänomene auch vom Modell wiedergegeben werden können.

4.1.3 Die Modelle OTT-1D und ODIFLOCS

4.1.3.1 ODIFLOCS

ODIFLOCS (One-DImensional-FLow On and in Coastal Structures) ist ein Modell auf Basis der Flachwassergleichungen, welches zusätzlich auch die Strömung in durchlässigen Medien simulieren kann, beispielsweise die Interaktion der Auflaufzunge an geschütteten Wellenbrechern mit dem ein- und aussickernden Porenwasser. Dazu erweiterte VAN GENT (1994, 1995) das Modell mit entsprechenden Gleichungen. Innerhalb dieses Projektes sind mit ODIFLOCS nur undurchlässige Deichaußenböschungen simuliert worden.

Als Randbedingungen sind gemessene Auslenkungen, reguläre Wellen und die Vorgabe eines TMA-Spektrums möglich, dabei werden die einzelnen lineare Wellenphasen des Spektrums zufallsgesteuert am offenen Rand vorgegeben. Der Rauhigkeitsbeiwert fw kann Abschnittsweise differenziert vorgegeben werden. Das Flachwasser-Modell ODI-FLOCS wird in VAN GENT (1995) detailliert beschrieben.

4.1.3.2 OTT-1D

Das Modell OTT-1D ist Teil der Modellsuite ANEMONE (Advanced Non-linear Engineering Models for Nearshore Environment) von HR Wallingford. Es ist in der Lage, die vollständige Überströmung eines Bauwerkes mit der durch das überströmende Wasser in Lee stattfindenden Wellengeneration zu simulieren. Dies liegt im Wesentlichen an der Fähigkeit, mehrere von einander getrennte Wassermassen (Auflaufzunge, überströmendes Wasser, Wasserkörper in Lee) rechentechnisch zu behandeln. Durchlässige Medien kann die Modellvariante OTTP-1D simulieren, welche aber nicht Gegenstand der Untersuchungen ist.

Randbedingungen können reguläre und irreguläre Wellen sein, eine Vorgabe von standardisierten oder auch selbst definierten Spektren ist möglich, wobei die einzelnen linearen Wellenphasen wie auch bei ODIFLOCS in ihrer Reihenfolge zufallsgesteuert werden. Der Rauhigkeitsbeiwert kann nur konstant über das gesamte Modellgebiet vorgegeben werden.

4.1.3.3 Numerische Methoden

Die Flachwassergleichungen werden in den im Vorhaben verwendeten Modellen ODI-FLOCS, OTT-1D und OTT-2D über die Finite-Volumen-Methode gelöst. Die Modelle unterscheiden sich jedoch bezüglich der numerischen Schemata. Während in den OTT-Modellen ein (neueres) Gudonov-artiges Schema verwendet wird, ist in ODIFLOCS ein Lax-Wendroff Schema implementiert. Das Gudonov-artige Schema von OTT besitzt den rechentechnischen Vorteil, dass die bewegte Wasserlinie, also der zeitlich variable Rand des Wasserkörpers, numerisch in derselben Weise behandelt werden kann, wie der übrige Wasserkörper. Im Lax-Wendroff- Schema muss die momentane Lage der Wasserlinie detektiert und die Volumina der benetzten Gitterzellen gespeichert werden, was rechentechnisch sehr aufwendig ist. Weithin kann bei Verwendung eines Gudonovartigen Schemas auf eine zusätzliche Glättung - zur Vermeidung von numerischen Oszillationen – in der Nähe der steilen Wasserstandsgradienten der propagierenden Bore verzichtet werden. Insofern können die OTT-Modelle als fortschrittlicher bezüglich ModellItechnik angesehen werden.

In den beiden expliziten Schemata wird der erlaubt maximale Rechenzeitschritt Δt über das Courant-Friedrichs-Levy-Kriterium (CFL-Kriterium) bestimmt, um eine stabile Lösung zu ermöglichen. Für weitere Details zu den numerischen Schemata bzw. zu deren Auswirkungen wird an dieser Stelle auf die Literatur der jeweiligen Modellentwickler verwiesen. Für OTT ist dies DODD (1998) und HUBBARD und DODD (2000), für ODI-FLOCS gilt VAN GENT (1995).

4.1.3.4 Modellbetrieb

Beide 1D-Modelle können problemlos auf modernen PCs betrieben werden. Die Rechenzeiten hängen von der Anzahl der Rechenknoten ab, liegen aber im Allgemeinen in der Größenordnung der Echtzeiten. Dies ist wichtig für den ingenieurpraktischen Einsatz, so können ohne großen rechentechnischen Aufwand Varianten- und Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt werden. Das zweidimensionale Modell OTT-2D benötigt ein Vielfaches der Rechenzeit ist aber ebenfalls auf PCs lauffähig (vgl. Abschnitt 2.3.2).

4.2 1D-Modelluntersuchungen

Messdaten der 1-dimensionalen hydraulischen Modellversuche zum Wellenüberlauf aus dem kleinen Wellenkanal (LWK) des Leichtweiß-Institutes (OUMERACI, 2000) und des großen Wellenkanals in Hannover (GWK) (OUMERACI et al. 2001) sind als Grundlage für Modellkalibrierung und Modellvalidierung der 1D-Modelle genutzt worden (Zulieferung aus dem KFKI-Forschungsvorhaben Wellenüberlaufbelastung von Deichbinnenböschungen –003KIS009). Die Dimensionen des GWK erlaubte es Versuche annähernd im 1:1 Naturmaßstab ("prototype measurements") durchzuführen. Die 1D-Modellvalidierung in Abschnitt 2.2.4 ist weltweit die erste, die Daten aus Versuchen mit diesen natürlichen Größenskalen verwendet.

4.2.1 LWK-Versuche

Die am Leichtweiß-Institut in der ersten Phase des o.g. KfKI-Projektes durchgeführten Untersuchungen sind als kleinmaßstäblich zu bezeichnen, die gemessenen mittleren Überlaufraten liegen ungefähr zwischen 0 < Q < 2,6 l/(sm).

4.2.1.1 Versuchsanordnung im kleinen Wellenkanal

Der kleine Wellenkanal am LWI ist 100 m lang, 2 m breit und 1,25 m tief. Das Wellenpaddel kann regulären und irregulären Seegang mit Wellenhöhen von bis zu 0,25 m und Wellenperioden zwischen 1,5 s und 6,0 s erzeugen. Die Wassertiefe im Kanal liegt bei den verwendeten Versuchsdaten bei 0,7 m. Der undurchlässige Modelldeich hat eine Neigung von 1:6, die Deichkrone hat eine Länge von 30 cm und liegt bei allen Versuchen 10 cm über dem Ruhewasserspiegel. Die Böschung ist relativ glatt, von QUMERA-CI (2000) wird hierfür ein mittlerer Rauhigkeitsbeiwert (Reibungsbeiwert) f_w =0,0058 angegeben. Hinter der Deichkrone befindet sich der Behälter zur Messung der Überlaufvolumina. Diese sind für ein Zeitintervall von $100*T_p$ gemessen worden über das sich dann entsprechend die mittleren Überlaufraten berechnen.

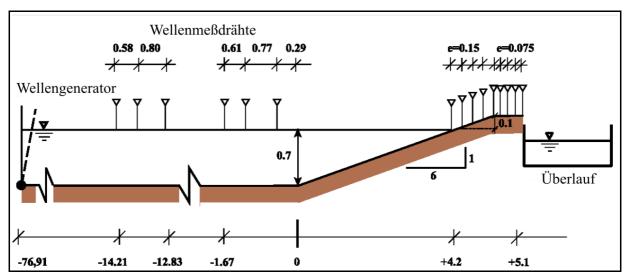


Abb. 4: Versuchsanordnung und Lage der Messgeräte im LWK (aus: Oumeraci et al. 2001)

4.2.1.2 Versuchsprogramm

Neben standardisierten Spektren wie z.B. JONSWAP und TMA-Spektren und regelmäßigen Wellen sind 119 Versuch mit natürlichen Spektren gefahren worden. Davon sind hier 59 Versuche herangezogen worden, die eine Wellenhöhe H_{m0} im Bereich von 0,04 m < H_{m0} < 0,09 m und eine dominante Periode im Bereich 1,22 s < T_p < 2,38 s aufwiesen.

4.2.2 GWK-Versuche

4.2.2.1 Versuchsanordnung im großen Wellenkanal (GWK)

Großmaßstäbliche Versuche sind im Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover durchgeführt worden. Der Wellenkanal hat eine Länge von 324 m eine Breite von 5 m und eine Tiefe von 7 m. Regelmäßige Wellen bis zu einer Größe von H = 2,0 m und spektrale

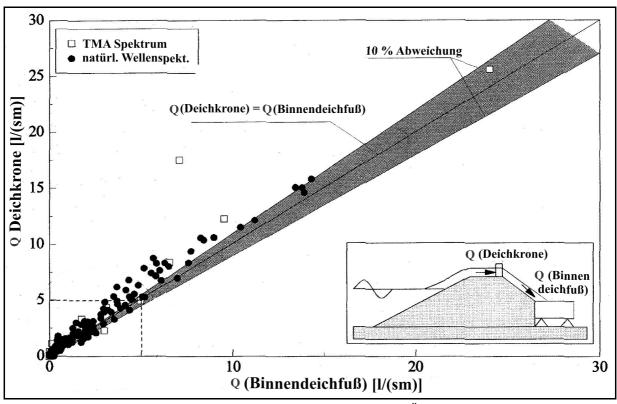


Abb. 5: Vergleich der an beiden Messpositionen gemessene mittlere Überlaufraten (aus: Oumeraci et al. 2001)

Wellen bis zu einer Größe von H_{m0} = 1,4 m können im GWK erzeugt werden. Die Versuche zum Wellenauf- und Wellenüberlauf sind mit einem undurchlässigen Deich einer Außenböschungsneigung von 1:6 und einer Innenböschungsneigung von 1:3 durchgeführt worden. Die Deichkrone liegt bei den Versuchen 1,0 m bzw. 1,75 m über dem Ruhewasserspiegel (vgl. Abb. 7).

Wasserspiegelauslenkungen werden an den in Abbildung 6 dargestellten Positionen über 2 Wellenharfen und 9 einzelne Wellendrähte (WG3 – WG11) gemessen. Die dort gemessenen Auslenkungen können als Randbedingungen für die numerischen Modelle verwendet werden. Das gesamte Messprogramm des KfKI-Forschungsprojektes umfasste die Messung von Wellenauflaufhöhen, Schichtdicken, Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverhältnisse in der Auflaufzunge, sowie Messungen der Überströmungsvolumina bzw. –raten (OUMERACI et al. 2001). Die Volumina wurden einmal über einen

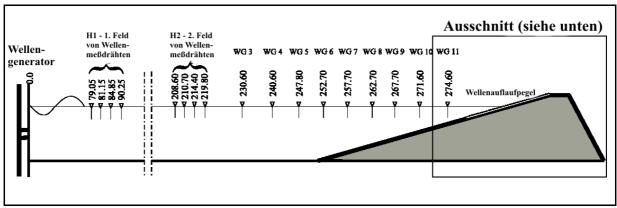


Abb. 6: Lage der Wellenharfen und -messdrähte im GWK (aus: Oumeraci et al. 2001)

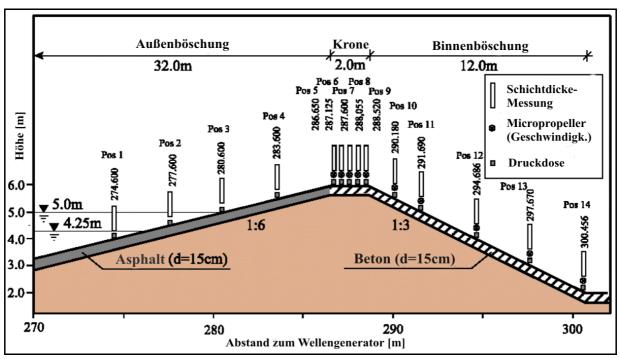


Abb. 7: Deichgeometrie und Lage der Messstellen auf den Deichböschungen des GWK (aus: Oumeraci et al. 2001)

1,2 m breiten Auffangbehälter auf der Deichkrone zum anderen über ein Auffangcontainer einer Breite von 0,34 m am binnenseitigen Böschungsfuß bestimmt. Eine Gegenüberstellung von beiden Messungen zeigt, dass Unterschiede von deutlich über 10% auftreten (Abb. 5). Dabei wird tendenziell auf der Deichkrone (crest) höhere Raten gemessen, als am binnenseitigen Deichfuß. OUMERACI et al. (2001) empfiehlt die Messung auf der Deichkrone für weitere Auswertung zu verwenden; auch für den Vergleich mit Modellen.

Die Höhe des Wellenauflaufs auf der Außenböschung wird mit einem digitalen Pegel in diskreten Höhenschritten von 4,1 cm gemessen. Der digitale Pegel gibt im jeweiligen Segment ein Signal, wenn er mit Wasser in Kontakt kommt, die Schichtdicke der Auflaufzunge kann er nicht messen.

4.2.2.2 Versuchsprogramm

Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen in denen vor allem standardisierte Wellenspektren und regelmäßige Wellen untersucht wurden, liegt der Schwerpunkt der GWK-Versuche auf natürlichen Spektren. Diese natürlichen Spektren stammen vor allem aus den deutschen Küstengebieten der Nord- und Ostsee und spiegeln somit die Besonderheiten dieser durch die Wattenmorphologie und Flachwasserzonen geprägten Seegangsverhältnisse wider. Charakteristisch im Gegensatz zu den standardisierten Spektren ist z.B. die Ausprägung von zwei oder drei Hauptfrequenzen, die durch die Filterwirkung der Watten zusammen mit den damit einhergehenden Wellen-Wellen-Wechselwirkungen entstehen. Abbildung 8 zeigt dazu ein Beispiel. Die Stärken der Auflaufsimulation mit numerischen Modellen liegen einerseits in der Vorgabe von variablen Deichgeometrien, andererseits in der Einspeisung von beliebigen Seegangszuständen. Für die praktische Bemessung von Küstenschutzbauwerken ist letztgenannter Vorteil ganz entscheidend, weshalb die in diesem Vorhaben durchgeführten modelltechnischen Untersuchungen schwerpunktmäßig auf natürliche Seegangsverhältnisse ausgerichtet sind.

