

Mathematische Modellierung von Wellenauf- und -überlauf

Von MARKUS WITTING und HANZ DIETER NIEMEYER

Zusammenfassung

Wellenauf- und -überlauf an Küstenschutzwerken sind entscheidend für deren Bemessung und Sicherheit. Bislang wurden die Auflaufhöhen und Überströmungsraten mit empirischen Formeln ermittelt, bei deren Entwicklung jedoch nur schematisierte Bauwerksgeometrien und eine enge Bandbreite von Erscheinungsformen des Seegangs berücksichtigt wurde. Eine Überwindung dieser Einschränkungen und eine Verbesserung der Ergebnisgüte versprechen numerisch-mathematische Modelle mit hydrodynamischen Ansätzen, welche den Auf- und Überlaufschwall an Küstenschutzwerken brechenden Seegangs hinreichend naturähnlich reproduzieren können. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der mathematischen Modellierung von Wellenauf- und -überlauf mit Schwerpunkt auf die ingenieurmäßige Anwendung von Flachwasserwellenmodellen, die sich unter den vielfältigen wissenschaftlichen Modellansätzen als robustes und recheneffizientes Werkzeug herauskristallisiert haben. Empirische Studien zeigen, dass diese Modelle selbst über die theoretische Flachwassergrenze hinaus und für beinahe senkrechte Böschungen angewandt werden können. Die Auswertung von über 100 Vergleichsuntersuchungen weist nach, dass mit Flachwassermodellen bessere Ergebnisse bezüglich der mittleren Überlauftrate erzielt werden als mit herkömmlichen Überlaufformeln. Die verwendeten Modelle können mit Seegangsspektren als Modellrandwerte betrieben werden; physikalische und numerische Modellfehler werden wesentlich reduziert, wenn das Modellgebiet auf den bauwerksnahen Teil der Brandungszone beschränkt bleibt.

Summary

Wave run-up and overtopping are decisive factors for the design and stability of coastal structures. At present run-up heights and overtopping rates are calculated using empirical formulas, which are limited to simplified structure configurations and sea states. Numerical models based on hydrodynamic equations are able to simulate run-up and overtopping phenomena with lesser restrictions and even more accurately than empirical formulas. This contribution gives an overview of potential model approaches, focussing on the practical application of shallow water models as efficient tools for run-up and overtopping calculations. Empirical studies reveal that they can be applied successfully beyond the theoretical shallow water limits and even on almost vertical slopes. Evaluation of more than 100 model comparisons show, that shallow water models predict mean overtopping discharges better than empirical formulas. The applied models can be driven by wave spectra as boundary conditions. Physical and numerical model errors are remarkably reduced when the model area is limited to the vicinity of the coastal structure.

Inhalt

1. Einleitung	94
1.1 Ziele der Arbeit	96
2. Modelle zur Berechnung von Wellenauf- und -überlauf	97
2.1 Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen	97
2.2 BOUSSINESQ-Modelle	99
2.3 Modelle mit vollständiger Navier-Stokes-Gleichung	100
2.3.1 RANS-Modelle	100

2.3.2	VOF-Modelltechnik	101
2.3.3	SPH-Modelle	101
3.	Beschreibung der verwendeten Modelle	101
3.1	ODIFLOCS	101
3.2	OTT	102
3.3	Numerische Methoden	102
3.4	Modellbetrieb	103
4.	Modellergebnisse	103
4.1	Versuche im Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts	103
4.1.1	Versuchsanordnung	104
4.1.2	Versuchsprogramm	104
4.1.3	Modellbildung	104
4.1.4	Ergebnisse – Vergleich der mittleren Überlaufsraten	105
4.2	Versuche im Großen Wellenkanal	106
4.2.1	Versuchsanordnung	106
4.2.2	Versuchsprogramm	108
4.2.3	Modellbildung	108
4.2.4	Modellergebnisse – exemplarischer Vergleich der Wellenaufbauhöhe	109
4.2.5	Modellergebnisse – Vergleich der mittleren Überlaufsraten	110
5.	Modellbetrieb	112
5.1	Zur Art und Lage der seeseitigen Randbedingung	112
5.2	Definition des Rauigkeitsbeiwertes	115
5.3	Numerische Einstellungen	116
5.4	Empfehlungen zur Anwendung von Flachwassermodellen	117
6.	Diskussion und Zusammenfassung der Modellergebnisse	118
7.	Ausblick und zukünftige Forschung	119
8.	Danksagung	119
9.	Schriftenverzeichnis	120

1. Einleitung

Bei der Bemessung von Küstenschutzwerken ist die Höhe des Wellenaufbaus mit dem Bemessungswasserstand die wichtigste Bemessungsgröße. Bemessungswellenaufbauhöhen stellen einen wesentlichen Anteil an den Bestickhöhen von Seedeichen dar. Die Menge der auf- und überströmenden Wassermengen ist für See- und Ästuardeiche von besonderem Interesse, da die Infiltration durch überströmendes Wasser unmittelbar Deichstabilität und Sicherheit mitbestimmt (WEIßMANN, 2003). Ebenso kann der Wellenüberlauf von Deichen auf den Binnenböschungen durch Erosion deren Stabilität und damit die Funktionsfähigkeit des Deiches selbst beeinträchtigen oder sogar vollständig aufheben. Bei Deckwerken und Sturmflutschutzwänden muss die Überlaufmenge so begrenzt werden, dass sie schadlos – ohne die Standsicherheit des Bauwerks zu gefährden – abgeführt werden kann. Der Entwurf von Küstenschutzbauwerken zielt daher darauf ab, eine für die Funktionsfähigkeit des Bauwerks unschädliche bzw. ungefährliche Grenzüberlauftrate optimal zu ermitteln, um eine gleichzeitig wirtschaftliche Dimensionierung zu erreichen.

Herkömmliche Formeln zur Berechnung des Wellenauf- und -überlaufs basieren auf physikalischen Modellversuchen oder auf Messungen in der Natur; sie sind meist Anpassungsfunktionen der entsprechenden Messergebnisse. Eine Bemessungsformel ist daher nur für eine definierte Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit von Küstenschutzbauwerken und für eine bestimmte Spannbreite von Seegangszuständen gültig. Eine Extrapolation über die jeweiligen Grenzen einer Formel hinaus ist nur sehr bedingt oder gar nicht möglich. Obwohl weltweit vielfältige Untersuchungen zum Wellenüberlauf stattgefunden haben, ist nur ein geringer Teil der unendlichen Kombinationsmöglichkeiten aus Bauwerksgeometrien

und -beschaffenheiten sowie unterschiedlichen Erscheinungsformen des Seegangs untersucht worden. Daher ist es für alle damit nicht abgedeckten Fälle unumgänglich, weitere physikalische Modelluntersuchungen in Wellenkanälen oder -becken auszuführen, um belastbare Ergebnisse für den Bemessungswellenauf- und -überlauf zu erhalten. Allerdings können physikalische Modelluntersuchungen mit unterschiedlichen – nicht immer offensichtlichen – Fehlerquellen behaftet sein, die eine unveränderte Umsetzung der Ergebnisse in die Bemessung oft nicht erlauben:

- Messunsicherheiten: Bei der Messung und Analyse von Seegangszuständen im Wellenkanal treten bezüglich Wellenhöhe und -periode Fehler in der Größenordnung von bis zu 5 % auf (KORTENHAUS et al., 2004). In der Messung der Überlaufrate durch Gewichtsmessung treten Variationen von 12 % auf, wenn derselbe Versuch mehrfach wiederholt wird.
- Maßstabeffekte bei kleinmaßstäblichen Modellversuchen: Der Einfluss der Oberflächenspannung und der kinematischen Viskosität auf Wellenauf- und -überlauf verstärkt sich, je kleiner die Strömungsgeschwindigkeiten sind. Im Falle kleiner Überlaufraten und geringmächtiger Schichtdicken bildet sich im Modell keine turbulente Grenzschicht aus (SCHÜTTRUMPF, 2001), was die hydraulische Rauheit im Auflaufbereich verstärkt und so zu geringeren Auflaufhöhen führt (SCHULZ, 1992).
- Modelleffekte (Laboreffekte): Im Wellenkanal oder -becken können unerwünschte Schwingungen durch fehlende Absorptionsmechanismen entstehen (OUMERACI, 1999).

Um Fehler aus kleinmaßstäblichen physikalischen Versuchen zu bereinigen und damit eine Umsetzung der Ergebnisse auf reale Bauwerke zu ermöglichen sind lange Untersuchungsreihen notwendig. Für den Fall von geneigten, geschütteten Wellenbrecher ist dazu ein mehrstufiges Verfahren erarbeitet worden (DE ROUCK et al., 2005).

Unumgänglich sind physikalische oder numerische Modelluntersuchungen an geometrisch gegliederten Küstenschutzbauwerken, da eine Anwendung empirischer Formeln hier nur selten hinreichend genau ist. Gerade für Vorentwurfsstudien und Variantenuntersuchungen sind physikalische Modelluntersuchungen jedoch oft zu zeit- und kostenintensiv. Mit numerischen Modellen können hingegen unterschiedliche Entwurfsvarianten ohne großen Aufwand verglichen werden. Dank der definierten, immer gleichen Randbedingungen eines Computermodells kann der Entwurf hinsichtlich beliebiger Parameter wie beispielsweise der mittleren Überlaufrate optimiert werden.

Dank dem Fortschritt in der Seegangmodellierung mit vollspektralen Küstengebietsmodellen wie SWAN (RIS et al., 1995; BOOIJ et al., 1999) ist es mittlerweile Stand der Technik, den Bemessungsseegang vor Küstenabschnitten detailliert in seiner spektralen Ausprägung zu berechnen. Bei Anwendung von empirischen Bemessungsformeln wird diese spektrale Seegangsinformation nicht genutzt, da meist nur die Eingabe von integrierten Seegangparametern wie die dominante Periode und die signifikante Wellenhöhe in die Formeln eingehen. In jüngster Zeit sind Formeln entwickelt worden, die zumindest einen Anhaltspunkt liefern, wie mit komplexen Seegangsspektren mit Mehrfachspitzen, die oft an der deutschen Nordseeküste anzutreffen sind, umgegangen werden kann. VAN GENT (1999) schlägt dafür beispielsweise die Energieperiode $T_{m-1,0}$ vor.

Die maßgebende Größe für die Gefährdung der Binnenböschung von Seedeichen durch Infiltration ist die Mächtigkeit der mittleren Wasserüberdeckung auf der Deichkrone (WEIßMANN, 2003). Zur Ermittlung dieses Parameters sind derzeit keine empirischen Formeln verfügbar, daher sind physikalische oder numerische Modelluntersuchungen zur Erreichung dieses Ziels unumgänglich; auch dabei fällt ein Vorteil numerischer Modelle ins Ge-

wicht: Die Schichtdicken auf der Deichkrone können unmittelbar auf der Grundlage eines Modelllaufs analysiert werden.

Eine Modellierung des Wellenaufbaus mit hydrodynamischen Modellen hat demnach grundsätzlich folgende methodische Vorteile:

- mögliche Nutzung der verfügbaren spektralen Seegangsinformation aus Messungen oder Seegangmodellen,
- keine Einschränkungen bezüglich der Bauwerksgeometrie und Seegangszuständen,
- unaufwendige Untersuchungen von Entwurfsvarianten,
- einfache Ermittlung zusätzlicher bemessungsrelevanter Parameter wie Schichtdicken oder Auflaufgeschwindigkeiten.

1.1 Ziele der Arbeit

Hauptziel des KFKI-Forschungsvorhabens „Optimierung von Deichprofilen – Mathematische Modellierung von Wellenauf- und -überlauf“ war die Validierung von eindimensionalen numerischen Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen anhand von Deichen mit einheitlicher Neigung der Außenböschung. Hierfür sind Daten der physikalischen Modellversuche im Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover und dem Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig verwendet worden. Die Validierung fokussiert sich dabei auf mittlere Überlaufsraten. Im Sinne der Überprüfung der Naturähnlichkeit der Modelle sind jedoch auch individuelle Auflaufereignisse verglichen worden.

Das Projekt geht hinsichtlich folgender Fragestellungen über das im Jahre 2001 beendete EU-MAST3-Projekt OPTICREST (OPTimisation of CREST level design of sloping coastal structures through prototype monitoring and modelling) hinaus:

- Es konnte ein unabhängiger Modellvergleich zwei eindimensionaler, numerischer Modellen für Wellenauf- und -überlauf vorgenommen werden.
- Es konnten zum ersten Mal Messdaten aus großskaligen Versuchen des GWK zur Validierung eines numerischen Wellenauf- und -überlaufmodells herangezogen werden.
- Validierungsuntersuchungen mit einem 2D-Modell sind ausgeführt worden.
- Relevante Fragestellungen für die Anwendung der Modelle in der Bemessungspraxis, wie beispielsweise die Lage und Art der offenen Randbedingung sind in die Untersuchungen einbezogen worden.

Die beiden eindimensionalen Modelle OTT-1D (DODD, 1998) und ODIFLOCS (VAN GENT, 1995) wurden im Projekt untersucht. Es zeigte sich, dass das Modell ODIFLOCS einer Kalibrierung im Sinne einer Sensitivitätsuntersuchung von Modellparametern unterzogen werden musste, die in der ersten Projektphase vorgenommen wurde (NIEMEYER et al., 2002).

In der zweiten Projektphase konnte dann aus parallel durchgeführten Simulationen ein Vergleich der beiden Modelle bezüglich der Qualität der Ergebnisse und des Leistungsverhaltens gezogen werden (WITTING et al., 2005). Räumliche Untersuchungen sind zudem mit dem 2-dimensionalen Modell OTT-2D durchgeführt worden (NIEMEYER et al., 2004), dessen Ergebnisse werden hier nicht erörtert.

In der Bemessungspraxis liegen meist spektrale Seegangsinformationen vor, die als Randwerte in die Modelle eingespeist werden können. Simulationen von VAN GENT und DOORN (2001) legen nahe, dass diese nur eingeschränkt für Flachwasserwellenmodelle tauglich sind. In diesem Beitrag werden diese Aussagen relativiert und präzisiert. Weiterhin sind

bezüglich der Lage des offenen, seeseitigen Randes Sensitivitätsanalysen ausgeführt worden.

Empirische Berechnungsformeln für die mittlere Überlaufrate sind im Sinne eines Qualitätsabgleiches mit den Modellergebnissen der GWK-Versuche verglichen worden.

2. Modelle zur Berechnung von Wellenauf- und -überlauf

Mathematisch-physikalische Beschreibungen von Seegang sind in unterschiedlicher Komplexität möglich. Je detaillierter die beschreibenden physikalischen Gleichungen sind, desto universeller ist die Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten. Die komplexeste Stufe stellen dabei die dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen dar, gefolgt von den über die Wassertiefe integrierten Gleichungen, den Flachwasser- und Boussinesq-Gleichungen. Letztgenannte werden unter vereinfachenden Annahmen aus der Navier-Stokes-Gleichung abgeleitet. Mit Hilfe einer räumlichen und zeitlichen Diskretisierung setzt ein numerisches Schema die entsprechenden Gleichungen in das eigentliche mathematisch-numerische Modell um. Die Art der Diskretisierung und des Schemas sind einerseits von großer Bedeutung für das Modellverhalten und die Möglichkeiten des Modells. Andererseits wächst damit aber auch die Größe des numerischen Fehlerpotentials, der numerischen Dispersion, die aus der diskreten Behandlung der physikalischen Gleichungen herrührt.

Rechenzeitbedarf und Handhabung im Sinne von der Anzahl der einzugebenden Parameter und der Stabilität des Rechenprozesses sind Kriterien für die ingenieurmäßige Anwendungseignung von numerischen Modellen. Da jedes Modell allein bedingt durch die Diskretisierung und die notwendige Parametrisierung von Phänomenen wie Sohlreibung und Turbulenz fehlerbehaftet ist, tritt in der praktischen Modellanwendung die Forderung nach einer „exakten“ deterministischen Beschreibung der Phänomene zu Gunsten einer Orientierung an der erforderlichen und erreichbaren Genauigkeit der Modellergebnisse in den Hintergrund. Es muss auch deutlich gemacht werden, dass neben numerischen Fehlern auch die rein physikalische Beschreibung eines Modells fehlerbehaftet sein kann oder relevante Phänomene außer Acht gelassen werden; so ist in diesem Zusammenhang zu bemerken, dass kein in diesem Beitrag genanntes Modell den Einfluss von auflandigem Wind berücksichtigt, der in Abhängigkeit der Böschungsneigung und der Sohlrauigkeit zu höheren Wellenaufläufen führen kann (WARD et al., 1998). Dasselbe gilt allerdings auch für Bemessungsformeln und für den Großteil der physikalischen Modellversuche, bei denen dessen Einfluss ebenfalls nicht berücksichtigt wird. Für die Bemessungspraxis gilt es daher – unabhängig vom verwendeten Modelltyp – die Belastbarkeit der Modellergebnisse trotz grundsätzlicher Defizite der Modellierung zu gewährleisten. Dazu muss der Modellanwender klare Vorstellungen über den Betrieb und die Grenzen des jeweils verwendeten Modells entwickeln.

2.1 Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen

Die Flachwassergleichungen sind über die Wassertiefe integrierte Gleichungen für den Impuls- und Massenerhalt. Sie berechnen lokal die horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten und den Wasserstand. Ursprünglich wurden die Flachwassergleichungen für Freispiigelabflüsse in Gerinnen entwickelt, klassische numerische Anwendungen finden sich überall dort, wo es sich um großräumige Strömungen mit vorwiegend horizontalen Komponenten

handelt. Üblicherweise enthalten die Flachwassergleichungen einen Reibungsterm für die Sohlreibung, bei einigen Anwendungen muss entsprechend ein Windreibungsterm an der Wasseroberfläche vorgesehen werden. Vertikale Geschwindigkeitskomponenten werden vernachlässigt. Es wird bei Anwendung der Flachwassergleichungen davon ausgegangen, dass diese im Vergleich zu den horizontalen Strömungskomponenten klein sind. Die Druckverteilung wird als hydrostatisch angenommen. Seegang und andere Wellen können Flachwassergleichungen theoretisch nur für Flachwasserbedingungen mit einer relativen Wassertiefe $h/L < 0,05$ darstellen, daher wird zur Berechnung von Wellenauf- und -überlauf die Anwendung für brechende oder kurz vor dem Brechen befindliche Wellen empfohlen (HUBBARD und DODD, 2000). Eine physikalisch fundierte Darlegung der Anwendungsgrenzen von Flachwassergleichungen wird von PEREGRINE (1972), DEAN und DALRYMPLE (1991) sowie von MEI (1990) angeboten.

Ein wesentlicher Aspekt der Flachwassergleichungen ist der, dass Wellenbrechen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Flachwasserwellen implizit modelliert wird. So pflanzt sich der Wellenberg aufgrund der größeren Wassertiefe schneller fort als das Wellental, was zur Ausbildung einer beinahe vertikalen Front führt, die als Bore angesehen wird und die brechende Welle darstellt.

Die Anwendung der Flachwassergleichungen auf Seegang in der Brandungszone widerspricht augenscheinlich der Annahme von rein horizontalen Strömungen. So existieren in brechenden Wellen und der Brandungszone auch vertikale Strömungskomponenten und Rückströmungen, die von tiefenintegrierten Gleichungen nicht wiedergegeben werden können. Aufgrund der fehlenden Frequenzdispersion der Flachwassergleichungen gilt dies ebenso für die Modellierung von nichtlinearen Wellen im Übergangsbereich. Insgesamt lässt sich feststellen, dass Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen für viele küstennahe Seegangphänomene nur eine physikalisch eingeschränkte Beschreibung liefern.

Das Auf- und Zurücklaufen der Wellen in der Wellenauflaufzone jenseits des Wellenbrechpunktes kann jedoch als ein vornehmlich horizontaler Strömungsprozess behandelt werden, was selbst auf sehr steilen, nahezu senkrechten Böschungen gilt (RICHARDSON et al., 2001). Die horizontale Impuls- und Massenerhaltung sind daher vom physikalischen Standpunkt gesehen hinreichend, um Wellenauf- und -überlauf naturähnlich zu modellieren, was von verschiedenen vergleichende Untersuchungen empirisch bestätigt haben (VAN GENT et al., 2001; HUBBARD and DODD, 2002; WITTING et al., 2005). Auch die grundsätzliche physikalische Begrenzung auf eine relative Wassertiefe entsprechend der Flachwasserbedingung und die Forderung nach einer ebenen Sohle sind in empirischen Anwendungen widerlegt worden. So lässt sich die theoretische Flachwassergrenze von $h/L = 0,05$ in praktischen Anwendungen auf $h/L = 0,17$ erweitern (RICHARDSON et al., 2001). Gleiches gilt für die zulässige Böschungneigung; Wellenauflauf kann sogar an beinahe vertikale Böschungen (10:1) naturähnlich modelliert werden (RICHARDSON et al., 2001).

Trotzdem sollten die genannten grundsätzlichen physikalischen Anwendungsgrenzen nicht völlig außer Acht gelassen werden. In der Praxis geschieht dies, indem man die seeseitige Modellgrenze möglichst nahe an das zu untersuchende Bauwerk legt und sich so stärker der Flachwasserbedingung nähert.

Ein entscheidender Vorteil von Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen ist der geringe Rechenzeitbedarf. Flachwassergleichungen mit ihren stabilen, schnell zu lösenden numerischen Schemata können eine praktische 1-dimensionale Aufgabenstellung auf einem modernen Arbeitsplatzrechner weitaus schneller als in Echtzeit lösen. Physikalische Modelluntersuchungen legen nahe, dass zur statistisch gesicherten Abbildung eines Seegangzustandes mit dessen Extremwerten mindestens 1000 Wellen modelliert werden müssen. Dies

ist mit Flachwassermodellen problemlos im Vergleich zu anderen Modellgattungen geringem Zeitaufwand möglich.

2.2 BOUSSINESQ - Modelle

Die Boussinesq-Gleichungen sind ebenfalls tiefenintegrierte hydrodynamische Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls, die jedoch im Gegensatz zu den Flachwassergleichungen eine hydrodynamische Druckapproximation der vertikalen Strömungskomponenten enthalten. Diese ermöglicht es, die nichtlinearen Auslenkungen und die dispersiven Eigenschaften von Wellen bis in den Übergangsbereich $0,05 < h/L < 0,5$ hinein zu modellieren.

Zeitreihen von Wasserspiegelauslenkungen eines Flachwasserwellenmodells und eines Boussinesq-Wellenmodells nach einer Lauflänge von 25 m werden hier Messungen aus dem Großen Wellenkanal (Wassertiefe $h = 5$ m, $H_{m0} = 0,60$ m und $T_p = 5,29$ s) exemplarisch gegenübergestellt (Abb. 1). Deutlich fallen die erheblichen Abweichungen bezüglich der Phasenlagen und Intensitäten der Auslenkungen des Flachwassermodells (FLACHW) auf. Im Gegensatz dazu liefert das Boussinesq-Modell (BOUSS) (WITTING et al., 1998) naturähnliche Ergebnisse.