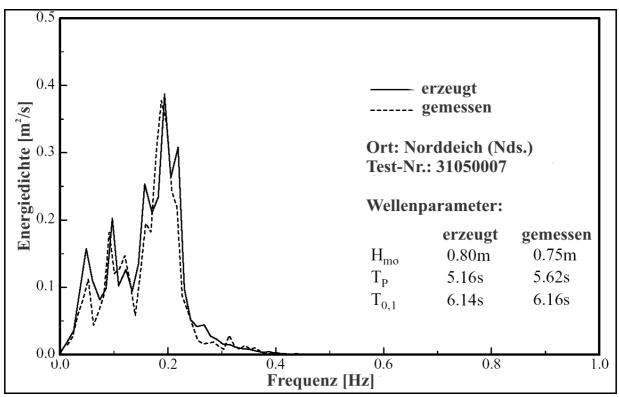


Abb. 8: Gemessenes und im GWK erzeugtes typisches natürliches Spektrum eines Wattengebietes (Norddeich, Nordsee) aus Oumeraci et al. 2001

Neben den natürlichen Spektren sind noch TMA- Flachwasserspektren, JONSWAP-Spektren und regulärer (monochromatischer) Seegang im GWK untersucht worden.

4.2.3 Modelluntersuchungen der LWK-Versuche

Die Versuchsreihen im kleinen Wellenkanal unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Größenordnung der mittleren Überlaufraten. Während im GWK Überlaufraten gemessen wurden, die von ihrer Größenordnung naturähnlich sind ("prototype scale"), treten im LWK gemessenen Raten auf, die um ca. eine Größenordnung geringer sind.

4.2.3.1 Kalibrierung des Modells ODIFLOCS

In der ersten Projektphase der Jahre 2001-2002 wurden Messdaten von Überlaufversuchen aus dem LWK verfügbar, so dass eine Validierung des Modells ODIFLOCS vorgenommen werden konnte. Verglichen sind die über die Versuchsdauern gemittelten Überlaufraten. Im Laufe der Modelluntersuchungen stellte sich jedoch heraus, dass das Modell ODIFLOCS bezüglich geeigneter Modellvoreinstellungen zuerst einmal über eine Parameterstudie optimiert werden musste (NIEMEYER et al. 2002).

4.2.3.1.1 Standardparameter

Die Verwendung der im Handbuch (VAN GENT, 1993) empfohlenen Standardparameter für die minimale Wassertiefe Δ , des Zeitschrittes Δt und der Gitterweite Δx führten zu einer Großzahl von Programmabbrüchen infolge numerischen Instabilitäten. Bei der gewählten sehr glatten Sohle einer geringen Sandrauheitshöhe (Sandrauheit) von D= 10^{-9} m konnten nur einige der 56 Modellläufe überhaupt beendet werden. Eine Variation der Sandrauheit lieferte bei ansonsten konstanten Modellparametern deutlich bessere Ergebnisse. 100% der Versuche waren stabil bei einer Sandrauheit von D= 10^{-3} m (Abb. 9, links). Allerdings führte die erhöhte Rauhigkeit zu einer Unterschätzung der Überlaufraten (Abb. 9, rechts).

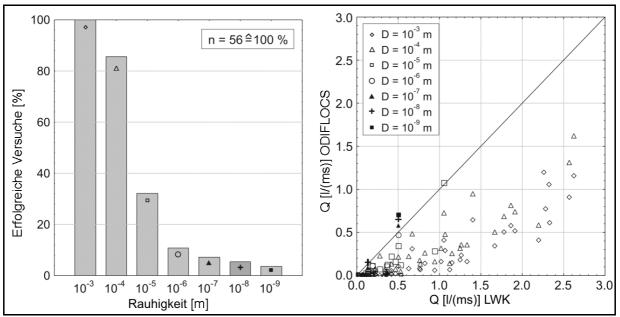


Abb. 9: Versuchsreihe mit Variation der Rauhigkeit. Links: Erfolgreiche Versuche bei verschiedenen Rauhigkeiten, rechts: Vergleich der gemessenen zu simulierten mittleren Überlaufraten

4.2.3.1.2 Variation der Modellparameter

Um das Verhalten des numerischen Modells auch für extrem glatte Sohlen – wie sie vor allem in Kanalexperimenten vorhanden sind - zu verbessern, musste eine Parameterstudie durchgeführt werden. Zuerst wurde der Rechenzeitschritt variiert. Die Auswirkungen eines reduzierten Zeitschrittes waren jedoch marginal. Selbst mit einer Reduzierung auf 40 % des ursprünglichen Rechenzeitschrittes gelang es lediglich eine Erfolgsquote von ca. 18% zu erzielen. Noch kleinere Rechenzeitschritte führten zu keiner Verbesserung (Abb. 10, links).

Als nächstes wurde die minimale Wassertiefe Δ , d.h. das Abbruchkriterium bis zu dem das Modell einen Rechenknoten als feucht betrachten soll, variiert. Dabei zeigte sich, dass eine Verringerung dieses Parameters um den Faktor 50 die Stabilität beträchtlich erhöhen kann, es konnten annähernd 90 % der Versuche ohne Instabilitäten simuliert werden (Abb. 11, links).

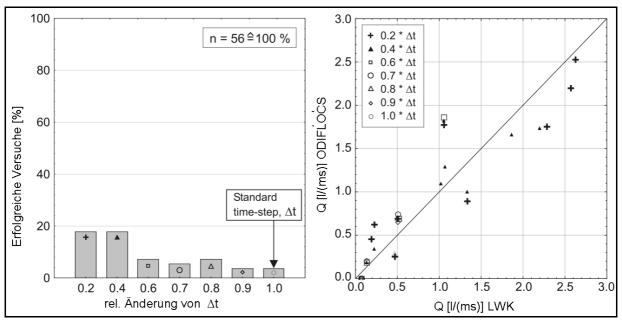


Abb. 10: Versuchsreihe mit Variation des Berechnungszeitschrittes bei konstanter Rauhigkeit. Links: Erfolgreiche Versuche bei verschiedenen Zeitschritten, rechts: Vergleich der gemessenen zu simulierten mittleren Überlaufraten

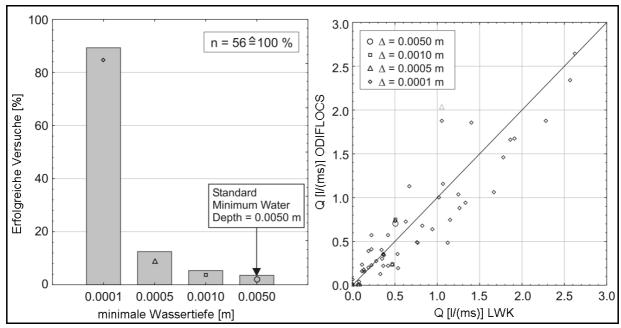


Abb. 11: Versuchsreihe mit Variation der minimalen Wassertiefe bei konst. Rauhigkeit. Links: Erfolgreiche Versuche bei versch. minimalen Wassertiefen, rechts: Vergleich der gemessenen zu simulierten mittleren Überlaufraten

Die Verbesserungen hinsichtlich der Modellstabilität, die durch die Variation des Rechenzeitschrittes und der minimalen Wassertiefe erzielt wurden, ermutigten zu einer weiteren Parameterstudie, um beide positiven Effekt zu kombinieren. Ausgehend von einer geringen minimalen Wassertiefe von Δ = 0,0001 m ist wiederum der Rechenzeitschritt verringert worden. Es konnte eine geringfügige Verbesserung bei um 20 % verringertem Rechenzeitschritt erzielt werden. Allerdings wurden bei weiterer Verringerung von über 40 % und mehr kontinuierlich immer weniger erfolgreiche Modellversuche gezählt (Abb. 12, links).

Für die Modellbildung in weiteren Untersuchungen konnte festgehalten werden, dass ODIFLOCS mit einer möglichst geringen minimalen Wassertiefe, bei möglichst höheren Rauhigkeitsbeiwerten betrieben werden sollte. Diese Einstellungen erhöhen die numerisch Stabilität von ODIFLOCS.

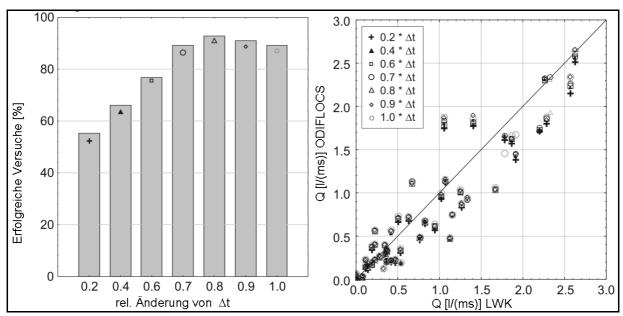


Abb. 12: Versuchsreihe mit Variation des Rechenzeitschrittes bei konst. Rauhigkeit und einer minimalen Wassertiefe von Δ = 0,0001 m. Links: Erfolgreiche Versuche bei versch. Rechenzeitschritten, rechts: Vergleich der gemessenen zu simulierten mittleren Überlaufraten

4.2.3.2 Ausbildung des mathematischen Wellenkanals

Der kleine Wellenkanal ist in beiden Modellen mit einem räumlichen Diskretisierungsschritt im cm-Bereich aufgelöst. Der offene Einstrom-Modellrand liegt in einer Entfernung von 1,67 m vom Böschungsfuß. Der dortige Messdraht wird als Signal für die Randbedingungen verwendet (Abb. 4). Der rechte Modellrand liegt bei beiden Modellen am oberen Ende der Böschung. Wie bei der Modellbildung der GWK-Versuche ist hier eine absorbierende Randbedingungen eingesetzt worden. Die modellspezifischen Einstellungen sind in der nachfolgenden Tabelle 1 notiert. Im Modell ODIFLOCS ist der Rauhigkeitsbeiwert f_w , der ja eine Funktion der Wellenperiode und der geometrischen Sandrauheit $f(T_p, D)$ ist, immer auf eine konstante geometrische Sandrauheit von $D=10^{-9}$ m eingestellt, damit konnten mit ODIFLOCS ca. 90 % (49 von 56) der Modellversuche simuliert werden (vgl. Abb. 11, links). Die resultierende Spannbreite der Rauhigkeitsbeiwerte ist in Tabelle 1 zu sehen.

	OTT-1D	ODIFLOCS
Rauhigkeitsbeiwert f _w	0,01	0,07 – 0,21
Minimale Wassertiefe	~ 0,0002 m	0,0001 m
Diskretisierungsschritt ΔX	0,05 m	$0.03 \text{ m} \pm 0.01 \text{ m}$

4.2.3.3 Vergleich der mittleren Überlaufraten

Der gewählte Datensatz des Modells ODIFLOCS stammt aus der Modellkalibrierung. Bezüglich der mittleren Überlaufrate ist es derjenige mit dem kleinsten mittleren Fehler.

Die Güte der beiden Modelle für die Versuchsreihen des LWK mit 56 bzw. 49 Versuchen ist vergleichbar (Tab. 2). Beide Modelle zeigen gute Ergebnisse mit einem mittleren relativen Fehler von ca. 33 %, dabei kommt es zu Über- wie auch zu Unterschätzungen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass der Ergebnisdatensatz des Modells ODI-FLOCS aus einer Modellkalibrierung hervorgeht, während die Ergebnisse von OTT-1D mit Standardeinstellungen erzielt worden sind. Interessant ist, dass beide Modelle in vielen Versuchen recht eng beieinander liegen - zu erkennen an den Datenpunktpärchen (roter und schwarzer Punkt) in Abbildung 13 - ein Hinweis auf die im Prinzip gleichartige Arbeitsweise der Modelle.

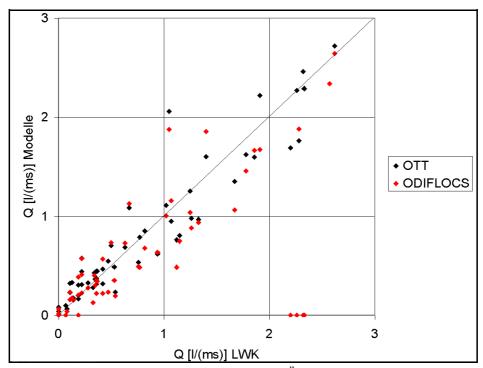


Abb. 13: Im LWK gemessene zu simulierten Überlaufraten der Modelle ODI-FLOCS und OTT-1D

	mittlerer absoluter Fehler	mittlerer relativer Fehler
OTT-1D	0,17 l/(ms)	33 %
ODIFLOCS	0,20 l/(ms)	35 %

Tab. 2: Mittlere absoluter und relativer Fehler der Überlaufrate der Modelle ODIFLOCS und OTT bei einer gemessenen mittleren Überlaufrate von 0,83 l/(ms)

4.2.4 Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal

Von den 146 Versuchen mit natürlichen Spektren, die im GWK durchgeführt wurden, sind im Rahmen der Modelluntersuchungen 45 ausgewählt worden. Die Auswahl zeichnet sich dadurch aus, dass eine große Bandbreite von mittleren Überlaufraten von 0,21

 13,89 l/(ms) mit unterschiedlichen Spektralformen abgedeckt wurden. Ein weiterer Schwerpunkt der Auswahl lag bei in deutschen Küstengebieten gemessenen Spektren.

4.2.4.1 Ausbildung des mathematischen Wellenkanals

Die räumliche Diskretisierung des GWK erfolgt in Schritten mit $\Delta x = 0.25$ m für alle durchgeführten Versuche. Für Modellläufe, mit dem offenen Rand direkt am Böschungsfuß entspricht dies 211 Rechenknoten, für größere Modellgebiete entsprechend mehr. Der Zeitschritt der dem Courant-Friedrich-Levy-Kriterium genügen muss, liegt bei Δt= 0,1 s. Die Sohlreibung wurde in beiden 1D-Modellen OTT-1D und ODIFLOCS mit einem Rauhigkeitsbeiwert f_w= 0,01 berücksichtigt, was einer recht glatten Sohle entspricht - die Böschung des Modelldeiches im GWK bestand aus Asphaltbeton (OUMERACI et al. 2001). Die Einström-Randbedingung wird am linken, offenen Modellrand vorgegeben. Sie ist entweder als Zeitreihe von Wasserspiegelauslenkungen der Messdrahtpositionen oder als frei definierbares oder standardisiertes Spektrum formuliert. Der rechte Modellrand liegt bei dem Modell ODIFLOCS in der Mitte der Deichkrone, der Rand ist dort als transmissive, absorbierende Randbedingung realisiert. Das Modellgebiet von OTT-1D enthält auch die Binnenböschung an deren Ende ebenfalls eine absorbierende Randbedingung implementiert ist. Für die Auswertung der Auflaufhöhen und der mittleren Überlaufraten der numerischen Modellläufe spielt dies jedoch keine Rolle. Die Bestimmung der Durchflüsse auf der Deichkrone erfolgt in der Mitte der Deichkrone, dort wo auch im physikalischen Versuch der Auffangbehälter angeordnet ist.