Die auf der Lauflänge von 25 m auftretenden physikalischen Wechselwirkungen von Wellenbestandteilen können vom Flachwassermodell – wie bereits grundsätzlich erläutert – nicht wiedergegeben werden. Boussinesq-Modelle sind hingegen dazu auf Grund der modellinhärenten Frequenzdispersion in der Lage; diese Eigenschaft prädestiniert sie insbesondere für die Modellierung von kleinräumigen küstennahen Seegangs- und Strömungsfeldern. Das Brechen der Wellen wird in Boussinesq-Modellen nicht wie bei Flachwassermodellen impli-

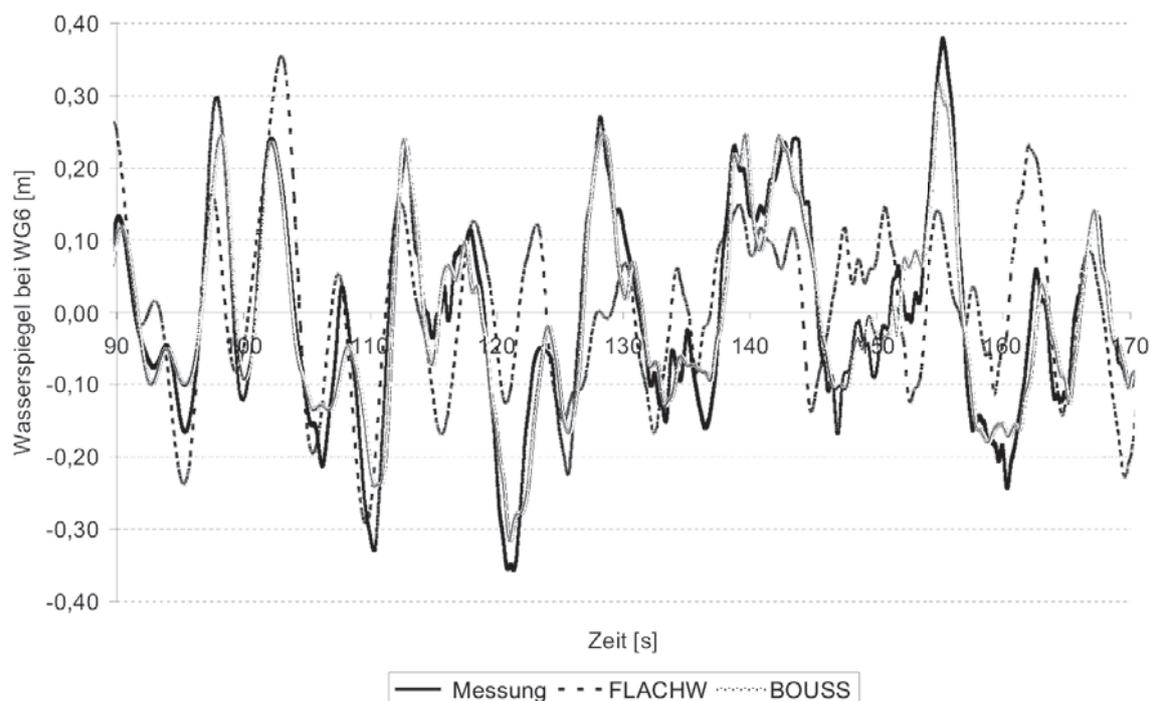


Abb. 1: Beispiel von gemessenen und berechneten Wasserspiegelauslenkungen eines Flachwasser- (FLACHW) und eines Boussinesq-Modells (BOUSS)

zit unter Ausprägung einer Bore simuliert, sondern muss mit zusätzlichen Verfahren wie beispielsweise einer zusätzlichen Wirbelviskosität (SCHRÖTER, 1995; STRYBNY, 2000) oder einem Oberflächen-Roller-Ansatz (SCHÄFFER et al., 1992) implementiert werden. Der Versuch, die hydrodynamische Druckapproximation nach Erreichen des Brechpunktes der Wellen nicht mehr zu berücksichtigen, ist ein weiterer Ansatz dem Problem des Wellenbrechens in Boussinesq-Modellen zu begegnen (WESTON et al., 2005). Modellierungen des Wellenaufbaus zeigten recht naturähnliche Ergebnisse bezüglich der mittleren Überlauftrate (STRYBNY, 2004). Die Rechenzeiten von Boussinesq-Modellen erhöhen sich infolge der zusätzlichen Gleichungsterme im eindimensionalen Fall allerdings um etwa eine Größenordnung gegenüber Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen.

2.3 Modelle mit vollständiger Navier-Stokes-Gleichung

Die Navier-Stokes-Gleichungen erlauben die detaillierteste Beschreibung der hydrodynamischen Phänomene im Bereich des Wellenbrechens. Sie besitzen neben der horizontalen noch eine vertikal-räumliche Auflösung über die Wassertiefe und sind deshalb in der Lage das vollständige Strömungsfeld unter Wellen zu erfassen. Turbulenzen im Strömungsfeld können hierbei auf verschiedene Weise praktikabel einer Berechnung zugeführt werden. Neben der Large-Eddy-Simulation (LES) haben sich hier vor allem die Reynolds-Gleichungen durchgesetzt, die jedoch ein Turbulenzmodell wie beispielsweise das weit verbreitete $k-\epsilon$ -Modell zur Berechnung der turbulenten Strömungsanteile benötigen.

Die Universalität der Modelle auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen geht auf Kosten der Rechenzeit, im Vergleich zu Flachwassergleichungen kann eine Simulation das 1000-fache an Rechenzeit benötigen. Die Modelle werden daher zur Zeit im wissenschaftlichen Umfeld vor allem dazu verwendet, Bemessungsformeln für spezielle Situationen, wie beispielsweise niedrige Freibordhöhen (SOLIMAN, 2003) zu generieren, die dann bei ingenieurmäßigen Bemessungen genutzt werden. Vom Modellanwender verlangen die Modelle ein vertieftes Verständnis der Turbulenzmodellierung; auch die Definition von Rand- und Anfangswerten für eine Simulation verlangt erheblich mehr Aufwand als für Modelle, die tiefengemittelte Strömungen reproduzieren.

2.3.1 RANS-Modelle

RANS-Modelle (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) verwenden die Reynolds-Gleichungen und ein Turbulenzmodell, wobei die Gleichungen meist mit Finite-Differenzen-Verfahren gelöst werden. SOLIMAN (2003) erzielt damit recht gute Ergebnisse bei der Berechnung von mittleren Überlauftraten an einer gleichmäßig geneigten Böschung. Die zum Vergleich herangezogenen physikalischen Modelluntersuchungen wurden in einem kleinskaligen Wellenkanal mit regulären Wellen durchgeführt (SAVILLE, 1955). Die ebenfalls angewandten Flachwassermodellen (HU et al., 2000) wiesen bei diesem Vergleich einen um 12 % größeren Fehler auf als das RANS-Modell.

2.3.2 V O F - M o d e l l t e c h n i k

VOF-Modelle (Volume-Of-Fluid) verwenden auch die Reynolds-Gleichungen in Zusammenspiel mit einer speziellen numerischen Technik, die sich nicht mehr an der freien Wasseroberfläche als Modellgebietsberandung orientieren muss. VOF-Modelle besitzen in beiden Raumdimensionen eine sehr feine Auflösung an Rechenzellen mit der Eigenschaft, auch teilgefüllte Zellen und damit Wasser-Luft-Gemische zu berechnen. Vorteilhaft ist diese Eigenschaft zur Berechnung von hochkomplexen Oberflächen des Wasserspiegels, wie sie beispielsweise bei Sturzbrechern auftreten. Auch sind die Details einer wieder auf die Wasseroberfläche auftreffenden Wasserzunge mit der VOF-Technik modellierbar, wofür eine sehr feine räumliche Auflösung im Zentimeterbereich erforderlich ist. Diese Auflösungen können leicht zu einer um den Faktor 1000 erhöhten Anzahl von Rechenknoten im Vergleich zu Boussinesq- oder Flachwassermodellen führen. Einige dieser nur im wissenschaftlichen Umfeld verwendeten Modelle wurden im Projekt OPTICREST (DE ROUCK et al., 2002) bezüglich Wellenauf- und -überlauf untersucht. Die Qualität der Ergebnisse dieser Modelle für Wellenauf- und überlauf war jedoch deutlich geringer als die von Flachwassermodellen (ROUCK et al., 2002). Diese Erkenntnis gibt zusammen mit der Komplexität in der Anwendung und dem Rechenzeitbedarf keinerlei Anlass VOF-Modelle in naher Zukunft für eine ingenieurmäßige Berechnung von Wellenauf- und -überlauf einzusetzen.

2.3.3 S P H - M o d e l l e

SPH-Modelle (Smoothed Particle Hydrodynamics) lösen die Navier-Stokes-Gleichungen unter Verwendung von Strömungsteilchen, die sich mit der Strömung mitbewegen (Lagrangesche Sichtweise). Daher ist kein Rechengitter erforderlich, ein Modellfehler infolge numerischer Dispersion tritt bei SPH-Modellen nicht auf. Ein weiterer Vorteil dieser Modellgattung ist die Darstellung der freien Wasseroberfläche durch Wasserteilchen, die somit jede beliebige Form annehmen kann, insbesondere auch dort, wo sich Wasserteilchen vom Wasserkörper ablösen, wie z.B. nach dem Auftreffen der Brecherzunge auf dem Wasserkörper. SPH-Modelle geben je nach Partikelgröße einen äußerst detaillierten Einblick in die Strömungsstrukturen von brechenden Wellen; nachteilig ist – ebenso wie bei den VOF-Modellen – der äußerst hohe Rechenzeitbedarf. SPH-Modelle erzielen bei der Berechnung der mittleren Überlauftrate bislang geringfügig schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu RANS-Modellen (SHAO et al., 2006).

3. B e s c h r e i b u n g d e r v e r w e n d e t e n M o d e l l e

3.1 O D I F L O C S

ODIFLOCS (One-Dimensional- Flow On and in Coastal Structures) (VAN GENT, 1995) 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. Innerhalb dieses Projektes sind allerdings nur Wellenauf- und -überlauf an undurchlässigen Deichböschungen modelliert 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 Rauigkeitsbeiwert f_w kann abschnittsweise differenziert vorgegeben werden.

3.2 O T T

Das Modell OTT-1D (DODD, 1998; HUBBARD und DODD, 2000) ist Teil der Modellgruppe 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 voneinander getrennte Wasserkörper (Auflaufzunge, überströmendes Wasser, eventueller Wasserkörper in Lee) rechen-technisch zu behandeln. Durchlässige Medien, wie z.B. geschüttete Wellenbrecher, kann die Modellvariante OTTP-1D simulieren. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierung von Deichprofilen“ wurde ebenfalls das horizontal-zweidimensionale Modell OTT-2D eingesetzt (NIEMEYER et al., 2004), welches nicht nur einen Wellenkanal (1D) sondern auch ein flächenhaftes Wellenbecken nachbilden kann. Ergebnisse von OTT-2D sind nicht in diesem Bericht enthalten.

Randbedingungen können reguläre und irreguläre Wellen sein, eine Vorgabe von standardisierten oder auch selbst definierten Spektren ist möglich. Der Rauigkeitsbeiwert kann nur konstant über das gesamte Modellgebiet vorgegeben werden.

3.3 Numerische Methoden

Die Flachwassergleichungen werden in den im Vorhaben verwendeten Modellen ODIFLOCS, 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 Godunov-artiges Schema verwendet wird, ist in ODIFLOCS ein Lax-Wendroff Schema implementiert. Das Godunov-artige Schema von OTT besitzt methodisch den 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 erfasst und die Volumina der benetzten Gitterzellen gespeichert werden, was rechentechnisch aufwendiger ist. Weithin kann bei Verwendung eines Godunov-artigen Schemas auf eine zusätzliche Glättung – zur Vermeidung von numerischen Oszillationen – in der Nähe der steilen Wasserstandsgradienten der sich fortpflanzende Bore verzichtet werden. Die OTT-Modelle sind somit vom numerischen Schema her besser an die Erfordernisse der Wellenauf- und -überlaufberechnung angepasst.

In den beiden expliziten Schemata wird der erlaubt maximale Rechenzeitschritt Δt über das Courant-Friedrichs-Levy-Kriterium (CFL-Kriterium) bestimmt, um die Lösung stabil zu halten. 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 ODIFLOCS VAN GENT (1995).

3.4 Modellbetrieb

Die numerischen Modelle benötigen als Eingabe prinzipiell alle Daten, die sich aus der Natur oder den Laborversuchen ableiten lassen. Dies gilt vor allem für die geometrischen Abmessungen der physikalischen Versuchsanordnung oder der des zu untersuchenden Bauwerkes. Strebt man einen Vergleich von gemessenen zu simulierten Größen an, ist auch die exakte Lage der Messstellen zu beschreiben. Die Generation von Wellen erfolgt am seeseitigen Modellrand, wo die Randbedingung in Form von Wasserspiegelauslenkungen vorgegeben wird. Auslenkungen können direkt von Messwerten stammen oder aber aus Wellentheorien bzw. Spektren abgeleitet werden. Bei Verwendung von Seegangsspektren wird aus der Energiedichte einer Frequenz die Wellenhöhe einer linearen Welle ermittelt. Da die Phaseninformation in Seegangsspektren üblicherweise nicht behalten wird, müssen die linearen Wellen per Zufallsgenerator aneinandergereiht werden. Darüber hinaus müssen auch die Eigenschaften der Modellränder beschrieben werden, hier unterscheidet man grundsätzlich zwischen absorbierenden und reflektierenden Randbedingungen.

Im Gegensatz zu Laborversuchen müssen bestimmte Parameter explizit festgelegt werden: Rauigkeitsbeiwert f_w ; die minimale Wassertiefe d_{\min} , die das Modell berechnen soll, und die Wassertiefe d_{Rand} , die als messbare Wellenaufbaufront angesehen werden soll. Da das numerische Modell Raum und Zeit in diskrete Kontinua bzw. Schritte 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 alle relevanten Phänomene vom Modell dargestellt werden können.

Beide Modelle können problemlos auf modernen Arbeitsplatzrechnern betrieben werden. Die Rechenzeiten hängen von der Anzahl der Rechenknoten ab, sie sind aber für den eindimensionalen Fall kürzer als Echtzeiten. Dies bedeutet, dass Rechenzeit als relevante Begrenzung für den Umfang von Varianten- und Sensitivitätsuntersuchungen unbedeutend ist. Das zweidimensionale Modell OTT-2D benötigt naturgemäß ein Vielfaches der Rechenzeit, die von der räumlich-horizontalen Ausdehnung des Modellgebietes stark abhängig ist.

4. Modellergebnisse

Messdaten der eindimensionalen hydraulischen Modellversuche zum Wellenüberlauf aus dem Wellenkanal des Leichtweiß-Institutes (LWK) (SCHÜTTRUMPF, 2001) und des großen Wellenkanals in Hannover (GWK) (OUMERACI et al., 2001) (KFKI-Forschungsvorhaben Wellenüberlaufbelastung von Deichbinnenböschungen –003KIS009) sind als Grundlage für Modellkalibrierung und Modellvalidierung genutzt worden. Die Dimensionen des GWK erlauben es, Versuche annähernd im Naturmaßstab durchzuführen. Die 1D-Modellvalidierung dieser Arbeit ist – soweit hier bekannt – weltweit die erste, die Daten aus Versuchen dieser Größenskala verwendet.

4.1 Versuche im Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts

Die am Leichtweiß-Institut in der ersten Phase des erwähnten KFKI-Projektes vorgenommenen Untersuchungen sind kleinmaßstäblich, die gemessenen mittleren Überlaufweiten liegen ungefähr bei $0 < Q < 2,6 \text{ l/(sm)}$.

4.1.1 Versuchsanordnung

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 in den verwendeten Untersuchungen 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 glatt (QUMERACI et al., 2000) mit einem mittlerer Rauigkeitsbeiwert von $f = 0,0058$. Hinter der Deichkrone befindet sich der Behälter zur Messung der Überlaufvolumen. Diese sind für ein Zeitintervall von jeweils $100 \cdot T_p$ gemessen worden, woraus sich die mittleren Überlaufzeiten in $l/(m \cdot s)$ ergibt.

4.1.2 Versuchsprogramm

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

4.1.3 Modellbildung

In der ersten Projektphase der Jahre 2001 und 2002 wurden Messdaten von Überlaufversuchen aus dem LWK verfügbar, so dass eine Validierung des Modells ODIFLOCS vorgenommen werden konnte. Verglichen sind die gemittelten Überlaufzeiten. Im Laufe der Modelluntersuchungen stellte sich heraus, dass das Modell ODIFLOCS bezüglich geeigneter Modelleinstellungen zuerst einmal über eine Parameterstudie kalibriert werden musste, in der u. a. der Einfluss der Sohlrauigkeit, der minimalen Wassertiefe und des Rechenzeitschrittes auf die Stabilität von ODIFLOCS untersucht wurde (NIEMEYER et al., 2002). Für die Modellbildung mit ODIFLOCS konnte abgeleitet werden, dass das Modell zur Verbesserung der numerischen Stabilität mit einer möglichst geringen minimalen Wassertiefe d_{\min} und mit höheren Rauigkeitsbeiwerten als in der Standardvorgabe betrieben werden sollte.

Der Wellenkanal ist in beiden mathematischen Modellen mit einem räumlichen Diskretisierungsschritt im cm-Bereich aufgelöst, da die Wellenlängen relativ kurz sind und eine Welle mit mindestens 7 Rechenknoten aufgelöst werden sollte. Der offene Modellrand liegt in einer Entfernung von 1,67 m vom Böschungsfuß. Als Randbedingung wird die Messung der Wasserspiegelauslenkung eines Wellendrahts verwendet. Der rechte Modellrand liegt bei beiden Modellen am oberen Ende der Böschung und besitzt eine absorbierende Randbedingung. Die modellspezifischen Einstellungen sind in Tab. 1 gegenübergestellt.

Beim Modell ODIFLOCS ist der Rauigkeitsbeiwert f_w , der ja eine Funktion der Wellenperiode und der geometrischen Sandrauheit $f_w(T_p, D)$ ist, immer auf eine konstante geometrische Sandrauheit von $D = 10^{-9} \text{ m}$ eingestellt, damit konnten mit ODIFLOCS ca. 90 % (49 von 56) der Modellversuche ohne Stabilitätsprobleme simuliert werden (NIEMEYER et al., 2002); die resultierende Spannweite der Rauigkeitsbeiwerte ist in Tab. 1 wiedergegeben.

Tab. 1: Modellspezifische Einstellungen für die Versuche im Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts

	OTT-1D	ODIFLOCS
Rauigkeitsbeiwert f_w/f	0,01	0,07–0,21
Minimale Wassertiefe	~ 0,0002 m	0,0001 m
Diskretisierungsschritt Δx	0,05 m	0,03 m \pm 0,01 m

4.1.4 Ergebnisse – Vergleich der mittleren Überlaufsraten

Die Güte der beiden Modellergebnisse für mit 56 (OTT-1D) bzw. 49 (ODIFLOCS) Versuchen ist ähnlich (Tab. 2). Beide Modelle zeigen gute Ergebnisse mit einem mittleren relativen Fehler von ca. 33 %, dabei kommt es zu Über- wie auch zu Unterschätzungen (Abb. 2).

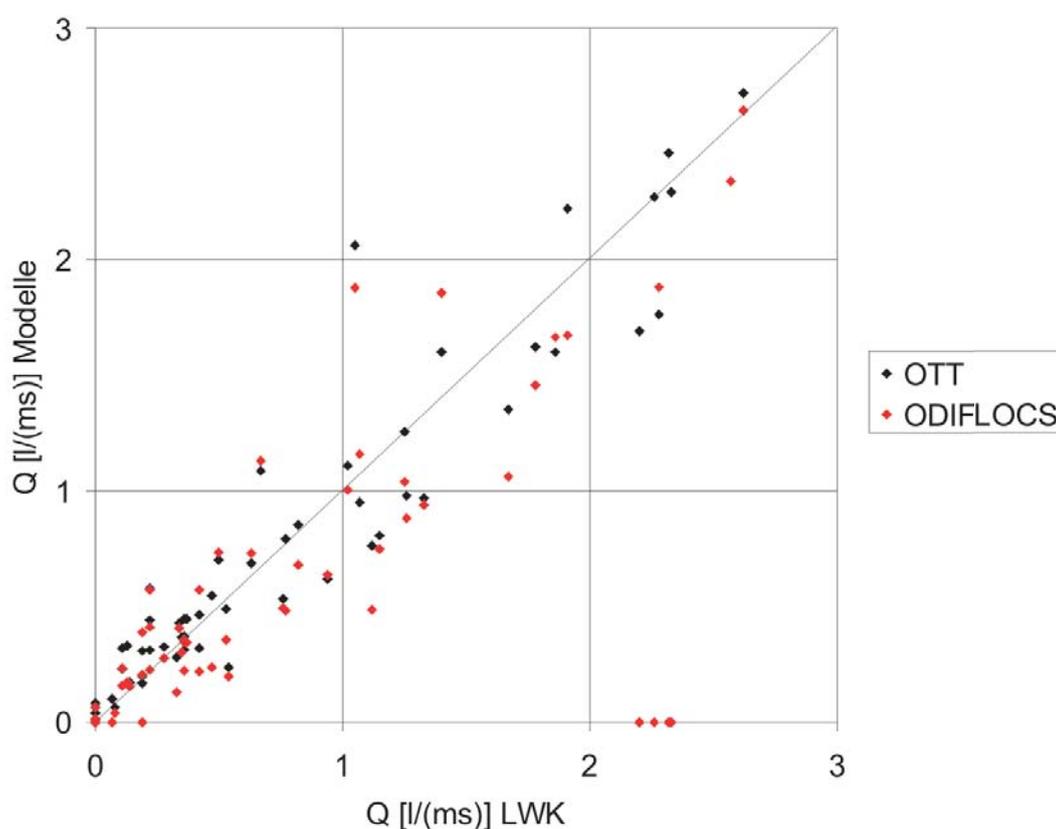


Abb. 2: Im LWK gemessene zu simulierten Überlaufsraten der Modelle ODIFLOCS und OTT-1D

Zu beachten ist hierbei jedoch, dass den Ergebnissen des Modells ODIFLOCS eine Modellkalibrierung vorhergeht (NIEMEYER et al., 2002), 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) (Abb. 2) – ein Hinweis auf die im Prinzip gleichartige Arbeitsweise der Modelle.

Tab. 2: Mittlerer absoluter und relativer Fehler der Überlaufrate der Modelle ODIFLOCS und OTT bei den Versuchen im Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts

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

4.2 Versuche im Großen Wellenkanal

Mit den Versuchen aus dem Großen Wellenkanal (GWK) von OUMERACI et al. (2001) (KFKI-Forschungsvorhaben Wellenüberlaufbelastung von Deichbinnenböschungen – 003KIS009) liegen zum ersten Mal großmaßstäbliche Versuche mit detailliert gemessenen Parametern des Wellenauf- und -überlaufs vor.

4.2.1 Versuchsanordnung

Der GWK hat eine Länge von 324 m, eine Breite von 5 m und eine Tiefe von 7 m. Regelmäßige Wellen bis zu einer Größe von 2,0 m und spektrale Wellen bis zu einer Größe von $H_{m0} = 1,4$ m können im GWK erzeugt werden. Die Versuche zum Wellenauf- und -überlauf 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 (Abb. 5).

Wasserspiegelauslenkungen werden an 2 Wellenharfen und 9 einzelnen Wellendrähten (WG3 – WG11) gemessen (Abb. 4). Die dort gemessenen Auslenkungen können als Rand-

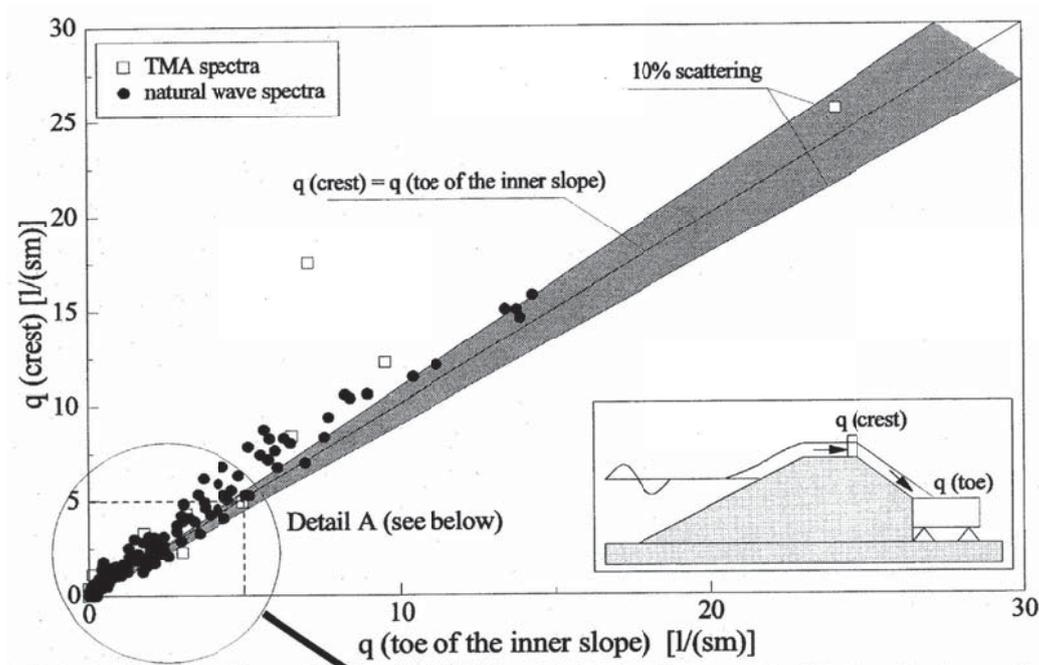


Abb. 3: Vergleich der an beiden Messpositionen gemessenen mittleren Auflaufraten (aus: OUMERACI et al., 2001)

bedingungen für die numerischen Modelle verwendet werden. Das gesamte Messprogramm des KFKI-Forschungsvorhabens umfasste die Messung von Wellenaufbauhöhen, Schichtdicken, Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverhältnissen in der Auflaufzunge sowie Messungen der Überströmungsvolumen und Überlaufraten (OUMERACI et al., 2001). Die Volumen wurden einmal über einen 1,2 m breiten Auffangbehälter auf der Deichkrone, zum anderen über einen Auffangcontainer mit einer Breite von 0,34 m am binnenseitigen Böschungsfuß gemessen. Eine Gegenüberstellung von beiden Messungen zeigt, dass Unterschiede von deutlich über 10 % auftreten (Abb. 3). Dabei werden tendenziell auf der Deichkrone höhere Raten gemessen als am binnenseitigen Deichfuß. Aufgrund von kleinen Geometrieabweichungen der inneren Deichböschung empfiehlt OUMERACI et al. (2001), die Messung auf der Deichkrone für weitere Auswertungen zu verwenden.