Ein modelltechnisch wichtiger Parameter ist die minimale zu berechnende Wassertiefe Δ an dem sich bewegenden, mit Wasser benetzten Modellrand. Sie ist so geringmächtig einzustellen, dass die geringste im physikalischen Versuch auftretende Schichtdicke der Wellenauflaufzunge wiedergegeben werden kann, muß jedoch so groß sein, dass die Geschwindigkeiten der Wellenauflaufzunge keine zu großen, unrealistischen Werte aufweist. Um eine Vergleichbarkeit der beiden Modelle zu gewährleisten ist Δ für beide 1D-Modelle auf ca. Δ =0,001m gesetzt. Mit diesem Wert konnten beide Modell betrieben werden, ohne das dies zu extrem langen Rechenzeiten und zu vielen numerischen Instabilitäten des Modells ODIFLOCS führte (vgl. oben).

4.2.4.2 Vergleich der Wellenauflaufhöhen

In Abbildung 14 sind exemplarisch der zeitliche Verlauf von gemessenen und mit OTT-1D berechneten Auflaufhöhen (Versuch Nr.1605001, natürliches Wellenspektrum mit h=5 m, H_{m0} = 0,60 m und T_p = 5,29 s). Der linke, offene Modellrand lag dabei an zwei verschiedenen Messstellen, und zwar an den Messdrahtpositionen WG3 und WG6. Hierbei liegt WG3 in etwa 25 m vom Böschungsfuß entfernt, WG6 liegt direkt am Böschungsfuß des Modelldeiches (vgl. Abb. 6). In Abbildung 14 erkennt man, dass die simulierten Auflaufereignisse sowohl bezüglich Zeitpunkt und Dauer, als auch in ihren Intensitäten recht gut mit der Messung übereinstimmen. Anhand der Verläufe sind optisch in dem dargestellten Zeitintervall kaum Qualitätsunterschiede zwischen den beiden Modellläufen auszumachen.

Für eine qualitative Betrachtung sind in Abbildung 15 alle gemessenen und berechneten momentanen Auflaufhöhen für die Modellläufe WG3 und WG6 gegeneinander aufgetragen.

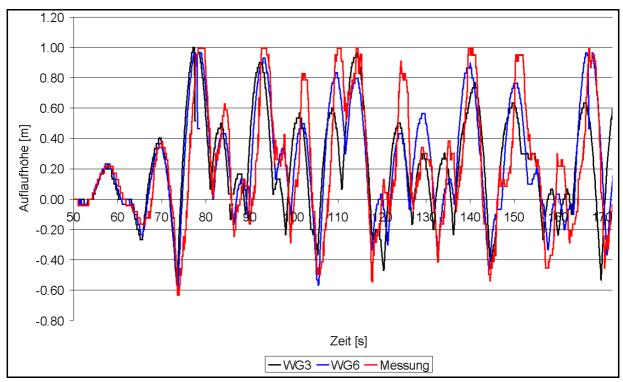


Abb. 14: Beispiel für gemessene und mit OTT-1D berechnete Wellenauflaufhöhen (GWK) für zwei Modellgebietsgrößen (WG3-größtes Modellgebiet, WG6-kleinstes Modellgebiet)

Die Korrelation des Modelllaufes WG6 – mit der Randbedingung direkt am Böschungsfuß – ist weitaus besser im Vergleich mit Modelllauf WG3, wo die vorgegebene Randbedingung ca. 22 m vom Böschungsfuß entfernt liegt (Abb. 6). Im Modelllauf WG3 wird ein Korrelationskoeffizient R=0,65, im Modelllauf WG6 jedoch eine starke Korrelation von R=0,81 erreicht. Der mittlere Quadratsummenfehler (QSF), der sich nach Gleichung 3 berechnet, verschlechtert sich von QSF = 0,08 m im Modelllauf WG6 auf QSF = 0,11 m

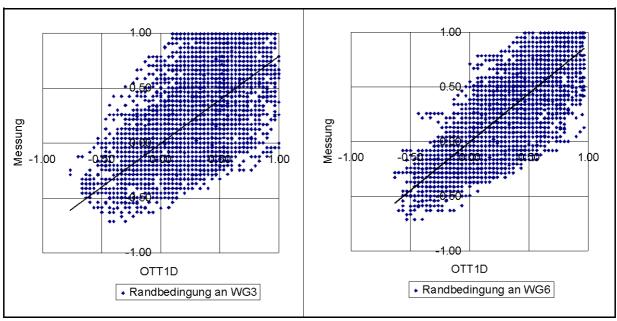


Abb. 15: Korrelation zwischen gemessenen und mit OTT-1D simulierten momentanen Auflaufhöhen. Links: Randbedingung an WG3, rechts: Randbedingung an WG6 (Test Nr. 1605001)

im Modelllauf WG3. Anhand der in den Diagrammen in Abbildung 15 eingefügten Trendlinien lässt sich ebenfalls die Güte der Ergebnisse vergleichen. Diese legen einmal dar, dass generell die Auflaufhöhen vom Modell OTT-1D unterschätzt werden. Zum anderen ist zu ersehen, dass bei Verwendung der Randbedingung an WG3 diese Unterschätzung größer ausfällt; die Steigung der Trendlinie ist hier geringer.

$$QSF = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{1}^{n} (Messwert - Prognosewert)^{2}}$$

Gleichung 3

Betrachtet man in Abbildung 16 die dort für den Modelllauf WG6 als (gemessene) Randbedingung vorgegebenen Wasserspiegelauslenkung (roter Verlauf) und zum anderen die an dieser Position vom Modellauf WG3 mit OTT-1D simulierten Werte (schwarzer Verlauf), fallen doch erheblich Abweichungen bezüglich der Phasenlage und Intensitäten der Auslenkungen auf. Im Gegensatz dazu liefert ein Modell auf Basis der Boussinesq-Gleichungen (BOUSS in Abb. 16) deutlich bessere Ergebnisse bezüglich der Wasserspiegelauslenkungen.

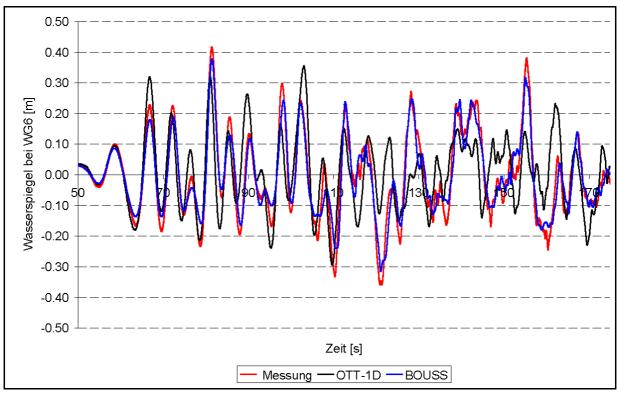


Abb. 16: Gemessene und simulierte Wasserspiegelauslenkungen an WG6 mit OTT-1D und einem Boussinesq-Modell (BOUSS) mit Randbedingung an WG3 (Test Nr.1605001)

Diese Abweichungen führen letztlich zu den deutlich verschlechterten Ergebnissen in den Wiedergabe der individuellen Wellenaufläufen (Abb. 15) beim Modellauf WG3. Ursächlich dafür ist die seewärtige Verschiebung der Randbedingung nach WG3 um ca. 25 m, was etwa einer Wellenlänge L entspricht. Die auf dieser Lauflänge auftretenden physikalischen Interaktionen von Wellenbestandteilen (Wellen-Wellen-Interaktionen) werden generell von Flachwassermodellen nicht wiedergegeben. Boussinesq-Modelle sind aufgrund der modellinhärenten Frequenzdispersion hierzu in der Lage. Bei Anwendung von Flachwasserwellenmodelle im Bereich seewärts der Brandungszone muss also ein physikalisch bedingter Fehler in Kauf genommen werden.

4.2.4.3 Vergleich der mittleren Überlaufraten

Schwerpunktmäßig sind die über den jeweiligen Versuchszeitraum gemessenen mittleren Überlaufraten untersucht worden. Die Versuchszeiträume hatten eine Länge von ca. 200 mal der jeweiligen Peakperiode, und waren damit ausreichend lang für eine zeitliche Mittelung der Überlaufvolumina.

4.2.4.3.1 Naturspektren

Für den Modellvergleich von gemessenen mittleren Überlaufraten sind 45 GWK-Versuche mit nachempfundenen Naturspektren herangezogen worden. Die gewählten Spektren der Versuche sind größtenteils an deutschen Wattenküstenabschnitten gemessen worden. Die Spektren bewegen sich bezüglich der Wellenhöhe H_{m0} im Bereich von 0,6 m < H_{m0} < 1,0 m und für die Peakperiode im Bereich 4,34 s < T_p < 12,68 s, wobei der Hauptanteil zwischen 4,6 und 6,4 s liegt. Die Randbedingungen sind als Zeitreihen direkt am Böschungsfuß (WG6) vorgegeben.

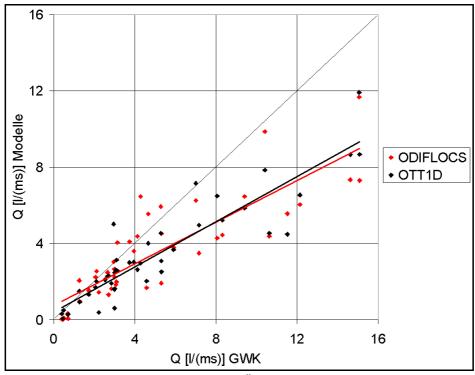


Abb. 17: Gemessene und berechnete Überlaufraten für Untersuchungen mit Naturspektren im GWK, Randbedingung am Böschungsfuß (WG6)

Die gemessenen und mit ODIFLOCS und OTT-1D simulierten Überlaufraten sind in Abbildung 17 aufgetragen, außerdem enthält das Diagramm noch eine Trendlinie für beide Modelle. Beide Modelle unterschätzen tendenziell die Überlaufraten, wobei das Modell ODIFLOCS mit einem etwas größeren absoluten und relativen mittleren Fehler abschneidet (Tab. 3). Der Korrelationskoeffizient R beträgt für das Modell OTT-1D R=0,91 für ODIFLOCS ist R= 0,85. Die bei beiden Modellen zu beobachtende tendenzielle Unterschätzung der Messergebnisse ergibt einen mittleren Fehler von etwa 30%.

	Absoluter Fehler	Relativer Fehler
OTT-1D	1,75 l /(sm)	34 %
ODIFLOCS	1,82 l /(sm)	38 %

Tab. 3: Mittlere absoluter und relativer Fehler der Überlaufrate der Modelle ODIFLOCS und OTT bei einer gemessenen mittleren Überlaufrate aller 45 Versuche von 0,83 l/(ms)

Das Gesamtergebnis des Modells OTT-1D ist bezüglich Fehlergröße, Trendlinie und Streuung besser als das von ODIFLOCS. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die benötigte Prozessorzeit (Rechenzeit) von ODIFLOCS um ca. das 10-fache im Vergleich zum Modell OTT-1D erhöht ist. Dies ist vor allem für die ingenieurtechnische Anwendung von Interesse.

4.2.4.3.1.1 Methodenvergleich

Zum Vergleich der erzielten Güte der Modellergebnisse ist eine empirische Formel für die mittlere Wellenüberlaufrate herangezogen worden. Die Ableitung einer solchen Formel ist aufgrund der im GWK zu erreichenden großskaligen Verhältnisse gerechtfertigt, da keine Maßstabseffekte zu erwarten sind. Schüttrumpf schlägt in OUMERACI et al. (2001) Gleichung 4 zur Berechnung der mittleren Überlaufrate Q [l/(ms)] vor, die mit Hilfe der Variablen b = 4,32 (für Wattenmeerspektren) bzw. b = 3,25 (für Spektren aus exponierten Küstenabschnitten) und Q_0 = 0,038 an die Messdaten der GWK-Versuche angepasst wurde. Es handelt sich hier also um ein spezifisch auf die Messdaten des GWK kalibriertes Berechnungsverfahren.

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{m0}^3} \cdot \xi_d \cdot Q_0 \cdot exp\left(-b \cdot \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \xi_d}\right) \cdot 10^3$$

(Oumeraci et al. 2001)

In Gleichung 4 steht R_c für den Freibord (Abstand vom Ruhewasserspiegel zur Deichkrone) und ξ_d für die Irribarren-Zahl (Brecherindex), bei der hier die mittlere Wellenperiode T_m berücksichtigt wird.

Die Ergebnisse der Formelberechnung bewegen sich bei einem Korrelationskoeffizienten von R=0,75 über- und unterhalb der Messwerte. Der mittlere absolute Fehler beträgt 1,84 l/(ms) der mittlere relative Fehler liegt bei 53%. Damit sind die mit der Formel erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den hier erreichten Ergebnissen mathematischer Modellierungen von etwas geringerer Qualität (Tab. 3).

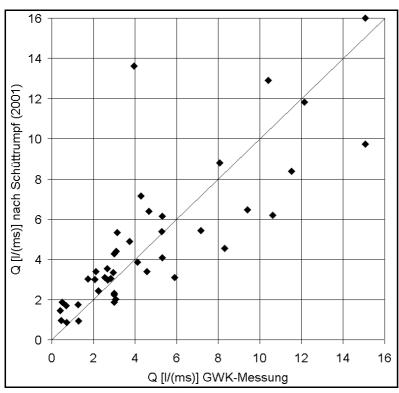


Abb. 18: Gemessene und mit der Formel von Schüttrumpf (in Oumeraci et al. 2001) berechneten mittleren Überlaufraten der GWK-Versuche mit natürlichen Spektren

4.2.4.3.1.2 Einfluß der Randbedingung am seeseitigen Modellrand

Um den Einfluß der Entfernung des offenen Randes vom Punkt des Wellenbrechens bezüglich der mittleren Überlaufrate zu untersuchen. ist das Modell OTT-1D für die oben beschriebenen Versuche mit unterschiedlichen großen Modellgebieten – bei Beibehaltung des ursprünglichen räumlichen Diskretisierungsschrittes Δx - betrieben worden. Zuerst sind die Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkungen der Stationen WG6 (Böschungsfuß), WG3 (Böschungsfuß+22,1 m) und Harfe Nr.6 (Böschungsfuß+ 44,1 m) verwendet worden (Abb. 6). In Abbildung 19 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe dargestellt.

OTT-1D unterschätzt tendenziell die Überlaufraten. Die Trendlinie zeigt, dass diese Unterschätzung mit zunehmendem Abstand des offenen Modellrandes vom Böschungsfuß zunimmt.

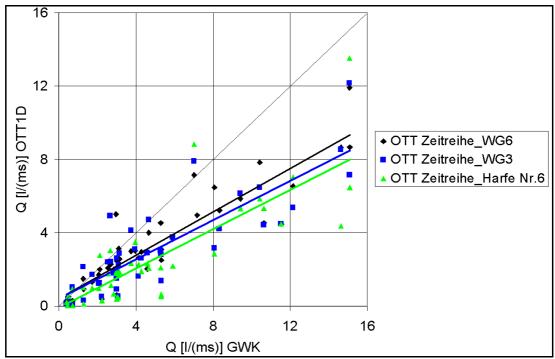


Abb. 19: Gemessene zu simulierten Überlaufraten (OTT-1D) bei Randwertvorgaben mittels Zeitreihen der gemesssenen Auslenkungen (Diagramm enthält Trendlinien)

In einer weiteren Versuchsreihe ist die Art der verwendeten Randbedingung geändert. So sind nicht direkt die Meßwerte, sondern die an der Messstelle WG3 ermittelten Spektren als Randbedingung vorgegeben worden. Der offene Rand liegt dabei einmal direkt am Böschungsfuß und weiterhin in einer Entfernung von jeweils einer und zwei Wellenlängen (1*L und 2*L) vom Böschungsfuß entfernt. Da die interne Generierung der Wasserspiegelauslenkungen – die nach wie vor als Randbedingung benötigt werden - im Modell OTT-1D zufällig erfolgt, sind die Modellläufe mit spektralen Randbedingungen jeweils drei Mal durchgeführt worden; das arithmetische Mittel für die drei Versuchsergebnisse spiegelt dies wider (Abb. 20).

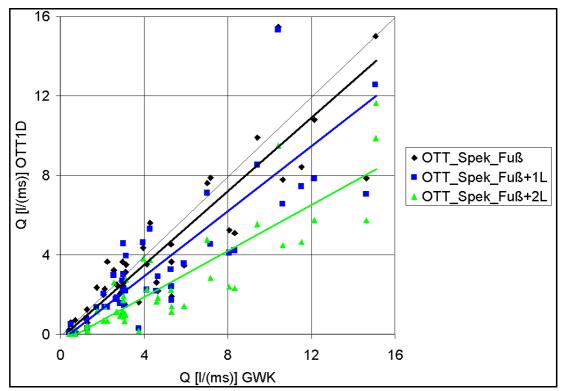


Abb. 20: Vergleich der simulierten Überlaufraten (OTT-1D) bei Randwertvorgaben über ein Spektrum (Diagramm enthält Trendlinien)

Sehr gute Ergebnisse werden bei Lage des offenen Modellrandes am Böschungsfuß erzielt. Wie bei Vorgabe der Wasserspiegelauslenkungen verschlechtert sich das durchschnittliche Berechnungsergebnis mit dem Abstand vom Böschungsfuß. Ebenso herrscht tendenziell eine Unterschätzung der Überlaufraten vor.

Tabelle 4 fasst die absoluten und relativen Fehler der Versuchsreihen zusammen. Bei Lage des offenen Modellrandes direkt am Böschungsfuß werden durchweg die besten Ergebnisse erzielt. Je weiter weg der Modellrand seewärts verschoben ist, desto größer werden die Fehler.

	Böschungsfuß absolut / relativ	1L bzw. WG3 absolut / relativ	2L bzw. Harfe Nr.6 absolut / relativ
Zeitreihe Auslenkungen	1,75 l/(sm) / 34 %	2,11 l/(sm) / 44 %	2,49 l/(sm) / 53 %
Spektrum	1,32 l/(sm) / 28 %	1,77 l/(sm) / 40 %	2,53 l/(sm) / 56 %

Tab. 4: Absoluter [I/(sm)] und relativer Fehler [%] der mit OTT-1D untersuchten Varianten bei Vorgabe verschiedener Randbedingungen

Zu beachten ist, dass die Fehler der letzten Spalte nicht direkt vergleichbar sind, da die Größe der Modellgebiete der Versuche "2L" bzw. "Harfe H2" stark unterschiedlich ist. Eine bessere allgemeine Vergleichbarkeit der relativen Fehler ist mit Abbildung 21 gegeben. Dort ist der relative Fehler aus Tabelle 4 als Funktion der Größe des Modellgebietes (in prozentualer Zunahme der Rechenknotenanzahl ausgehend vom kleinsten Modellgebiet) dargestellt.

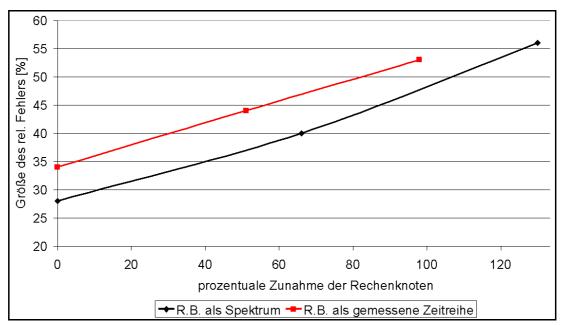


Abb. 21: Zunahme des relativen Fehlers bei Vergrößerung des Modellgebietes

Generell ist die Güte der Berechnungsergebnisse bei Verwendung eines Spektrums als Randbedingung besser als bei Verwendung der direkt gemessenen Wasserspiegelauslenkungen. Die Unterschätzungen der mittleren Überlaufraten ist kleiner (Abb. 19 u. 20).

Insofern kann als wesentliches Ergebnis des direkten Vergleichs der 2 Versuchsreihen festgehalten werden, dass die Güte der Berechnungsergebnisse für die mittleren Überlaufraten offensichtlich nicht durch die Vorgabe die Randbedingung als Ganglinie verbessert wird. Die detaillierten Vorgabe von gemessenen Wasserspiegelauslenkungen ist im Gesamtergebnis sogar schlechter, als die Einspeisung linearer Auslenkungen über eine spektrale Randbedingung. Diese Erkenntnis ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von im Rahmen des MAST-Projektes OPTICREST (DE ROUCK et al. 2002) durchgeführten ODIFLOCS-Untersuchungen. Bemerkenswert ist auch, dass dies auch für Versuche mit kleinen mittleren Überlaufraten von 0,21 – 2,0 l/(sm) gilt, bei denen ja nur eine kleine Anzahl von Wellenüberläufen registriert wird.

Offensichtlich werden durch die Fourier-Transformation der nichtlinearen Wasserspiegelauslenkungen in lineare (sinusförmige) Schwingungen die längeren Wellen mit entsprechenden Perioden gestärkt, dergestalt, dass sie nicht einer Frequenzdispersion durch Wellen-Wellen-Interaktionen unterworfen sind. Diese wird nämlich von OTT-1D nicht oder zumindest physikalisch nicht korrekt simuliert. Die Energie einer längeren Wellen bleibt daher auch in dieser erhalten, so dass im Vergleich mehr und vor allem intensivere Überlaufereignisse entstehen.

Bei der Vorgabe von Spektren als Randbedingung sind die vom Modell hervorgerufenen physikalischen Fehler in der Wiedergabe der Wellenabfolge an jeder gewählten Position des offenen Modellrandes gleich groß. Daher ist die bei vergrößerten Wellenlaufstrekken zu beobachtende Unterschätzung der Überlaufraten allein auf den Einfluss der modellinhärenten numerischen Dispersion zurückzuführen. Das numerische Modell OTT-1D verliert durch die numerische Dispersion an jedem Rechenknoten ein gewisses Quantum an Energie. Bei entsprechend mehr Rechenknoten - infolge des vergrößerten Modellgebietes bei konstanten räumlichen Diskretisierungsschritt Δx - ergibt sich daher auf die Wellenlauflänge gesehen ein relevanter Energieverlust, der in kleineren mittleren Überlaufraten resultiert. Das die numerische Dispersion in beiden Versuchsreihen gleich stark ist, erkennt man an den in etwa parallel verlaufenden Graphen in Abbildung 21, wo die prozentuale Zunahme der Rechenknoten des Modellgebietes mit dem relativen Fehler verknüpft wurde. Entscheidend ist hier nicht das Niveau des Fehlers, sondern dass die Zunahme des Fehlers mit in etwa gleicher Steigung erfolgt.

Festzuhalten ist, dass allein schon die numerische Dispersion eine Anwendung von OTT-1D über größere Wellenlaufstrecken verbietet. Andere physikalisch bedingte Fehler, wie die Abweichungen in der exakten Wiedergabe der Wasserspiegellagen (vgl. Abb. 16) sind bezüglich einer naturnahen Simulation der mittleren Überlaufraten als sekundär einzustufen.

4.2.4.3.2 Versuche mit TMA –Flachwasserspektren

Das TMA-Flachwasserspektrum ist ein standardisiertes Spektrum für Flachwasserverhältnisse. Es ist eine Ableitung des für Tiefwasser gültigen JONSWAP-Spektrums, wobei die lokale Wassertiefe als zusätzlicher Parameter in die Definition des TMA-Spektrums eingeht.

Eine Versuchsreihe mit TMA-Spektren ist im GWK gefahren worden. Sie wurde mit beiden 1D-Modellen untersucht. Da es sich um standardisierte Spektren handelt, war es nicht nötig die jeweilige Spektralform aus Wellendrahtmessungen abzuleiten, wie dies in den Versuchsreihe mit natürlichen Spektren erfolgt ist. Analog zu den Versuchen mit natürlichen Spektren (siehe oben) ist das Modellgebiet - vom Böschungsfuß ausgehend - um die einfache und die doppelte Wellenlänge (Fuß+L, Fuß+2L) des jeweiligen Versuches vergrößert worden. Analog zu den Versuchen mit natürlichen Spektren sind auch hier jeweils 3 Modellrechnungen durchgeführt worden, deren arithmetisches Mittel das Endergebnis bildet. Diese sind in Abbildung 22 für das Modell OTT-1D und in Abbildung 23 für das Modell ODIFLOCS aufgetragen.

Zu beachten ist, dass für die Teilversuchsreihe "Fuß" des Modells ODFILOCS durch numerische Instabilitäten nur 19 von 27 Versuchen in die Auswertung gelangten. Auch der Großteil dieser 19 Versuche musste vor dem Ende der Versuchslaufzeit wegen numerischer Instabilitäten abgebrochen werden, so dass nur ein Teil des Versuchszeitraumes ausgewertet werden konnte. Die Vorgabe der aus linearen Wellenzügen bestehenden Randbedingung direkt am Böschungsfuß ist für das Modell ODIFLOCS offenbar als äußerst ungünstig anzusehen. Die in Tabelle 5 aufgelisteten Fehler für diese Teilversuchsreihe sind entsprechend groß. Dabei sind Versuche ohne Überlauf unberücksichtigt geblieben.

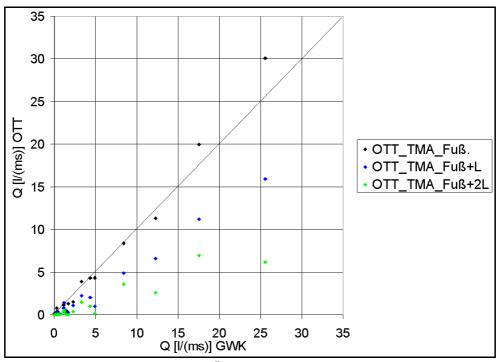


Abb. 22: Vergleich der simulierten Überlaufraten (OTT-1D) bei Randwertvorgaben über ein TMA-Spektrum

Das Modell OTT-1D zeigt prinzipiell die gleiche Tendenz der zunehmenden Unterschätzung mit Vergrößerung des Modellgebietes analog zu den Modellrechnungen mit natürlichen Spektren. Einige Ergebnisse der Teilversuchsreihe "Fuß" - der Modellrand liegt am Böschungsfuß - überschätzen sogar leichte die mittleren Überlaufraten. Insgesamt ist der relative Fehler dieser Teilversuchsreihe mit 27 % (vgl. Tab. 5) am kleinsten von allen mit den 1D-Modellen untersuchten Teilversuchsreihen.

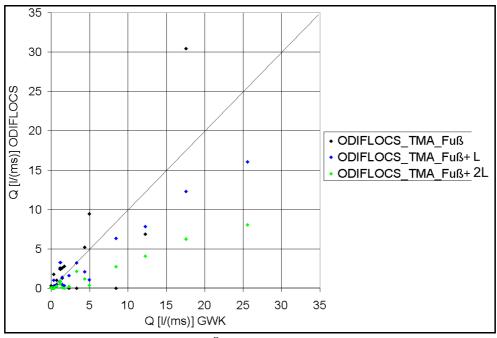


Abb. 23: Vergleich der simulierten Überlaufraten (ODIFLOCS) bei Randwertvorgaben über ein TMA-Spektrum

Entsprechend den oben geschilderten Problemen, fällt der Fehler der Teiluntersuchungsreihe "Fuß" des Modells ODIFLOCS sehr groß aus. Die Fehler der anderen Teiluntersuchungen sind mit denen von OTT-1D vergleichbar. Auch bei dem Modell ODIFLOCS ist eine Zunahme der Unterschätzungen bei vergrößertem Modellgebiet zu beobachten. Dies kann ebenso der im Modell ODIFLOCS inhärenten numerischen Dispersion zugesprochen werden.