Die Höhe des Wellenaufbaus auf der Außenböschung wird mit einem digitalen Pegel in Kanalmitte mit einer Höhenauflösung von 4,1 cm gemessen. Der digitale Pegel gibt im jewei-

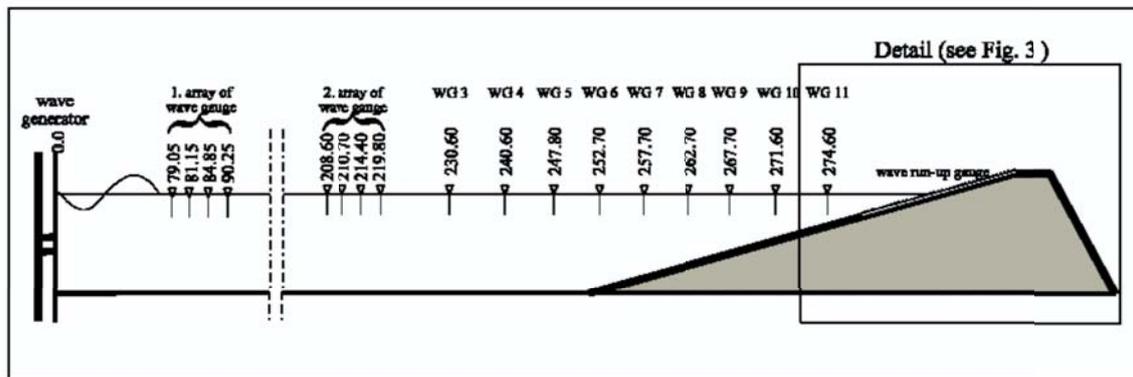


Abb. 4: Lage der Wellenharfen und -messdrähte im GWK (aus: OUMERACI et al., 2001)

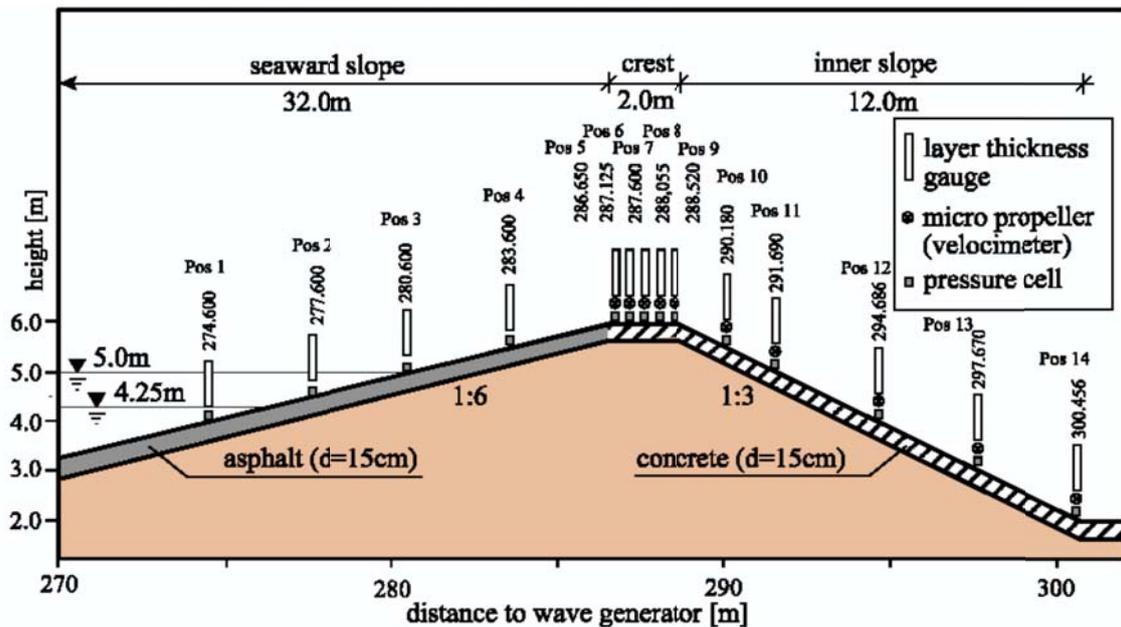


Abb. 5: Deichgeometrie und Lage der Messstellen auf den Deichböschungen des GWK (aus: OUMERACI et al., 2001)

ligen Segment ein Signal, wenn er mit Wasser in Kontakt kommt, die Schichtdicken der Auflaufungen werden mittels am Kanalrand angebrachter Schichtdickensensoren gemessen OUMERACI et al. (2001).

4.2.2 Versuchsprogramm

Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen, in denen vor allem standardisierte Wellenspektren und regelmäßige Wellen untersucht wurden, liegt der Schwerpunkt dieser GWK-Versuche auf natürlichen Spektren. Diese natürlichen Spektren stammen größtenteils 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 beispielsweise die Ausprägung von zwei oder drei Hauptfrequenzen, die durch die Filterwirkung der Watten zusammen mit den damit einhergehenden triadischen Wellen-Wellen-Wechselwirkungen entstehen. Neben den verwendeten natürlichen Spektren sind noch TMA-Flachwasserspektren, JONSWAP-Spektren und regulärer (monochromatischer) Seegang im GWK untersucht worden.

4.2.3 Modellbildung

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.

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 Einhaltung des Courant-Friedrich-Levy-Kriteriums liegt bei $\Delta t = 0,1$ s. Die Sohlreibung wurde in beiden 1D-Modellen OTT-1D und ODIFLOCS mit einem Rauigkeitsbeiwert $f_w = 0,01$ berücksichtigt, was einer recht glatten Sohle entspricht; die Böschung des Modelldeiches im GWK bestand aus Asphaltbeton (OUMERACI et al., 2001). Die Randbedingung wird am seeseitigen Modellrand vorgegeben. Sie wird entweder mit Hilfe von gemessenen Zeitreihen von Wasserspiegelauslenkungen oder über ein Spektrum formuliert. Wird ein Spektrum definiert, wird daraus ein per Zufallsgenerator zusammengesetzter Wellenzug aus linearen Wellen erzeugt. Die gemessenen Auslenkungen enthalten Reflektionen von der Deichböschung her, die für die Randwerteingabe mittels Spektren herausgefiltert werden müssen. BALDOCK und SIMMONDS (1999) geben dazu eine Methode an, die auch für geneigte Gewässersohlen gilt.

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 dieser Unterschied jedoch keine Rolle. Die Bestimmung der Durchflüsse auf der Deichkrone erfolgt immer in der Mitte der Deichkrone, wo auch im physikalischen Versuch der Auffangbehälter angeordnet ist.

Ein modelltechnisch wichtiger Parameter ist die kleinste zu berechnende Wassertiefe d_{\min} an der sich vor und zurück bewegende Auflaufzunge. Sie ist so geringmächtig einzustellen, dass die geringste im physikalischen Versuch auftretende Schichtdicke der Wellenaufzunge wiedergegeben werden kann. Um eine Vergleichbarkeit der beiden Modelle zu gewährleisten, ist d_{\min} für beide Modelle auf ca. $d_{\min} = 0,001$ m gesetzt. Mit diesem Wert konnten beide Modelle betrieben werden, ohne dass dies zu langen Rechenzeiten und zu vielen numerischen Instabilitäten des Modells ODIFLOCS führte.

4.2.4 Modellergebnisse – exemplarischer Vergleich der Wellenauflaufhöhe

Der zeitliche Verlauf von gemessenen und mit OTT-1D berechneten Auflauhöhen wird hier exemplarisch dargestellt (Abb. 6) (Versuch 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 25 m vom Böschungsfuß entfernt (WG3) und direkt am Böschungsfuß des Modelldeiches (WG6 – Abb. 4). Die simulierten Auflaufereignisse stimmen sowohl bezüglich Zeitpunkt und Dauer als auch in ihren Intensitäten gut mit der Messung überein. Anhand der Verläufe sind optisch in dem dargestellten Zeitintervall kaum Unterschiede auszumachen.

Eine Auswertung der Zeitreihen bezüglich Korrelation und Fehler zeigt jedoch, dass die Aufläufe bei kleinem Modellgebiet (WG6) besser korrelieren und einen kleineren mittleren Fehler aufweisen. Die größere Streuung bei Verwendung des großen Modellgebietes ist neben der größeren numerischen Dispersion des Modells auch der fehlerhaften physikalischen Beschreibung der Wellenzüge bei längeren Laufstrecken zurückzuführen (Abb. 1). Um den

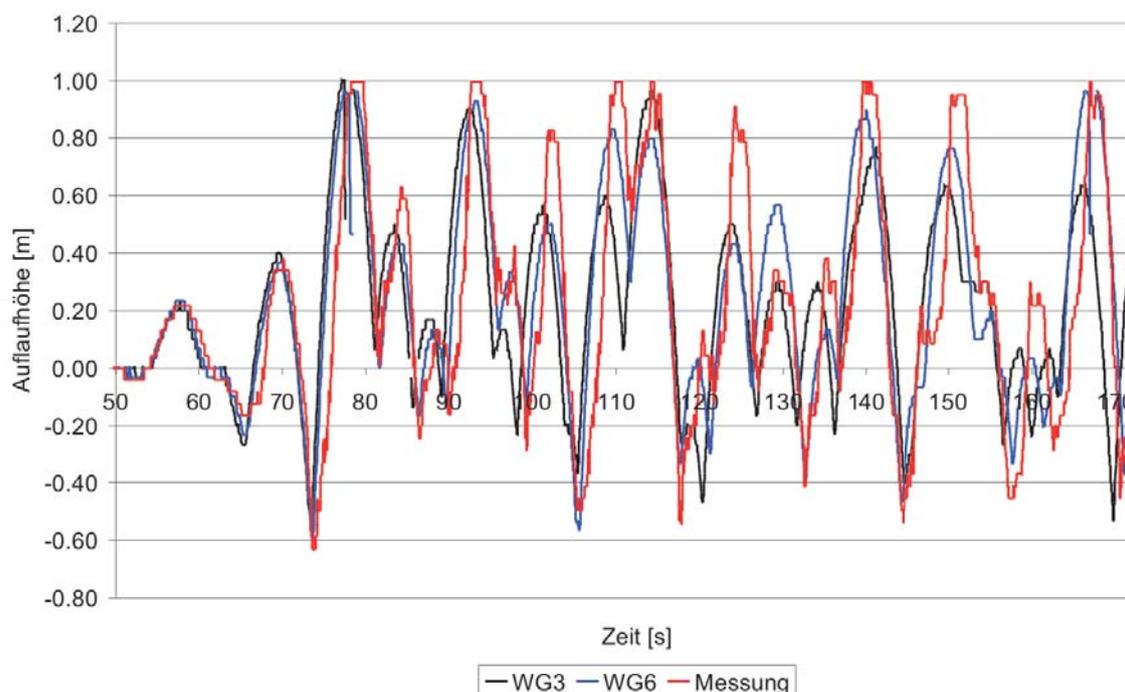


Abb. 6: Beispiel für gemessene und mit OTT-1D berechnete Wellenauflaufhöhen (GWK) für zwei Modellgebietsgrößen (WG3 – großes Modellgebiet, WG6 – kleines Modellgebiet)

numerischen und physikalischen Fehler möglichst gering zu halten, sollte der seeseitige Modellrand von Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen daher möglichst nahe am Wellenbrechpunkt liegen.

4.2.5 Modellergebnisse – Vergleich der mittleren Überlaufsraten

Die Versuche im GWK hatten eine Dauer, die etwa dem 200-fachen der jeweiligen Peakperiode des Seegangsspektrums entsprach. Sie waren daher ausreichend lang, um einen verlässlichen zeitlichen Mittelwert der Überlaufvolumen zu bestimmen.