	Böschungsfuß absolut / relativ	Fuß+L absolut / relativ	Fuß+2L absolut / relativ
			2,49 l/(sm) / 59 %
ODIFLOCS	2,34 l/(sm) / 87 %	1,40 l/(sm) / 49 %	2,43 l/(sm) / 59 %

Tab. 5: Mittlere absoluter und relativer Fehler der Überlaufrate der Modelle ODIFLOCS und OTT bei einer gemessenen mittleren Überlaufrate aller 26 TMA-Versuche von 3,38 l/(ms)

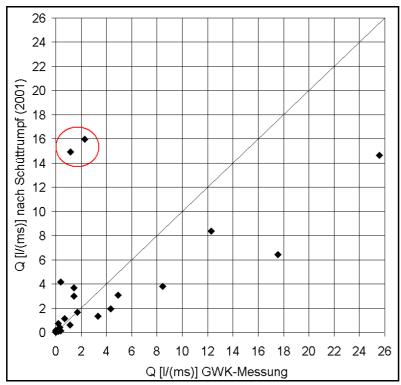


Abb. 24: Gemessene und mit der Formel von Schüttrumpf (2001) berechneten mittleren Überlaufraten der GWK-Versuche mit TMA-Spektren

4.2.4.3.3 Methodenvergleich

Analog zu der Versuchsreihe mit den Naturspektren ist auch hier Gleichung 4 zur Berechnung der mittleren Überlaufraten angewandt worden (Abb. 24).

Die Ergebnisse weisen eine deutliche Streuung aus, die sich quantitativ mit einem Korrelationskoeffizienten von R=0,57 widerspiegelt. Der mittlere absolute Fehler beträgt 2,85 l/(ms) mittlerer relative Fehler liegt aufgrund der beiden -in Abb. 24 besonders markierten- Ausreißer bei 200%. Die Abweichungen von den Messungen sind damit deutlich größer, als die der numerischen Modelle. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die zur

Berechnung nötigen Werte für die mittlere Wellenperiode T_m hier mit Hilfe eines festen Verhältnisses von T_p/T_m =1,04 (SCHÜTTRUMPF 2004) bestimmt worden sind, das bekanntermaßen aus sich heraus eine große Streuung erzeugt.

4.2.5 Bewertung der Ergebnisse der mathematischen 1D-Modellierung

Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass Modelle auf Grundlage der Flachwassergleichungen in der Lage sind, individuellen Auflaufereignisse zufrieden stellend wiederzugeben. Für das mathematische Kanalmodell OTT-1D ergab sich eine signifikante Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von R = 0,81 zwischen gemessenen und berechneten momentanen Auflaufhöhen bei Vorgabe der Randbedingung am Bauwerksfuß. Somit darf als erwiesen angesehen werden, dass die horizontale Impuls- und Massener-

haltung die vorherrschenden physikalischen Prozesse zur Beschreibung des Wellenauflaufs auf Böschungen sind. Von daher ist die grundsätzliche Eignung dieser Modelle für praktische Anwendungen als gegeben anzusehen.

Die für die Bemessung von Deichen ebenfalls bedeutende Größe der mittleren Überlaufrate ergibt sich aus einer Vielzahl von Wellenauflaufereignissen mit einer zumeist anteiligen kleineren Zahl einzelnen Wellenüberläufe. Ein bemerkenswertes Ergebnis der Untersuchungen ist, dass zur Berechnung der mittleren Überlaufrate die Kenntnis der zum Teil stark nichtlinearen Wasseroberfläche vor dem Deich und damit der einzelnen Wellenauflaufereignisse nicht erforderlich ist, was an der vergleichbaren Qualität der Berechnungsergebnisse sowohl mit Spektren als auch mit unmittelbaren Wasserspiegelauslenkungen als Randbedingungen deutlich wird.

Eine vorgegebene Schwäche der untersuchten Modelle ist, dass sie die nichtlinearen Wechselwirkungen vor dem Wellenbrechen nicht reproduzieren können. Daher entstehen aus der Verwendung von linearen Wasserspiegelauslenkungen aus einem Spektrum als Randbedingung keine Nachteile. Von der direkten -physikalisch unzulänglichen-Transformation der linearen Auslenkungen bis zum Wellenbrechpunkt bleiben die über den Versuchszeitraum zeitlich gemittelten Größen offensichtlich hinreichend unbeeinträchtigt. Da auch die nichtlineare Auslenkungen auf ihrer Lauflänge bis zum Brechpunkt unzureichend reproduziert werden, ist es nicht zwingend von Vorteil derartige Randbedingung zu verwenden. Das gleiche Ergebnis haben auch DE ROUCK et al. (2002) im Rahmen des OPTICREST Projektes erzielt.

Diese Erkenntnis ist für die Deichbemessung von erheblicher Bedeutung, da hierfür praktisch nie eine bemessungsrelevante Zeitreihe von Wasserspiegelauslenkungen verfügbar sein wird. Die Modelle können daher mit modellierten Spektren für das anzuwendende Bemessungsszenario betrieben werden. Zwingende Voraussetzung ist, dass diese Spektren annähernd in derselben Wassertiefe bestimmt werden, die der Tiefenlage des Bauwerksfußes, also dem seeseitigen Modellrand, entspricht. Dazu bietet sich auf analytischem Wege ein TMA-Spektrum oder das entsprechende Spektrum eines voll-spektralen Wellenenergiemodells wie SWAN an. Letzteres kann dabei von Vorteil sein, da SWAN auch die im untersuchten Bereich auftretenen multi-spektrale Strukturen reproduzieren kann (NIEMEYER & KAISER 2001). Auf die aus physikalischer Sicht erforderlich erscheinende Zwischenschaltung eines phasenauflösenden Wellenmodells, welches die nichtlinearen Transformationen im Übergangs- und Flachwasserbereich simuliert, kann daher verzichtet werden.

Die hier gemachten Untersuchungen zusammen mit den Erkenntnissen von VAN GENT und DOORN (2001) legen den Schluss nahe, dass die Qualität des Spektrums, das zur Randwerteingabe verwendet wird, direkt die Qualität der Berechnungsergebnisse beeinflusst. Die genannten Autoren untersuchten eine komplexe Strandgeometrie mit einer vorgelagerten Barre an der starkes Wellenbrechen stattfand. In diesem Fall konnte das Energiespektrum hinter der Barre vom Wellenenergiemodell SWAN (Version 30.75) nicht korrekt wiedergegeben werden; der Vergleich mit Wellenauflaufmessungen fiel daher schlechter aus, als mit den Randwerten aus gemessenen Wasserspiegelauslenkungen. Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes verwenden jedoch aus Messungen abgeleitete Spektren bzw. standardisierte Spektren mit denen gleich- und höherwertigere Ergebnisse im Vergleich zur Vorgabe der Wasserspiegelauslenkungen erzielt werden konnten. Nicht die Randwerteingabe mittels Spektren an sich führt also zu schlechteren Modellergebnissen; entscheidend ist die Güte der spektralen Randbedingung.

Es zeigt sich, dass die mathematischen Modelle die mittleren Überlaufraten tendenziell unterschätzen, die relative Abweichung liegt bei etwa 30 %, wenn der Modellrand in der Nähe des Wellenbrechpunktes liegt. In der Praxis kann dies annähernd zumeist mit dem Fußpunkt des Deiches bzw. eines Bauwerks gleichgesetzt werden. Der Hauptanteil der Unterschätzung ist aber weniger physikalischen Defiziten zuzuschreiben als der modellinhärenten numerischen Dispersion. Dieser Effekt wäre mit der Implementierung numerischer Schemata höherer Ordnung deutlich abzuschwächen. Eine diesbezügliche Weiterentwicklung der Modelle ist allerdings nicht absehbar. Wahrscheinlicher Grund dafür wird sein, dass bei Einführung von Schemata höherer Ordnung auch die Stabilität der numerischen Berechnung leiden würde. Eine Anwendung der Modelle im jetzigen Entwicklungszustand erfordert wegen der numerischen Dispersion den Verzicht auf längere Wellenanlaufstrecken zum Bauwerk.

Der Vergleich mit einer -aus den Daten hydraulischen Modellversuchen selbst abgeleiteten- empirischen Berechnungsformel macht deutlich, dass die Anwendung numerischen Modelle eine Verbesserung hinsichtlich der Berechnung von mittleren Überlaufraten darstellt. Insbesondere die bei den Modellen zu verzeichnende tendenzielle Unterschätzung der Überlaufraten macht es möglich einen Korrekturfaktor dafür zu benennen, während bei den Formelergebnissen sowohl Über- als auch Unterschätzungen der Messergebnisse auftreten. Eine Berücksichtigung des tendenziellen Modellfehlers wird die Prognosefähigkeit der Modelle deutlich verbessern. Ein weiterer entscheidender Vorteil der numerischen Modelle ist die Unabhängigkeit von empirischen Koeffizienten, wie sie in allen Formelausdrücken auftreten.

Die mit mehreren Messdatensätzen durchgeführten Modellvergleiche zwischen OTT-1D und ODIFLOCS zeigten, dass das Modell OTT-1D zumindest für den ingenieurmäßigen Einsatz dem Modell ODIFLOCS vorzuziehen ist. Gründe hierfür sind:

- Das Modell OTT-1D ist numerisch stabiler. Stabilität bei ODIFLOCS lässt sich in den meisten Fällen durch eine geeignete Parameterwahl (minimale Schichtdicke, Rauhigkeitsbeiwert) verbessern. Diese stimmen allerdings nicht immer mit den physikalischen Randbedingung überein.
- ODIFLOCS benötigt etwa die zehnfache Rechenzeit von OTT-1D.
- ODIFLOCS wird bei einigen Randbedingungen instabil, ohne dass dafür durchgängig Kriterien erkennbar sind..
- Die Ergebnisse des mit Standardeinstellungen angewandten Modells OTT-1D sind qualitativ besser als die mit ODIFLOCS erzielten.
- Das Modell OTT-1D ist in der Lage, die Wellengeneration in Lee von vorgelagerten Bauwerken wie Unterwasser-Wellenbrecher zu simulieren.

4.3 2D-Modelluntersuchungen

Im Rahmen des KfKI-Projektes "Schräger Wellenangriff auf Deiche" wurden Untersuchungen im Wellenbecken des Franzius-Institutes, Hannover durchgeführt. Einige Versuchsdatensätze wurden im Herbst 2003 zur Verfügung gestellt.

4.3.1 Versuche im Wellenbecken

Das Wellenbecken hat eine Größe von 23 m x 45 m worin sich ein drehbar gelagerter dreidimensionaler Modelldeich befindet, an dem der Wellenauflauf mittels analoger und digitaler Wellenauflaufpegel gemessen werden kann. Auf der Deichböschung befinden sich 9 analoge Wellenpegel (auf der Sohle angebrachte Wellendrähte – WAP1- WAP9), sowie 4 digitale Wellenpegel des Leichtweiß-Institutes (LWI1 – LWI4) (Abb. 25). Da die Qualität der digitalen Wellenpegel besser ist (Ohle, pers. Kommunikation) werden folgend nur diese als Messgrößen herangezogen. Eine Messung der Überlaufereignisse bzw. -raten ist nicht vorgenommen worden. Für den 2-dimensionalen Fall können also lediglich die Wellenauflaufereignisse verglichen werden.

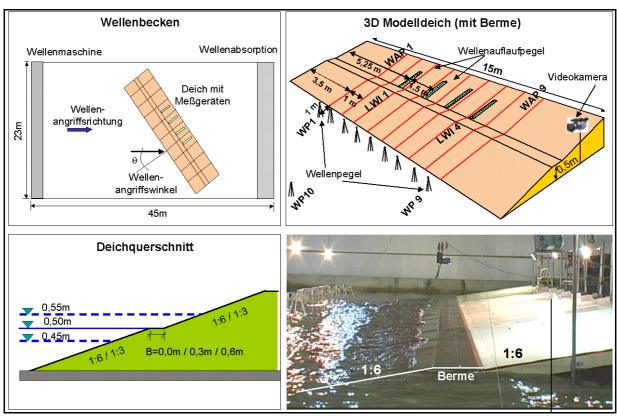


Abb. 25: Prinzipskizzen der Auflaufmessungen im Wellenbecken (Quelle: Franzius-Institut, Hannover)

Am linken Rand des Beckens befindet sich die Wellenmaschine, am rechten Rand ist eine Steinschüttung als Wellenabsorber eingebaut. Die Böschungsneigung des Modelldeiches beträgt wahlweise 1:6 oder 1:3, die in der Mitte der Böschung vorhandene Berme hat eine variable Breite von 0 cm, 30 cm oder 60 cm. In einem Abstand von 1 m vom Böschungsfuß befinden sich 9 Wellenpegel (WP1 – WP9), die sich bei Vorgabe eines schrägen Wellenagriffs mit dem 3D Modelldeich mitdrehen. Der Drehpunkt befindet sich ungefähr in der Mitte des Modelldeiches (Abb. 26).

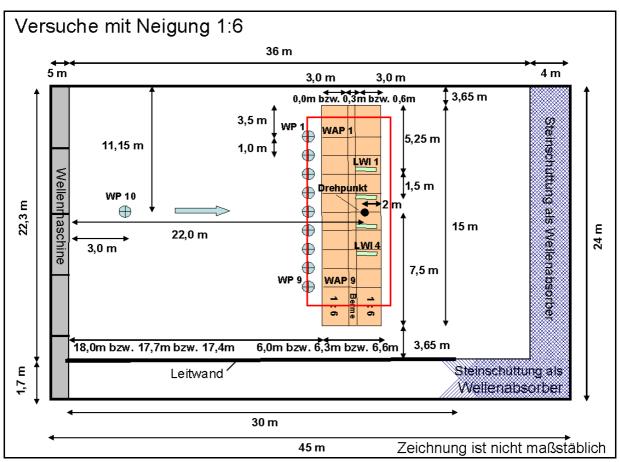


Abb. 26: Horizontale Abmessungen des Wellenbeckens (Quelle: Franzius-Institut, Hannover) mit Modellgebietsberandung (rot).

4.3.2 Das Modell OTT-2D

OTT-2D ist ein 2-dimensionales Phasen auflösendes Modell auf Basis der Flachwassergleichungen. Es wird empfohlen das Modell für die innere Brandungszone (nachdem die Wellen gebrochen sind) und die Wellenauflaufzone anzuwenden. Typischerweise wird das Modell für die innere Brandungszone angewandt, die Simulation von nicht gebrochenen Wellen ist möglich, allerdings gelten hier dieselben einschränkenden Aussagen wie für die eindimensionalen Modelle (vgl. Abschnitt 2.1.1). Es simuliert die momentanen Änderungen der Wasserspiegellage und die (tiefengemittelten) Komponenten der Strömungsgeschwindigkeiten in den zwei horizontalen Dimensionen. Es wird daher auch als 2DH-Modell bezeichnet. Aus der Fähigkeit auch sehr geringe Wassertiefen (bis ca. 1 mm) zu simulieren, ergibt sich die Darstellung der momentanen Wasserlinie, also auch des schrägen Wellenauflaufs. Dabei kann OTT-2D eine adaptive Gitterverfeinerung vornehmen, eine Methode mit der im Bereich der Wellenauflaufzunge automatisch feinere räumliche Auflösungen Δx , Δy berechnet werden als im übrigen Modellgebiet.

Generell ist das Modell - wie auch die eindimensionale Version OTT-1D - in der Lage, Überströmungsraten und die Generation von Wellen in Lee des überströmten Bauwerks durch das überströmende Wasser zu simulieren. Da dies in den physikalischen Versuchen jedoch nicht gemessen wurde, ist von diesen Fähigkeiten des Modells hier kein Gebrauch gemacht worden.

OTT-2D kann als ein mathematisches Wellenbecken angesehen werden. Das bedeutet, dass alle Beschreibungen eines physikalischen Wellenbeckens ebenfalls für die Eingaben in das Modell notwendig sind. Dies betrifft die Geometrie des Beckens, die Lage der Randbedingungen des offenen Modellrandes, die Lage und die Eigenschaften der Modellränder. Als Nachteil ist diesbezüglich bei dem Modell OTT-2D zu sehen, dass die Vorgabe einer Randbedingung – etwa in Form von Wasserspiegelauslenkungen – nicht mit einer absorbierenden Randbedingung verknüpft werden kann. So werden von der Böschung reflektierte Anteile nicht am offenen, linken Modellrand absorbiert; dies stellt eine Fehlerquelle dar, wenn die im Becken gemessenen Auslenkungen keine reflektierten Anteile beinhaltet.¹

Der Betrieb von OTT-2D verlangt weitaus größere Rechnerressourcen, als die Anwendung der 1D-Modelle. Benötigt beispielsweise ein 1D-Modelllauf mit 400 Knoten 1 Minute, steigt die Rechenzeit mit einem 2D-Modell von 400 x 400 Knoten entsprechend auf mindestens 400 Minuten an. Darüber hinaus wird zusätzlich eine weitere horizontale Impulserhaltungsgleichung gelöst, was weitere Ressourcen benötigt. Eine gewisse Verringerung ergibt sich aus der Möglichkeit der adaptiven Gitterverfeinerung. Diese macht es in manchen Fällen nicht nötig, das gesamte Gebiet mit einer hohen räumlichen Auflösung zu versehen. Die Einsparung in der Rechenzeit, die durch adaptive Gitterverfeinerung erzielt werden kann, liegt ungefähr bei 70 %. Bei entsprechender Planung der Rechenzeitausnutzung z.B. mittels Stapelverarbeitungen während der Nacht, ist eine Anwendung von OTT-2D auf modernen PCs durchaus möglich und sinnvoll.

4.3.3 Ausbildung des mathematischen Wellenbeckens

Die Abbildung des physikalischen Wellenbeckens im numerischen Modell erfolgte für das in Abbildung 26 rot umrahmte Modellgebiet, welches hier für den Angriffswinkel von Θ = 0° (senkrechter Wellenangriff) dargestellt ist. Die Wasserspiegelauslenkungen der Wellenpegel WP1-WP9 sind direkt als Randwerte für den offenen Modellrand verwendet worden. Allerdings weist das Modell OTT-2D bezüglich der direkten Eingabe von Wasserspiegelauslenkungen als Randwerte zwei Schwachpunkte auf. Zum einen ist es nicht möglich, eine über den offenen Modellrand differenzierte Eingabe zu machen, und außerdem ist die Vorgabe eines Einlaufwinkels nicht möglich. Das hat zur Folge, dass lediglich der Wellenpegel WP1 zur Randwerteingabe verwendet werden kann. Durch die Drehung gegen den Uhrzeigersinn um den in Abbildung 26 eingezeichneten Drehpunkt, ist WP1 bei Versuchen mit einem Einlaufwinkel Θ > 0° immer der dem Wellenpaddel am nächsten gelegene Wellenpegel. Sein Signal kann unter der Annahme von 1-dimensionalen Bedingungen – das Wellenpaddel bewegt sich ja konstant über die Beckenbreite – auf den gesamten Modellrand übertragen werden. Die genannte Vorgehensweise birgt jedoch zwei Nachteile in sich:

- Die Lauflänge der Wellen vom Modellrand bis zum Brechpunkt ist groß. Sie beträgt bei Experimenten mit einem Angriffswinkel Θ = 0° ungefähr 4 m.
- Die Lauflänge der Wellen vom Modellrand zum Brechpunkt bei Experimenten mit einem Angriffswinkel Θ > 0° nimmt von oberen Modellrand (vgl. Abb. 26) (ca. 4 m) zum südlichen Modellrand noch entsprechend zu (ca. 9 m bei Θ = 40°).

¹ Die Implementierung einer solchen Randbedingung ist von HR Wallingford vorgesehen. In der verwendeten Version ist diese jedoch noch nicht fehlerfrei realisiert.

-

Die verwendete räumliche Auflösung des Berechnungsgitters beträgt in beide Koordinatenrichtungen Δx = Δy = 6 cm. Es ist von der adaptiven Gitterverfeinerung des Modells OTT-2D mit einem Faktor 2 Gebrauch gemacht worden, so dass die Auflösung der Wellenauflaufzunge 3 cm beträgt, was bei einer Böschungsneigung von 1:6 diskret simulierten Auflaufhöhen von 0,5 cm entspricht. Die vom Modell berechnete minimale Wassertiefe unterhalb der eine Zelle als trocken angesehen wird ist zu Δ = 0,001mm gesetzt. Die Rauhigkeitsbeiwert ist konstant auf f_w = 0,01 gesetzt, was einer sehr glatten Deichböschung entspricht. Dieser Wert ist eine Schätzung. Der Modelldeich ist aus glatten, bestrichenen Schalungsplatten konstruiert, für deren Rauhigkeitsbeiwert bzw. der äquivalenten Sandrauheit vom Franzius-Institut keine exakten Angaben gemacht wurden.

4.3.4 Modelluntersuchungen

Es wurden 2 Testläufe von je 1500 s simuliert. In Tabelle 6 sind die am Wellenpegel WP 10 (Abb. 26) ermittelten Parameter der eingesteuerten TMA-Spektren aufgeführt. Bis auf den Angriffswinkel (Drehung des Modelldeiches) sind die beiden untersuchten Versuchsläufe identisch.

Nr.	H _{m0}	T_n	Angriffswinkel Θ
1	10 cm	2,7 s	0°
2	10 cm	2,7 s	40°

Tab. 6: Parameter der eingesteuerten TMA-Spektren

In beiden Versuchen beträgt die Böschungsneigung in beiden Abschnitten des Modelldeiches 1:6 und die Bermenbreite 30 cm. Abbildung 27 zeigt exemplarisch ein Teil des Modellgebietes mit dem Wellenfeld vor der Böschung und einem Auflaufereignis bei einem Angriffswinkel von 40°.

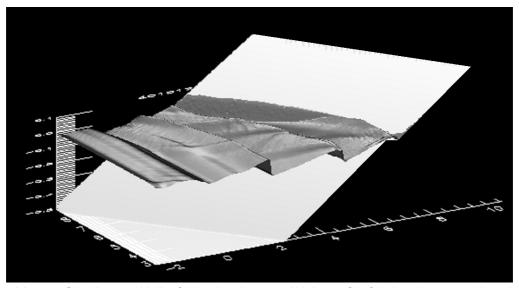


Abb. 27: Simuliertes Wellenfeld mit schrägem Wellenauflauf bei t=147,5 s während Versuch Nr. 2

4.3.4.1 Vergleich mit gemessenen Auflaufhöhen

4.3.4.1.1 Versuch 1 - Angriffswinkel 0°

Abbildung 28 zeigt die am digitalen Auflaufpegel LWI2 gemessenen und die mit OTT-2D berechneten Auflaufhöhen für den Versuch Nr.1. Während im Zeitintervall von 200-250 s noch die Auflaufhöhen von 3 Auflaufereignissen vom Modell sehr gut wiedergegeben werden, können in dem längeren Zeitintervall der Modellzeit von 500-600 s nur noch ge-

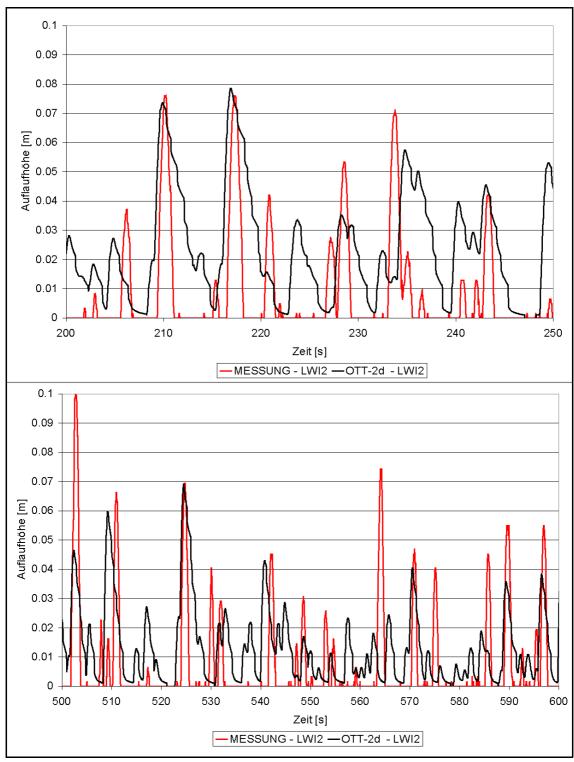


Abb. 28: Zeitreihen der gemessenen und berechneten Auflaufhöhen des digitalen Pegels LWI 2. Oben: Zeit von 200 s - 250 s, unten: Zeit von 500 s - 600 s

legentlich Übereinstimmungen von gemessenen und berechneten Auflaufereignissen beobachtet werden. Die anderen weisen deutliche zeitliche und größenmäßige Abweichungen auf. Es ist auch zu beobachten, dass generell die Verweilzeit der Auflaufzunge auf der Böschung vom Modell als zu lang simuliert wird. Der Pegel LWI2 fällt in der Messung schneller trocken, die Auslaufspitzen sind entsprechend steiler als die simulierten. Dies ist einerseits eine Folge der mit 1 mm als sehr geringmächtig angegebenen minimale Wassertiefe, die im Modell noch als Wellenzunge angesehen werden soll, andererseits auch in der Trockenfall-Prozedur des Modells begründet, die vor allem den Abfluss von geringmächtigen Wasserschichten verzögert.

Eine statistische Auswertung der gemessenen und simulierten Auflaufhöhen ist in Abbildung 29 zu sehen. Die Werte für die gemessenen Auflaufhöhen sind als Mittelwert aller vier LWI-Meßwerte gebildet. Zum Vergleich sind auch zwei Simulationen mit dem eindimensionalen Modell OTT-1D durchgeführt worden. Modellgebiet und räumliche Auflösung waren dabei identisch zu der 2-dimensionalen Simulation. Dabei ist der Rauhigkeitsbeiwert f_w einmal mit demselben Wert wie in der 2D-Simulation (f_w =0,01) angesetzt worden, ein weiteres Mal ist mit f_w = 0,05 eine höherer Reibungswirkung gewählt.

Die Anzahl der Auflaufereignisse nimmt bei den Messungen in Richtung der hohen Auflaufhöhen stark ab. Maximale Auflaufhöhen von 14-15 cm werden nur bei 2 Ereignissen erreicht. Die Simulation mit dem 2-dimensionalen Modell erreicht nur Auflaufhöhen der Klasse 12-13 cm. Von den hohen Auflaufereignissen im Bereich von 10-14 cm werden vom OTT-2D deutlich weniger wiedergegeben, dafür werden bei den geringeren Auflaufhöhen in der 2D-Simulation mehr gezählt.

Der Vergleich mit dem 1D-Modell zeigt, dass bei physikalisch gleicher Reibungswirkung (f_w=0,01) erheblich mehr hohe Ereignisse festgestellt werden können. Die Anzahl der

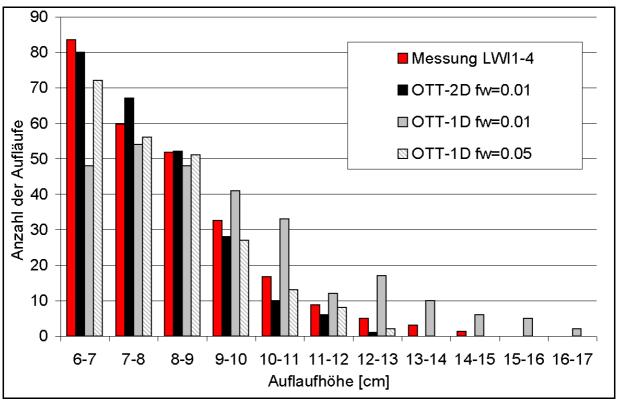


Abb. 29: Verteilung der klassierten Häufigkeiten der gemessenen (Durchschnitt von LWI1 – LWI4) und der mit OTT-2D und OTT-1D berechneten Auflaufhöhen

hohen Auflaufereignisse liegt sogar deutlich über denen der Messung. Daraus kann geschlossen werden, dass der angenommene Rauhigkeitsbeiwert von f_w = 0,01 deutlich zu gering für das Modell OTT-1D ist. Bei einer Erhöhung auf f_w =0,05 konnten in etwa so viele hohe Auflaufereignisse ausgewertet werden wie in der 2D-Simulation mit f_w =0,01. Das Optimum für OTT-1D liegt offensichtlich zwischen 0,01< f_w <0,05.