Die für den Vergleich gewählten Naturspektren sind größtenteils an deutschen Wattenküstenabschnitten gemessen worden. Die Spektren bewegen sich bezüglich der Wellenhöhe H_{m0} im Bereich von $0,6 \text{ m} < H_{m0} < 1,0 \text{ m}$ und für die Periode des Energiedichtemaximums im Bereich $4,34 \text{ s} < T_p < 12,68 \text{ s}$, wobei der Hauptanteil der Versuche Perioden von $4,6 < T_p < 6,4 \text{ s}$ liegt. Die Randbedingungen sind als Zeitreihen direkt am Böschungsfuß vorgegeben (WG6 siehe Abb. 4).

Die gemessenen und mit ODIFLOCS und OTT-1D simulierten Überlaufsraten sind verglichen worden (Abb. 7). Beide Modelle unterschätzen tendenziell die Überlaufsraten um etwa 30 %, was aus der Lage der Regressionsgerade ersichtlich ist (Abb. 7). Hauptursache für diese systematische Unterschätzung in beiden Modellen ist die modellinhärente numerische Dispersion. Das Modell ODIFLOCS weist einen etwas größeren absoluten und relativen mittleren Fehler auf als OTT-1D (Tab. 3). Als Maß für die Streuung der Ergebnisse wird der Korrelationskoeffizient R verwendet. Er beträgt für das Modell OTT-1D $R = 0,91$ für ODIFLOCS ist $R = 0,85$, beides eine starke Korrelation.

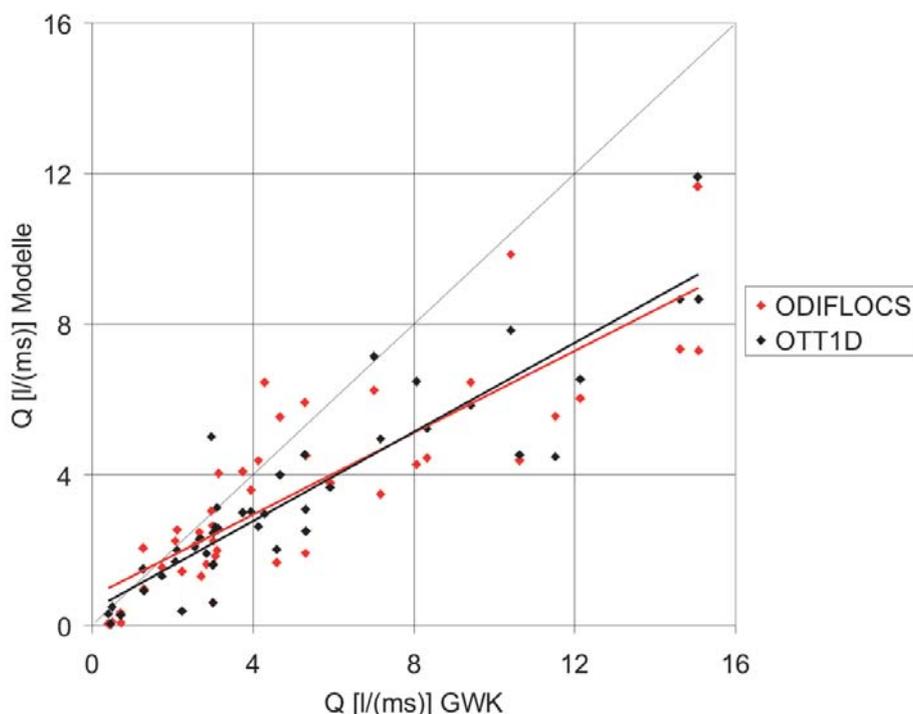


Abb. 7: Gemessene und berechnete Überlaufsraten für Untersuchungen mit Naturspektren im GWK, Randbedingung am Böschungsfuß (Diagramm enthält Regressionsgeraden)

Tab. 3: Mittlere absoluter und relativer Fehler der berechneten Überlauftrate (ODIFLOCS und OTT)

	Absoluter Fehler	Relativer Fehler	Korrelationskoeff.
OTT-1D	1,75 l/(sm)	34 %	0,91
ODIFLOCS	1,82 l/(sm)	38 %	0,85

Das Gesamtergebnis des Modells OTT-1D ist bezüglich Fehlergröße, Lage der Regressionsgerade und Streuung besser als das von ODIFLOCS. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die benötigte Prozessorzeit (Rechenzeit) von ODIFLOCS um ca. das 8-fache im Vergleich zum Modell OTT-1D erhöht ist.

Zur Einordnung der Qualität der Modellergebnisse sind zwei empirische Formeln für die mittlere Wellenüberlauftrate herangezogen worden. Die Anwendung einer solchen Formel ist aufgrund der großmaßstäblichen Verhältnisse des GWK gerechtfertigt, ohne dass Maßstabseffekte berücksichtigt werden müssten. SCHÜTTRUMPF et al. (2001) schlägt eine empirische Formel (Gleichung 1) zur Berechnung der mittleren Überlauftrate Q [l/(ms)] vor, die mit Hilfe der Variablen $b = 4,32$ (für Wattspektren) 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 daher um einen spezifisch auf die Untersuchungen im GWK kalibrierten, empirischen Berechnungsansatz.

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

Gleichung 1

R_c steht für den Freibord (Abstand vom Ruhewasserspiegel zur Deichkrone) und ξ_d für die Irribarren-Zahl (Brecherindex). Gleiches gilt für die in der Bemessungspraxis häufig angewandte Formel von JANSSEN und VAN DER MEER (1995, 1998), die nachstehend formuliert ist:

$$Q = \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot \xi_d \cdot 0,06 \cdot \exp\left(-5,2 \cdot \frac{R_c}{H_s \cdot \xi_d}\right) \cdot 10^3 \quad \text{für} \quad \xi_d = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s \cdot L_0}} < 2,0$$

Gleichung 2

und

$$Q = \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot 0,2 \cdot \exp\left(-2,6 \cdot \frac{R_c}{H_s}\right) \cdot 10^3 \quad \text{für} \quad \xi_d = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s \cdot L_0}} > 2,0$$

Gleichung 3

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse beider empirischer Ansätze mit den Messergebnissen ist in Abb. 8 zu sehen.

Der mittlere absolute und relative Fehler sind bei dem Ansatz nach VAN DER MEER (1995, 1998) höher als bei dem von SCHÜTTRUMPF et al. (2001) (Tab. 4). Dabei muss bemerkt werden, dass SCHÜTTRUMPF et al. (2001) Gleichung 1 auf der Grundlage des hier verwendeten Versuchsreihen formuliert hat, und diese somit die bestmögliche Anpassung an die Messergebnisse darstellt. Die Streuung der Ergebnisse nach dem Ansatz von SCHÜTTRUMPF et al. (2001)

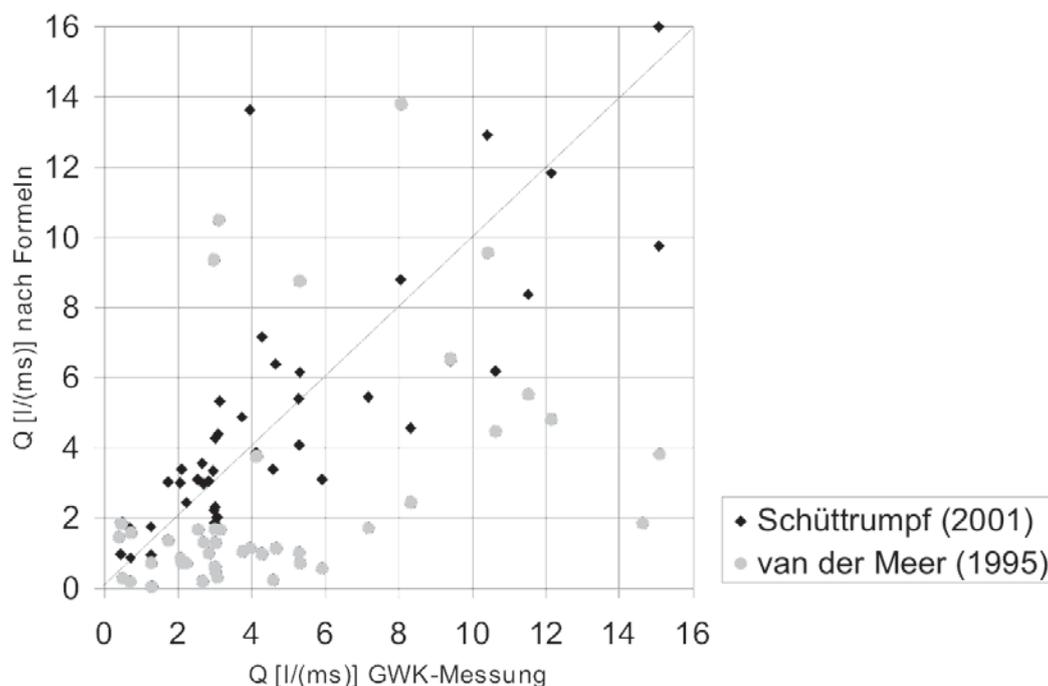


Abb. 8: Gemessene zu berechnete Überlaufzeiten der GWK-Versuche mit natürlichen Spektren

ist dennoch groß, was sich auch im Korrelationskoeffizienten ausdrückt. Die mathematischen Modelle hingegen haben eine geringere Streuung und erzielen im Vergleich auch bessere Ergebnisse bezüglich des absoluten und relativen Fehlers (Tab. 3); die Korrelationskoeffizienten sind deutlich höher.

Tab. 4: Mittlere absoluter und relative Fehler der Überlaufformeln von VAN DER MEER (1995, 1998) und SCHÜTTRUMPF et al. (2001) der 45 GWK Versuche

	Absoluter Fehler	Relative Fehler	Korrelationskoeff.
van der Meer	4,37 l/(sm)	96 %	0,30
Schüttrumpf	1,84 l/(sm)	53 %	0,75

5. Modellbetrieb

5.1 Zur Art und Lage der seeseitigen Randbedingung

Um den Einfluss der Entfernung der seeseitigen Modellrandes vom Böschungsfuß auf die Qualität der modellierten mittlere Überlaufzeit zu untersuchen, ist das Modell OTT-1D für die oben beschriebenen Versuche mit unterschiedlich großen Modellgebieten – bei Beibehaltung des ursprünglichen räumlichen Diskretisierungsschrittes Δx – betrieben worden. Es sind die gemessenen Auslenkungen von Position WG6 (Böschungsfuß), WG3 (Böschungsfuß + 22,1 m) und H2 (Böschungsfuß + 44,1 m) verwendet worden.

OTT-1D unterschätzt tendenziell die Auflaufzeiten (Abb. 9). Die Regressionsgeraden zeigen, dass diese Unterschätzung mit zunehmendem Abstand des Modellrandes vom Böschungsfuß zunimmt. Ursächlich für die systematische Unterschätzung ist die numerische

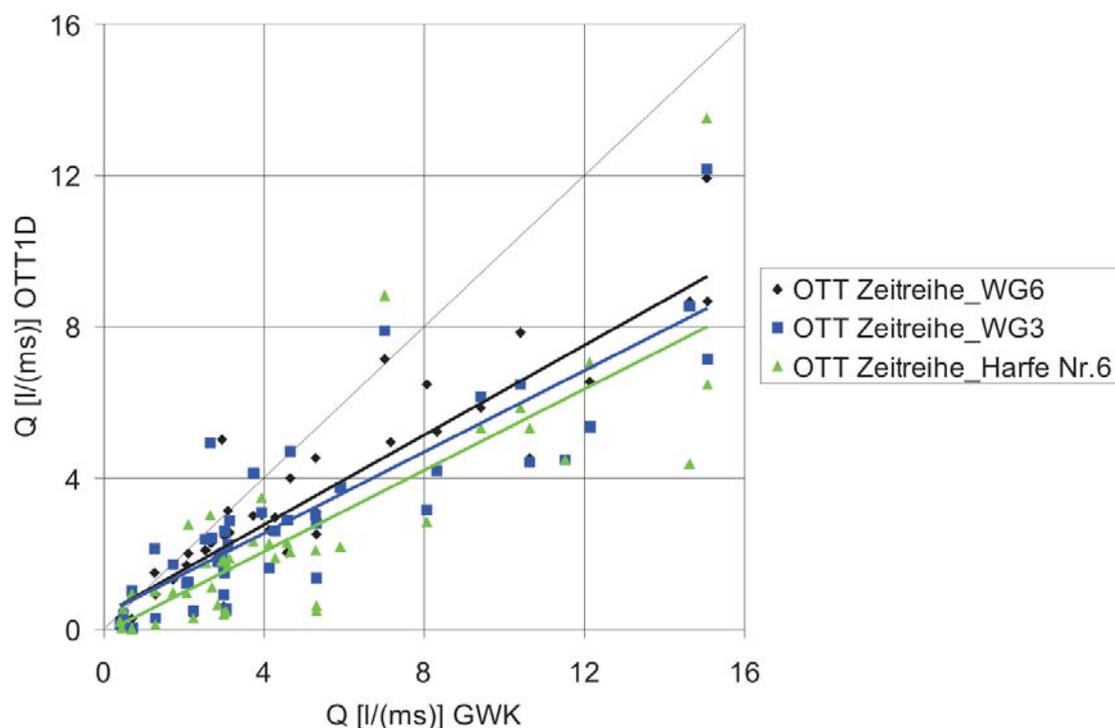


Abb. 9: Gemessene zu simulierten Überlaufsraten (OTT-1D) bei Randwertvorgaben mittels Zeitreihen der gemessenen Auslenkungen (Diagramm enthält Regressionsgeraden)

Dispersion; eine Zunahme der Rechenknoten bei den vergrößerten Modellgebieten (WG3 und Harfe 6, Abb. 9) führt zu einem größeren Einfluss der numerischen Dispersion und in dessen Folge zu geringeren Überlaufsraten.