Da OTT-2D hier ebenfalls mit einem Rauhigkeitsbeiwert f_w =0,01 arbeitet, weist darauf hin, dass die interne numerische Dispersion deutlich höher ist, als in OTT-1D. Da die Rauhigkeitserhöhung denselben Effekt hat wie die höhere numerische Dispersion in OTT-2D, kann ein für OTT-1D gewählter Rauhigkeitsbeiwert nicht direkt für zweidimensionale Simulationen übernommen werden. Die mit OTT-2D erzielte Verteilung der Auflaufhöhen kann trotz der dispersionsbedingten Unterschätzungen als gut bezeichnet werden.

4.3.4.1.2 Versuch 2 – Angriffswinkel 40°

Gemessene und simulierte Wellenaufläufe an den Pegeln LWI1 und LWI2 für ein Zeitintervall des Versuchs Nr. 2 von 50 s sind in Abbildung 30 dargestellt. Sehr schön zeigen die Messungen den durch den schrägen Wellenauflauf bedingten zeitlichen Versatz zwischen den beiden Pegeln. Dieser Versatz ist auch im numerischen Modell zu beobachten. Noch größer als bei senkrechtem Auflauf sind bei diesem Versuch die Abweichungen des Modells in der Wiedergabe der individuellen Auflaufereignisse, sei es bezüglich der Zeitachse oder der Intensität. Nur schwer sind überhaupt Übereinstimmungen auszumachen. Als positiv ist immerhin zu bewerten, dass sich gemessene wie berechnete maximale Auflaufhöhen in ihrer Intensität ähnlich sind.

Es fällt weiterhin auf, dass das Modell das Trockenfallen der Pegel mit einem erheblichen Zeitversatz simuliert. Die Pegel im Modell fallen praktisch nie ganz trocken, das

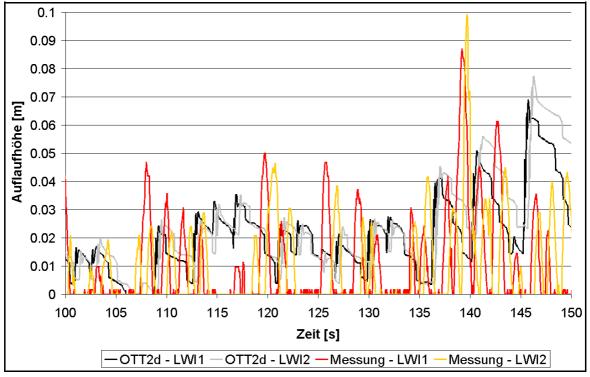


Abb. 30: Vergleich von gemessenen und simulierten Auflaufhöhen bei Versuch Nr. 2 (40° Angriffswinkel) an LWI1 und LWI2

Wasser an den entsprechenden Rechenknoten läuft nur sehr langsam ab. Dieser Effekt ist modellinhärent und liegt möglicherweise an den nun schräg zur Gitterausrichtung strömenden Wassermassen, was die Trockenfall-Prozedur des numerischen Schemas ungünstig zu beeinflussen scheint. Dieser Modellfehler ist auch in Abbildung 27 zu sehen, die dunkelgraue Fläche auf der linken Seite des Modelldeiches ist ein solcher langsam ablaufender sehr dünner Wasserfilm. Auch eine Variation der Modellparameter, der minimalen Wassertiefe und des Rauhigkeitsbeiwertes konnten diesen Fehler nicht beseitigen.

Die Diagramme in Abbildung 31 zeigen die klassierten Häufigkeiten der gemessenen und berechneten Maxima der Auflaufhöhen einzeln für alle digitalen Auflaufpegel LWI 1-4.

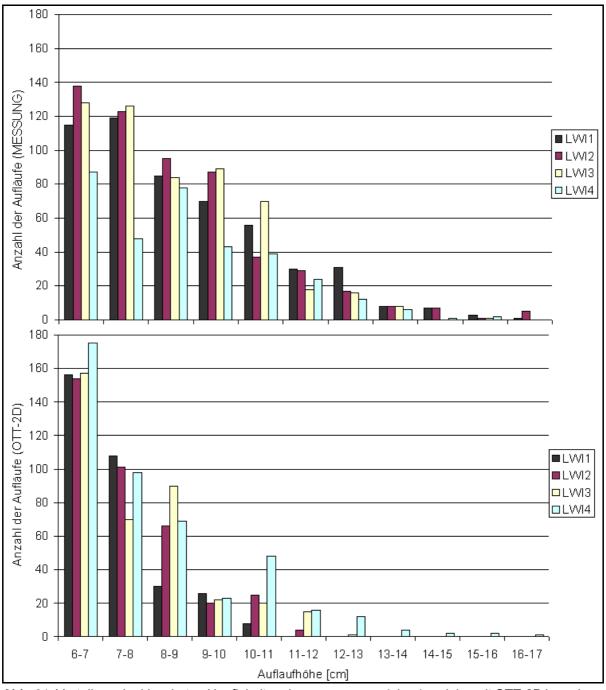


Abb. **31**: Verteilung der klassierten Häufigkeiten der gemessenen (oben) und der mit OTT-2D berechneten Auflaufhöhen (unten)

Die Identifikation eines Auflaufereignisses aus den jeweiligen mit 20 Hz vorliegenden Datensätzen ist für Mess- und Simulationsdaten mit demselben Verfahren durchgeführt worden. Da OTT-2D einen verzögerten Abfluss des Wassers simuliert, konnten einige, meist kleinere Auflaufspitzen in den Simulationsdaten nicht identifiziert werden. Auch bei der Konstruktion des Modelldeiches im Wellenbecken muss mit einer vertikalen Maßtoleranz von ca. 1 cm zwischen den einzelnen digitalen Pegeln gerechnet werden (Ohle, pers. Kommunikation), weshalb auch in den Messungen Abweichungen dieser Größenordnung hinzunehmen sind.

Trotz der genannten Unschärfen zeigt der Vergleich von gemessenen (Abb. 31, oben) zu den simulierten Häufigkeiten (Abb. 31, unten) ähnliche Ergebnisse wie in Versuch Nr. 1 bei senkrechtem Wellenangriff. Die Anzahl höherer Auflaufereignisse wird zugunsten niedrigerer Auflaufereignisse von OTT-2D unterschätzt. Dieser Trend ist hier allerdings etwas größer als bei Versuch Nr. 1. Aufgrund des größeren Modellgebietes im Versuch Nr. 2 ist der Energieverlust durch die numerische Dispersion größer, außerdem verläuft der Großteil der simulierten Strömungsrichtungen transversal zu den Gitterzellen des Rechengitters, was die numerische Dispersion zusätzlich erhöht.

Die grundsätzlichen Charakteristiken des Auflaufverhaltens konnte von OTT-2D wiedergegeben werden, allerdings bei einer recht großen dispersionsbedingten Unterschätzung. Dies berechtigt zur Annahme, dass OTT-2D bedingt für Simulationen von Aufund Überlaufhäufigkeiten verwendet werden kann, in denen es auf absolute Auflaufhöhen ankommt. Flankierend sollten dann Untersuchungen mit 1D-Modellen durchgeführt werden, um den OTT-2D Modellfehler über das besser validierte Modell OTT-1D quantifizieren zu können. Wie bei Versuch Nr. 1 kann beispielsweise zuerst eine Paralleluntersuchung mit beiden Modellen für senkrechten Wellenangriff durchgeführt werden, um anschließend im Vergleich schrägen Auflauf mit OTT-2D zu untersuchen. Variantenuntersuchungen, in denen es auf den relativen Unterschied von Entwurfsalternativen ankommt, sind mit OTT-2D trotz genannter Schwierigkeiten ohne Einschränkungen durchführbar.

Weitere direkte Vergleiche von gemessenen und mit OTT-2D simulierten Auflaufhöhen versprachen aufgrund der genannten Schwierigkeiten mit der Randwerteingabe und dem dargelegten Modellverhalten keine weiteren Erkenntnisse.

4.3.5 Bewertung der 2D-Modellergebnisse

Eine Naturähnlichkeit –hier als eine vergleichbare Wiedergabe von individuellen Auflaufereignissen verstanden- des zweidimensionalen Modells konnte in den dargestellten Versuchen nur bedingt nachgewiesen werden. Vor allem bei schrägem Wellenangriff sind die Ergebnisse von einer naturnahen Wiedergabe der individuellen Auflaufereignisse recht weit entfernt.

Ein entscheidender Grund hierfür ist, dass die Wellenlaufwege zwischen Randbedingung und Wellenbrechpunkt bei der oben beschriebenen Versuchsanordnung zu lang sind. Die Transformation auf dieser Strecke durch Wellen-Wellen-Wechselwirkungen kann mit den Flachwassergleichungen nicht korrekt wiedergegeben werden, was insbesondere für den unteren Modellgebietsabschnitt bei Versuch Nr. 2 gilt. Durch die Drehung des physikalischen Modelldeiches, bei gleichzeitiger Beibehaltung des westlichen Modellrandes in der Höhe des Pegels WP1 ist die Randbedingung in Höhe der Pegels LWI1 und LWI2 entsprechend weiter weg vom Wellenbrechpunkt als in den Versuchen

mit einem senkrechten Angriffswinkel. Demzufolge weist der unmittelbare Vergleich der Auflaufereignisse vom mathematischen mit denen des physikalischen Modells bei schrägem Wellenauflauf geringere Übereinstimmung auf als als bei senkrechtem Angriffswinkel.

Die physikalischen Versuche im Wellenbecken waren nicht auf die Verwendung im Rahmen einer Simulation mit OTT-2D abgestimmt; es ist beim Entwurf der Versuchsanordnungen des Vorhabens "Schräger Wellenangriff auf Deiche" auch nicht eingeplant worden. Andererseits ist das Modell OTT-2D bezüglich der Randwerteingabemöglichkeiten noch stark verbesserungswürdig, um mehr Flexibilität zu ermöglichen. Die Möglichkeit einer differenzierten Randwerteingabe über den offenen Rand hätte eine Drehung des Modellgebietes und damit auch die Verwendung aller Wellenpegel zur Randwerteingabe erlaubt.

Das Trockenfallen bei senkrechtem und schrägem Wellenangriff konnte nicht hinreichend genau simuliert werden; ein typischer Fehler bei 2D-Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen. Bei der Berechnung von Überlaufraten würde sich dieser Fehler allerdings nicht bemerkbar machen, da mit den "feuchten" Knoten keine Geschwindigkeiten und somit auch keine Durchflüsse verknüpft sind. Trotzdem erkennt man an diesen Modellfehlern, dass OTT-2D im Vergleich zu OTT-1D ein jüngeres, weitaus weniger getestetes Modell ist.

Positiv ist die Beobachtung des gleich großen Zeitversatzes von gemessenen und simulierten Auflaufspitzen bei schrägem Wellenauflauf zwischen den Pegeln LWI1 und LWI2 zu werten. Die simulierten Häufigkeiten der Auflaufhöhen berechtigen weiterhin zu der Annahme, dass bei im Vergleich zu OTT-1D erhöhter numerischer Dispersion zumindest die für ein Spektrum charakteristischen Form der Auflaufhöhenverteilung und damit auch -mit einer unbekannten mittleren Unterschätzung- die mittleren Überlaufraten wiedergegeben werden können. Eine Anwendung des 2D-Modells mit spektralen Randbedingungen wäre bei Quantifizierung der proportionalen Unterscherschätzung dann genauso vorstellbar wie bei den 1D-Modellen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Drei mathematische Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen sind im Rahmen dieses Vorhabens bezüglich des Wellenauf- und -überlaufs kalibriert und validiert worden. Sie erwiesen sich als sehr robust mit im Vergleich zu den in der Vertikalen auflösenden VOF-Modellen vertretbaren Kapazitätsbedarf. Darüber hinaus ist mit dem hier verwendeten Modell OTT-2D eine horizontal-räumliche Anwendung möglich.

Labormessungen des Wellenauflaufs- und –überlaufs im Wellenkanal des Leichtweiss-Institutes und im Großen Wellenkanal in Hannover sowie räumliche Untersuchungen im Wellenbecken des Franzius-Institutes sind für eine Modellkalibrierung und –validierung herangezogen worden. Der Schwerpunkt der Modellvalidierung lag auf dem Vergleich von zeitlich gemittelten Überlaufraten, da diese für den Deichkörper aus bodenmechanischer Sicht relevant (WEIßMANN 2003) und ein Maß für das Gefährdungspotential darstellen (CEM 2002).

Die wesentlichen Ergebnisse der eindimensionalen Modelluntersuchungen sind:

- Generell sind Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen in der Lage rechnerische Wellenauflaufhöhen und –überlaufmengen von individuellen Auflaufereignissen zu ermitteln, die stark mit den Messwerten korrelieren. Voraussetzung dafür ist die Lage des offenen Modellrands in der Nähe des Wellenbrechpunktes.
- Die Güte der numerischen Modelle bezüglich der Prognose von Überlaufraten ist besser als die von konventionellen Berechnungsansätzen.
- Simulierte mittlere Überlaufraten werden bei Lage des offenen Modellrandes in der Nähe des Brechpunktes tendenziell mit einer Unterschätzung von etwa 30 % gegenüber den verwendeten Messdatensätzen wiedergegeben. Dabei zeigen die Modellergebnisse eine starke interne Korrelation, so dass von einer systematischen Abweichung ausgegangen werden kann, die auf numerischer Dispersion beruht. Diese führt dazu, dass die Unterschätzungen mit steigender Rechenknotenanzahl also größerem Modellgebiet ebenfalls zunehmen.
- Die physikalisch korrekte Beschreibung von Wellen und deren Wechselwirkungen mit der Sohle seewärts der Brandungszone vor dem Wellenbrechpunkt ist nicht möglich, was in der Natur der Flachwassergleichungen liegt.
- Der Auswirkungen der numerischen Dispersion auf die Dämpfung der Auslenkungen ist in allen untersuchten Modellen signifikant. Der physikalische Fehler der Modelle bei Anwendungen auf größere Modellgebiete seewärts des Brechpunktes konnte daher nicht eingehender untersucht werden. Da die Abnahme des relativen Fehlers bei Vergrößerung des Modellgebietes unabhängig von der Art der Randwerteingaben Wasserspiegelauslenkungen oder Spektrum- ist, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der physikalische Fehler in der Beschreibung von Wellen seewärts des Brechpunktes für die Berechnung der Überlaufraten von untergeordneter Bedeutung ist.
- Die Modelle müssen nicht unbedingt mit gemessenen Wasserspiegelauslenkungen betrieben werden. Die Verwendung von Spektren -die dann in transformierter Form als lineare Wellenzüge am offenen Rand eingespeist werden- führt zu qualitativ gleich- oder höherwertigen Ergebnissen. Eine Zwischenschaltung eines Boussinesq-Wellenmodells, welches lineare in nichtlineare Auslenkungen überführt, ist daher nicht zur Ermittlung von Überlaufraten erforderlich.
- Das Modell OTT-1D erzielt geringfügig bessere Ergebnisse als das Modell ODI-FLOCS. OTT-1D weist zudem eine höhere Stabilität auf und hat einen geringeren Bearf an Rechenzeit. OTT-1D ist daher für Anwendungen in der Praxis eher geeignet als ODIFLOCS.

Die wesentlichen Ergebnisse der zweidimensionalen Modelluntersuchungen sind:

 Bei den gegebenen Eingabemöglichkeiten des Modells OTT-2D konnten die Messdaten des Wellenbeckens nur umständlich und unter Hinnahme von Qualitätsverlusten als Randwerteingaben für schrägen Wellenauflauf verwendet werden. Ein unmittelbarer Vergleich von gemessenen zu simulierten Aufläufen war für schrägen Auflauf somit nicht möglich.

- Das verwendete Modell OTT-2D hat Probleme, das Trockenfallen von Rechenknoten bei Abfluß von geringmächtigen Wasserschichten zu simulieren. Dies behindert den Vergleich von gemessenen und berechneten Aufläufen selbst bei senkrechtem Wellenauflauf.
- Die Häufigkeitsverteilung der Höhen der Auflaufereignisse konnte für geraden und schrägen Wellenauflauf in ähnlicher Form mit der von den eindimensionalen Versuchen bekannten Unterschätzung wiedergegeben werden. Dabei ist die Unterschätzung bei schrägem Wellenauflauf durch die erhöhte numerische Dispersion bei transversaler Gitterdurchströmung größer als bei senkrechtem Wellenauflauf.
- Die numerische Dispersion von OTT-2D ist im Vergleich zu OTT-1D generell höher. Dies bedeutet auch, dass die in OTT-1D gewählten Rauhigkeitsbeiwerte nicht direkt in OTT-2D übernommen werden können, da beide auf die Ergebnisse überlagernd wirken.

Mathematische Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen werden sich zum Stand der Technik für Wellenauf- und überlaufberechnungen entwickeln. Das Modellprinzip hat -trotz physikalischer und numerischer Defizite— seine praktische Anwendungstauglich-keit bewiesen. Das gilt ebenso für die Verwendung von Spektren als Randwerteingabe. Dieser Aspekt hat vor allem in der Praxis eine große Bedeutung, da bemessungsrelevante Wasserspiegelauslenkungen schwerlich zu bestimmen sind. Aufgrund der abschätzbaren Größe der Fehler können die eindimensionalen Modelle zur absoluten Bestimmung der Überlaufraten verwendet werden. Sie können somit aufwendige physikalische Modelluntersuchungen ersetzen. Die Kosten für Untersuchungen sind im Vergleich zu physikalischen Modellen sehr viel geringer; wobei sich die Kostenersparnis mit der Anzahl der zu untersuchenden Entwurfsalternativen noch vervielfältigt.

Für die ingenieurtechnische Praxis ist vorerst nur die Anwendung von 1D-Modellen ratsam, wobei sich hier das Modell OTT-1D auf Grund seiner Robustheit und seines begrenzten Ressourcenbedarfs als das geeignetere erwiesen hat. Das Modell OTT-2D konnte mit den zur Verfügung stehenden Messdaten nicht im Detail validiert werden. Absolute Fehlerwerte konnten nicht ermittelt werden, allerdings zeigt das Modellverhalten Ähnlichkeiten mit der eindimensionalen Version OTT-1D, grundsätzliche Aussagen sind daher übertragbar. Die Anwendung von OTT-2D für Variantenuntersuchungen bleibt davon unberührt.

6 Literatur

ABBOTT, M. B. (1979): Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free-Surface Flows, Pitman.

CEM (2002): Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A. (1991): Water wave mechanics for engineers and scientists, Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 2, World Scientific, Singapore, S. 368 ff. -CT97-0116

DODD, **N.** (1998): A numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. ASCE J Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., 124., pp 73-81

DODD, N. & TOZER, N. (2000): Strategy for Wave Model Developments. Confidential HR Wallingford Report, IT 87. (unpubl.)

GENT, M.R.A. VAN (1993): Manual of ODIFLOCS. Version 2.0. TU Delft

GENT, M.R.A. VAN (1994): Modeling of Wave Action on and in Coastal Structures. Coast. Eng., <u>22</u>, Nos. 3/4. Elsevier, Amsterdam

GENT, M.R.A. VAN (1995): Wave Interaction with Permeable Coastal Structures. Proefschrift, Technische Universiteit Delft

GENT, M.R.A. VAN (1999): Physical Model Investigations on Coastal Structures with Shallow Foreshores-2D model tests on the Petten Sea-Defence. WL|Delft Hydraulics, Rap. H 3129

GENT, M.R.A. VAN, DOORN, N. (2001): Numerical model simulations of wave propagation and wave run-up on dikes with shallow foreshores, Proc. Coastal Dynamics 2001

GRÜNE, J. & WANG, Z. (1999): Schlußbericht KFKI-Projekt Bemessung auf Seegang -Teil IV. Forschungszentrum Küste Univers. Hann./TU Braunschw. (unveröff.)

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

HERBICH, J.B.; SORENSEN, R.M.; WILLENBROCK, J.H. (1963): Effect of Berm on Wave Run-up on Composite Beaches. ASCE J. Waterw. & Harb. Div., Vol. 89, WW2

HUBBARD, M.E., DODD, N. (2000): Anemone: OTT-2D – A User Manual, Report TR 65, HR Wallingford

KAISER, R. & NIEMEYER, H.D. (1999): Prüfung der Sturmflutsicherheit im Bereich des Dangaster Siels. Ber. 04/1999 Forsch.-Stelle Küste (unveröff.)

KLEIN BRETELER, M. (1990): Golfoploop-literatuurstudie en kleinschalig modelonderzoek. WL| Delft Hydraulics, Rap. H 638

MEER, J.W. VAN DER (1997): Golfoploop en golfoverslag bij dijken. WL|Delft Hydraul., Rapp. H 2458/3051

MEER, J.W.VAN DER & DE WAAL, J.P. (1993): Waterbeweging op taluds. WL|Delft Hydraul.. Rapp. H 1256

MEER, J.W. VAN DER & JANSSEN, J.P.F.M. (1994): Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes and Revetments. Delft Hydr. Pub. No. 485

MEI, C.C. (1989): The applied dynamics of ocean surface waves, Advanced Series on Ocean Engineering Volume 1, World Scientific, Singapore, S. 764

NIEMEYER, H.D. (1976): Zur Abschätzung des maximalen Wellenauflaufs an Seedeichen aus der Einmessung von Teakgrenzen. Die Küste, H. 29.

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. (1997): Ermittlung des Deichbesticks vor dem Augustgroden, Jadebusen. Ber. 14/1997 Forsch.-Stelle Küste (unveröff.)

NIEMEYER, H.D. (1999): Forschungsvorhaben Bemessung auf Seegang - Gesamtschau der Ergebnisse, Anwendungsempfehlungen und Ausblick-. Bundesmin. f. Bildung, Wissensch., Forsch. u. Techn. Schlußber. FV Bemessung auf Seegang-Teil I (unveröff.)

NIEMEYER, H.D. (2001): Bemessung von See- und Ästuardeichen in Niedersachsen. Die Küste, H.64

- **NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. (1998a):** Überprüfung der Bestickhöhen für die Rheider Deiche zwischen Nendorp und Dollart. Dienstber. NLÖ-Forschungsstelle Küste, 03/98; veröff. in: Niemeyer, H.D. & Kaiser, R.: Untersuchungen zur Deichsicherheit an der Unterems. Arb. Forsch.-Stelle Küste, <u>13</u>
- **NIEMEYER, H. D. & KAISER, R. (1998b):** Untersuchungen zum Bestick von Versuchsaußenböschungen am Elisabethgroden- Deich, Wangerland. NLÖ- Forsch.-Stelle, Dienstber. 10/98 (unveröff.).
- **NIEMEYER, H. D.; GÄRTNER, J.; KAISER, R.; PETERS, K.-H.; SCHNEIDER, O. (1995):** Estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes under Consideration of Overtopping Security by Using Benchmarks of Flotsam. Proc. 4th Conf. Coast. & Port Engg. i. Develop. Countr., Rio de Janeiro/Brazil
- **NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. (2002):** Design Wave Evaluation for Coastal Protection Structures in the Wadden Sea, Proc. Int. San Francisco/USA, 1673-1684
- **NIEMEYER, H.D.; GÄRTNER, J.; KAISER, R.; PETERS, K.-H.; SCHNEIDER, O. (2001):** Verifikation des Extrapolationsverfahrens zur Ermittlung des Bemessungswellenauflaufs aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 64
- NIEMEYER, H., SCHULZ, D., KAISER, R., MÖLLER, J., SCHÜTTRUMPF, H., PULLEN, T., VAN GENT, M.R.A. (2002): Validation of mathematical modeling of wave overtopping on dykes, Proc. ICCE 2002, Cardiff
- OORSCHOT, J.H. VAN & D'ANGREMOND, K. (1968): The Effect of Wave Energy Spectra on Wave Run-up. Proc. 11th Int. Coastal Engineering Conference London/UK, ASCE, New York OUMERACI, H.; SCHÜTTRUMPF, H.; SAUER, W.; MÖLLER, J.; DROSTE, T. (2000): Physical Model Tests on Wave Overtopping with Natural Sea States. LWI-Report No. 852, Leichtweiß-Inst. für Wasserbau, Braunschweig.
- **OUMERACI, H., SCHÜTTRUMPF, H., MÖLLER, J., KUDELLA, M. (2001):** Loading of the Inner Slope of Seadikes by Wave Overtopping, LWI-Report No. 858, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Braunschweig.
- **PEREGRINE, D.H. (1972):** Equations for water waves and the approximation behind them, In Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport, ed. R. E. Meyer, 95 121
- **RICHARDSON, S.R., INGRAM, D.M., MINGHAM, C.G. & CAUSON, D.M. (2001):** On the validity of the shallow water equations for violent wave overtopping. Waves 2001 4th Int Symp. on Ocean Measurement and Analysis, San Francisco, California.
- **RICHWIEN, W. (1995):** Versagensformen und Nachweiskonzepte-Kritische Beanspruchungen von Deichböden. Jb. Hafenbautech. Ges., <u>50</u>
- **DE ROUCK, J., BOONE, C.,VAN DE WALLE, B. (2002):** The optimisation of crest level design of sloping coastal structures through prototype monitoring and modelling (OPTICREST), Detailed scientific and technical report, MAST-project contract number: MAS3
- **SAVILLE, T. (1955):** Wave Run-up on Composite Slopes. U.S. Army Corps o. Eng., Beach Eros. Board, X 300
- **SCHÜTTRUMPF, H. (2001):** Wellenüberlaufströmungen bei Seedeichen, Experimentelle und theoretische Untersuchung, Mitteilung des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau, Heft 149 **SCHÜTTRUMPF, H. (2004):** Persönliche Mitteilung
- SCHÜTTRUMPF, H. & OUMERACI, H. (2000): Empfehlungen A2-Wellenauflauf und Wellenüberlauf. Hansa, 137. Jg., Nr. 10
- TAW (TECHNISCHE ADVIESCOMMISSIE VOOR DE WATERKERINGEN) (1972): Golfoploop en golfoverslag. Staatsuitgeverij, s
- **WAAL, J.P. DE (1996):** Evaluation of Wave Overtopping Characteristics at Six Dikes in Germany. WL|Delft Hydraulics, Rap. H2119
- **WAAL, J.P. DE & MEER, J.W. VAN DER (1993):** Wave Run-up and Overtopping on Coastal Structures. Proc. 23rd Int. Conf. Coast. Engg. Venice/Italy, ASCE, New York
- **WEIßMANN, R., RICHWIEN, W. (2003):** Bodenmechanische Prozesse beim Wellenüberlauf über Deiche, GEOLEX (2003) Heft3, S. 5-10

7 Symbole und Zeichen

A_{97.98} : Wellenauflauf mit einer Überlauftoleranz von 3%, 2% [m]

B_B : Bermenbreite [m]

BWSt : Bemessungswasserstand [NN +m]

c : Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wellen [m/s]

D : Sandrauheit (Korngröße) [m]

f_w: Rauhigkeitsbeiwert für Wellen [-]

g : Erdbeschleunigungskonstante = 9,81 m/s²

H : Wellenhöhe [m]

h : Wassertiefe

h_B : Wassertiefe über der Berme [m]

H_{m0} : signifikante Wellenhöhe [m]

h_{swL} : Ruhewasserspiegel [m]

L : Wellenlänge [m]

L_B : Bermenlänge [m]

n : Anzahl der Versuche

N_B: Höhenlage der Berme [NN +m]

Q : mittlere Überlaufrate [l/(ms)]

QSF: mittlere Quadratsummenfehler

R : Korrelationskoeffizient

R_c : Freibord [m]

tan α : Neigung der Deichaußenböschung

t : Zeit [s]

 $T_{m-1,0}$: Energieperiode [s]

T_P: mit dem Energiedichtemaximum korrespondierende Periode [s]

u : horizontale Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

x : horizontale Koordinate [m]

D: minimale Wassertiefe [m]

Dt : zeitlicher Diskretisierungsschritt [s]

Dx : räumlicher Diskretisierungsschritt in Wellenfortschrittsrichtung [m]

Δy : räumlicher Diskretisierungsschritt

normal zur Wellenfortschrittsrichtung [m]

x_d : Irribarren-Zahl (Brecherindex) [-]

α : Neigungswinkel der Deichaußenböschung [°]

β : Winkel des Wellenfortschritts zur Deichnormalen [°]

 γ_b : Reduktionsfaktor beim Wellenauflauf für Bermenwirkung [-]

Θ : Winkel der Wellenanlaufrichtung [*] (Angriffswinkel)