In einer weiteren Versuchsreihe ist die Art der verwendeten Randbedingung geändert worden. So sind nicht die an der Messstelle WG3 gemessenen Wasserspiegelauslenkungen, sondern die daraus generierten Spektren als Randbedingung vorgegeben worden. Der offene Rand liegt dabei einmal direkt am Böschungsfuß und in einer Entfernung von jeweils einer und zwei Wellenlängen vom Böschungsfuß entfernt. Da die Generierung von Wasserspiegelauslenkungen aus den Spektren – die ja nach wie vor als Randbedingung benötigt werden – im Modell OTT-1D per Zufallsgenerator erfolgt, sind die Modellläufe mit spektralen Randbedingungen jeweils drei Mal durchgeführt worden. Das arithmetische Mittel der drei Versuchsergebnisse ist als Ergebnis des Modells OTT-1D gewertet worden (Abb. 10).

Die besten Ergebnisse werden bei Lage des offenen Modellrandes am Böschungsfuß erzielt. Ebenso bei Vorgabe der Randbedingung über Wasserspiegelauslenkungen verschlechtern sich die Modellergebnisse mit dem Abstand vom Böschungsfuß. Die tendenzielle Unterschätzung der Überlaufsraten beträgt im Mittel ca. 10 %, wenn der Modellrand am Böschungsfuß liegt, wie bei Eingabe der Randbedingungen über gemessene Wasserspiegelauslenkungen.

Bei Lage des offenen Modellrandes direkt am Böschungsfuß werden durchweg die besten Ergebnisse erzielt. Je weiter weg der Modellrand seawärts verschoben ist, desto größer werden die Fehler (Tab. 5).

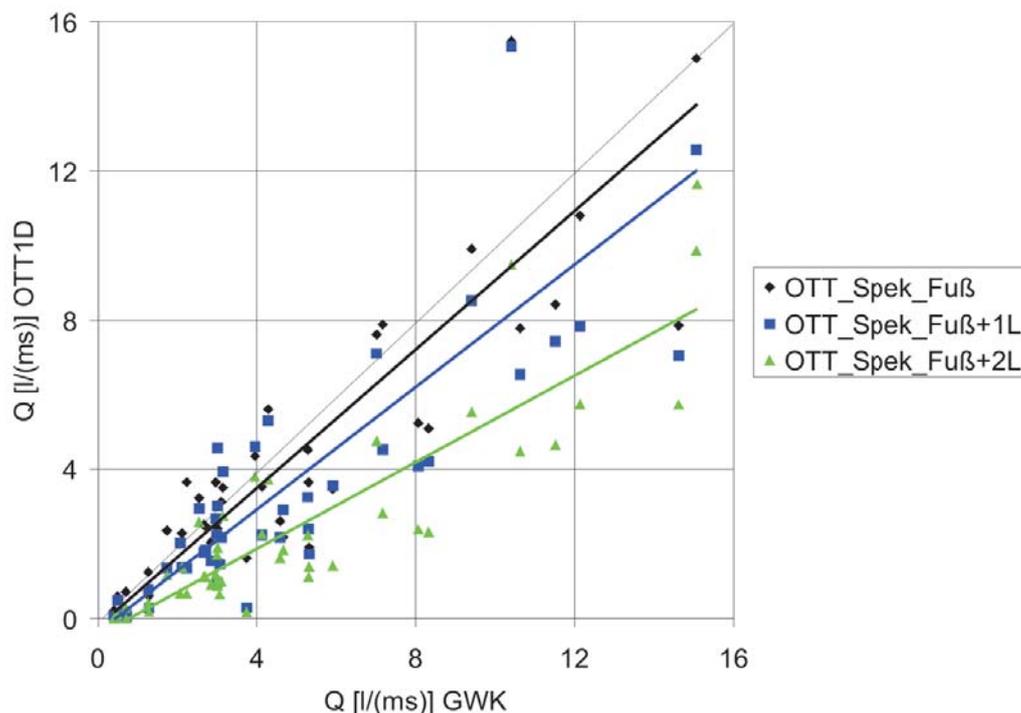


Abb. 10: Vergleich modellierter Überlaufsraten (OTT-1D) aus Spektren bei unterschiedlicher Lage des Modellrandes (Diagramm enthält Regressionsgeraden)

Tab. 5: Vergleich der simulierten Überlaufsraten (OTT-1D) bei Randwertvorgaben über ein Spektrum

	Böschungsfuß absolut / relativ	1L bzw. WG3 absolut / relativ	2L bzw. Harfe H2 absolut / relativ
Auslenkungen direkt	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 %

Dabei ist zu beachten, dass die Fehler der letzten Spalte nicht direkt miteinander vergleichbar sind, da die Größen der Modellgebiete der Versuche „2L“ um bis zu 50 % zu den Versuchen „Harfe H2“ abweichen. Daher ist wegen besserer Vergleichbarkeit der relativen Fehler auch als Funktion der Größe des Modellgebietes – in prozentualer Zunahme der Rechenknotenanzahl ausgehend vom kleinsten Modellgebiet – dargestellt worden (Abb. 11).

Generell ist die Güte der Berechnungsergebnisse bei Verwendung eines Spektrums als Randbedingung besser als bei Verwendung der direkt gemessenen Wasserspiegelauslenkungen. Diese Erkenntnis ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der im MAST3-Projekt OPTICREST ausgeführten Untersuchungen mit dem mathematischen Modell ODIFLOCS (DE ROUCK et al., 2002). Bemerkenswert ist auch, dass dies auch für Versuche mit kleinen mittleren Überlaufsraten von 0,21–2,0 l/(sm) zutrifft. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass nichtlineare Auslenkungen in einem Flachwassermodell eine stärkere numerische Dispersion erfahren als lineare Auslenkungen. Die linearen Flachwassergleichungen sind mit den nichtlinearen Auslenkungen gleichsam überfordert und glätten diese stärker als lineare Auslenkungen. Eine detaillierte Erläuterung für diese Hypothese steht jedoch aus.

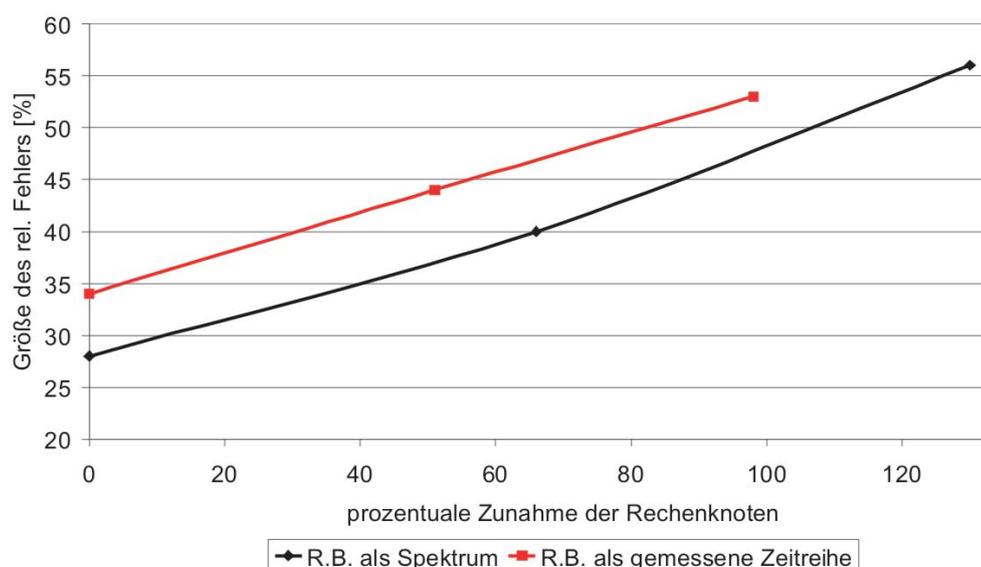


Abb. 11: Zunahme des relativen Fehlers bei Vergrößerung des Modellgebietes

Für die Praxis der Modellanwendung ist dies von erheblicher Bedeutung, da in der Regel keine bemessungsrelevanten Zeitreihen von Wasserspiegelauslenkung, sondern meist berechnete oder gemessene Spektralinformationen zur Verfügung stehen.

Die Untersuchungen mit den aus Spektren generierten Randwerten machen weiterhin deutlich, dass die Verringerung der Überlaufsraten bei vergrößertem Modellgebiet allein auf den Einfluss der modellinhärenten numerischen Dispersion zurückzuführen ist, da bei Verwendung eines Spektrums physikalische Fehler in der verfälschten Wiedergabe der Wellenabfolge ursächlich ausscheiden. Das numerische Modell OTT-1D verliert durch numerische Dispersion an jedem Rechenknoten ein gewisses Quantum an Impulsenergie. Bei großen Wellenlaufstrecken ergeben sich so relevante Energieverluste, die sich in einer zunehmenden Dämpfung des Modellseegangs und daraus resultierend in kleineren mittleren Überlaufsraten niederschlagen.

Festzuhalten ist, dass allein die modellinhärente numerische Dispersion eine Anwendung von OTT-1D über größere Wellenlängen entgegenspricht. Andere, physikalisch bedingte Fehler, wie die Abweichungen in der Wiedergabe der Wasserspiegellagen (vgl. Abb. 1) sind bezüglich der Ergebnishüte für mittlere Überlaufsraten als sekundär einzustufen.

5.2 Definition des Rauigkeitsbeiwertes

Der Rauigkeitsbeiwert ist ein Maß für den Widerstand, den die Gewässersohle auf die Strömung ausübt. Im Allgemeinen wird der Rauigkeitsbeiwert für turbulente, hydraulisch rauhe Verhältnisse angegeben. Die geometrische Höhe k der Rauigkeitselemente oder der Sohle hat den Haupteinfluss auf die Rauigkeitswirkung. Je höher die Rauigkeitselemente, desto höher ist im Allgemeinen ihre Rauigkeitswirkung auf die zeitlich gemittelte Wasserbewegung. Für die alternierenden Strömungen unter Wellen geht neben der eigentlichen Sohlrauheit noch die Wellenperiode in den Rauigkeitsbeiwert $f_w = f(T, k)$ mit ein. Daher muss

zwischen Rauigkeitsbeiwerten für Strömungen f und für den für Wellen f_w unterschieden werden.

Zur Bestimmung der Rauigkeitsbeiwerte schlägt VAN GENT (1994) die Formel von MADSEN UND WHITE (1975) für vollturbulente Strömungen auf geneigten Wellenbrechern vor. Für glatte Böschungen gibt VAN GENT einen Wert von $f = 0,02$ an, für Betonböschungen gibt SCHULZ (1992) Rauigkeitsbeiwerte von $0,017$ – $0,022$ an. Das Modell OTT arbeitet mit dem Rauigkeitsbeiwert für wellenerzeugte Strömung f_w (DODD, 1998). Der Wert f_w berücksichtigt die Wirkung einer alternierenden turbulenten Grenzschicht auf die Wellenströmung. Welcher Reibungsbeiwert anschaulich für auflaufende Wellen besser geeignet ist, lässt sich nicht abschließend klären, da auch in der Literatur für Wellenauflaufströmungen unterschiedliche Angaben gemacht werden. In den hier dargestellten Untersuchungen sind die Angaben für die physikalischen Modellversuche als Rauigkeitsbeiwert verwendet worden. Je höher der Rauigkeitsbeiwert, desto größer ist die Energieverlust der Strömung und umso schwächer sind die Auflaufströmungen und die mittleren Überlaufsraten (Abb. 12). Im Sinne einer Bemessung auf der „sicheren Seite“ sollte im Zweifelsfall ein kleinerer Rauigkeitsbeiwert gewählt werden.

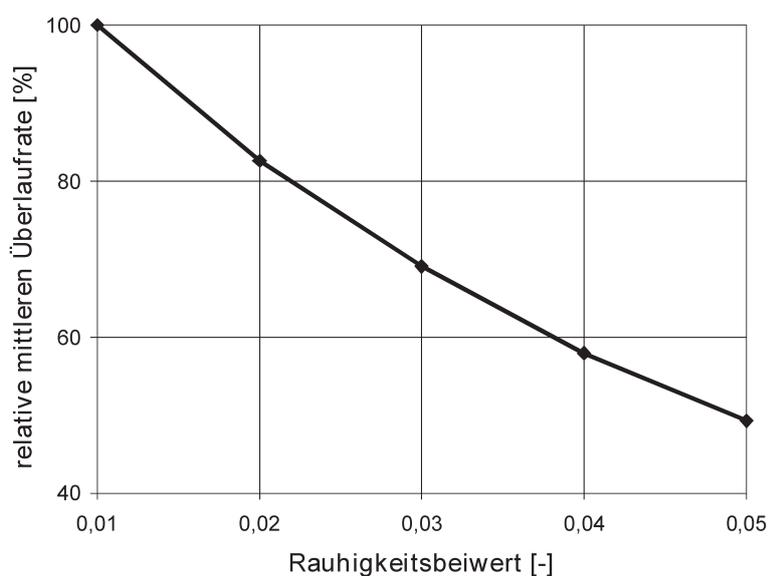


Abb. 12: Abhängigkeit der erzielten mittleren Überlaufsraten vom Rauigkeitsbeiwert. Auswertung aller GWK-Versuche als prozentualer Mittelwert

5.3 Numerische Einstellungen

Die verwendeten Flachwassermodelle benötigen die Vorgabe von speziellen numerischen Einstellungen. Der räumliche Diskretisierungsschritt Δx kann für naturmaßstäbliche Anwendungen $\Delta x \approx 0,25$ m gewählt werden. Für die expliziten numerische Schemata bestimmt sich der größtmögliche Rechenzeitschritt nach dem Courant-Friedrichs-Lewy-Kriterium $\Delta t < \Delta x / (c+v)$, wobei mit c die Wellengeschwindigkeit im Flachwasser und mit v die Strömungsgeschwindigkeit einer Grundströmung bezeichnet ist.

Die minimale Wassertiefe d_{\min} , die vom Modell berechnet werden soll, muss einerseits klein genug sein, um die Wellenauflaufzunge hydrodynamisch richtig beschreiben zu kön-

nen. Andererseits wiederum groß genug, damit die Rundungsfehler in der numerischen Berechnung der diskreten Geschwindigkeits- und Schichtungsgradienten nicht zu Instabilitäten führen. Ein Modellbetrieb mit Größen von d_{\min} im Millimeterbereich ist problemlos möglich. Die Stabilität des Modell ODIFLOCS verbessert sich sogar, wenn die Schichtdicke geringmächtig gewählt wird (NIEMEYER et al., 2001). Die minimal berechnete Schichtdicke muss nicht immer physikalisch sinnvoll sein, wenn Modellergebnisse ausgewertet werden, so bleibt beim Zurücklaufen der Wellenzunge eine geringe Schichtdicke an Wasser zurück. Die Entscheidung, ob es sich hierbei noch um den eigentlichen Wasserkörper oder nur um eine benetzte Fläche handelt, kann man in OTT-1D mit der Definition der als Wasserschicht angesehenen Schichtdicke d_{Rand} machen, wobei immer $d_{\text{Rand}} \geq d_{\min}$ gelten muss. Die Rechenzelle, an der d_{Rand} überschritten wird, ist die sich bewegende Auflaufzunge. Anschaulich ist d_{\min} die beobachtete Wasserlinie, d_{Rand} die von einem Pegel messbare Wasserlinie, welche auch für Ergebnisauswertungen relevant ist. Für die Auswertung von Überlaufvolumen ist in dieser Arbeit durchgängig $d_{\text{Rand}} = d_{\min}$ gesetzt worden.

5.4 Empfehlungen zur Anwendung von Flachwassermodellen

Bei der Anwendung von Modellen auf Grundlage der Flachwassergleichungen zur Berechnung von Wellenauf- und -überlauf sollte Folgendes beachtet werden:

- Seewärtige Eingrenzung des Modellgebietes am Bauwerksfuß, der seeseitige Modellrand soll in der Nähe des Wellenbrechpunktes sein.
- Einsteuerung von linearen Wellenzügen, die per Zufallsgenerator aus einem gemessenen oder berechneten Seegangsspektrum erzeugt wurden, ist möglich. Die mittleren Überlaufsraten sollten dann um etwa 10 % erhöht werden, um die numerische Dämpfung zu kompensieren. Gegebenenfalls ist ein Sicherheitszuschlag vorzusehen.
- Der Rauigkeitsbeiwert sollte bauwerksspezifisch aus Literaturangaben bzw. verfügbaren Messungen entnommen werden. Dabei soll der Rauigkeitswert möglichst speziell für die Auflaufströmung ermittelt worden sein.

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 ODIFLOCS ist grundsätzlich numerisch instabiler. Eine verbesserte Stabilität lässt sich in den meisten Fällen durch eine geeignete Parameterwahl (minimale Schichtdicke, Rauigkeitsbeiwert) erzielen. Diese stimmen allerdings nicht zwangsläufig mit den physikalischen Randbedingung überein.
- ODIFLOCS benötigt etwa die 8-fache Rechenzeit.
- ODIFLOCS reagiert sensitiver gegenüber physikalisch falschen Randbedingungen – beispielsweise die Vorgabe einer linearen Wellenform im Flachwasser – mit instabilen Rechenprozessen (Programmabbruch).
- Die Ergebnisse des mit Standardeinstellungen angewandten Modells OTT-1D sind etwas besser.
- Das Modell OTT-1D ist in der Lage, mehrere Wasserkörper (Binnenböschung, Wellengeneration in Lee) zu modellieren und bietet somit vielfältigere Anwendungsmöglichkeiten.

6. Diskussion und Zusammenfassung der Modellergebnisse

Zwei numerische Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen sind bezüglich des Wellenauf- und -überlaufs kalibriert und mit Labormessungen im Wellenkanal des Leichtweiß-Institutes und im Großen Wellenkanal in Hannover (GWK) validiert worden. Der Schwerpunkt der Modellvalidierung lag auf dem Vergleich von zeitlich gemittelten Überlaufraten. Die Modelle arbeiten stabil mit einem geringen Rechenzeitbedarf. Beide Modelle bedürfen nur weniger Modelleinstellungen.

Die Schwäche von Flachwassermodellen, die nichtlinearen Wellen-Wellen-Interaktionen vor dem Wellenbrechpunkt nicht modellieren zu können, erweist sich in Bezug auf die Verwendung von linearen Wasserspiegelauslenkungen als Randbedingung aus einem Spektrum als Vorteil. Beim Fortschreiten von linearen Wellenzügen bis zum Wellenbrechpunkt bleibt offensichtlich mehr Energie erhalten als bei der Einspeisung von gemessenen, nichtlinearen Auslenkungen. Es stellt daher keinen Vorteil dar, nichtlineare Auslenkungen in Flachwassermodellen als Randbedingungen zu verwenden. Diese Erkenntnis ist für die Modellanwendung von erheblicher Bedeutung, da in der Praxis nur sehr selten eine bemessungsrelevante Zeitreihe von Wasserspiegelauslenkungen zur Verfügung steht. So können die Modelle mit gemessenen oder berechneten bemessungsrelevanten Spektren betrieben werden. Die Untersuchungen legen vielmehr den Schluss nahe, dass die Qualität des Spektrums, welches zur Randwerteingabe verwendet wird, direkt die Qualität der Berechnungsergebnisse beeinflusst. Auf die vorgeschlagene Zwischenschaltung eines Boussinesq-Wellenmodells (VAN GENT und DOORN, 2001), welches die nichtlinearen Transformationen im Übergangs- und Flachwasserbereich simuliert, kann daher für den Wellenauf- und -überlauf verzichtet werden. Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes verwenden aus Messungen abgeleitete 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.

Der Vergleich mit einer Berechnungsformel für Wellenüberlauf von SCHÜTTRUMPF (in: OUMERACI et al., 2001) macht deutlich, welcher Qualitätssprung mit numerischen Modellen hinsichtlich der Berechnung von mittleren Überlaufraten erreicht werden kann. Die Ergebnisse empirischer Formeln weisen größere Fehler auf und haben darüber hinaus eine stärkere Streuung, die es nicht erlaubt, ein eng begrenztes Fehlermaß abzuschätzen. Hingegen zeigt sich, dass die mathematischen Modelle die mittleren Überlaufraten systematisch unterschätzen, wobei der Hauptanteil der Unterschätzung der modellinhärenten numerischen Dispersion zuzuschreiben ist. Da es sich jedoch um einen systematischen Fehler handelt, ist eine entsprechende Kalibrierung problemfrei und sicher möglich.

Die wesentlichen Ergebnisse der eindimensionalen Modelluntersuchungen sind:

- Generell sind Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen in der Lage, Auflaufhöhe- und -intensität von individuellen Auflaufereignissen naturähnlich mit einer starken Korrelation zu den Messwerten wiederzugeben. Das Modell OTT-1D erzielt einen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,81$, wenn der linke Modellrand in der Nähe des Wellenbrechpunktes liegt.
- Die Güte der numerischen Modelle bezüglich der Prognose von Überlaufraten ist besser als die von empirischen, aus physikalischen Modellen abgeleiteten Berechnungsformeln.
- Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn der seeseitige Modellrand möglichst nahe

am Brechpunkt liegt, hier ist dies mit dem Bauwerksfuß gleichgesetzt worden. Bei der Einspeisung von gemessenen Auslenkungen liegen die berechneten mittleren Überlaufweiten im Mittel ca. 30 % niedriger als die gemessenen. Bei Verwendung von Spektren als Randwerte ist die Unterschätzung geringer und liegt bei etwa 10 %. Dabei zeigen die Modellergebnisse eine starke Korrelation, so dass von einer systematischen Abweichung ausgegangen werden kann, die auf die modellinhärente numerische Dispersion zurückzuführen ist. Diese führt dazu, dass eine zunehmende Unterschätzung der Überlaufweiten bei größeren Modellgebieten zu beobachten ist.

- Die Modelle müssen nicht mit direkt gemessenen – in der Regel nichtlinearen – Wasserspiegelauslenkungen betrieben werden. Die Verwendung von Seegangsspektren – die dann als zufallsgesteuerte Aneinanderreihung linearer Wellenzüge am offenen Rand eingespeist werden – führt zu qualitativ gleich- oder sogar höherwertigen Ergebnissen. Voraussetzung ist, dass diese Spektren dem Flachwassereinfluss unterliegen, also annähernd in derselben Wassertiefe wie der Böschungsfuß des Bauwerkes bestimmt werden.
- Das Modell OTT-1D erzielt geringfügig bessere Ergebnisse als das Modell ODIF-LOCS. OTT-1D arbeitet stabiler und hat einen geringeren Rechenzeitbedarf, weshalb es sich für praktische Anwendungen empfiehlt.

7. Ausblick und zukünftige Forschung

Numerische Modelle auf Basis der Flachwassergleichungen werden sich zum Stand der Technik für Wellenauf- und -überlaufberechnungen entwickeln. Das Modellprinzip hat – trotz der physikalischen und numerischen Unzulänglichkeiten – seine grundsätzliche Tauglichkeit – auch bei Verwendung von Seegangsspektren als Randwerteingaben – bewiesen. Trotz des systematischen Modellfehlers können Flachwassermodelle nach entsprechender Kalibrierung zur Bestimmung von absoluten Überlaufweiten genutzt werden. Der Kosten- und Zeitaufwand für numerische Modelluntersuchungen ist im Vergleich zu physikalischen Modellen viel geringer; wobei sich die Effizienz mit der Anzahl der zu untersuchenden Entwurfsalternativen noch vervielfältigt.

Die Validierung weiterer Parameter wie Schichtdicken und Strömungsgeschwindigkeiten ist möglich und wird in Zukunft angestrebt. Dies wird den Einsatzbereich der Modelle auf zukünftige Bemessungsverfahren erweitern. Zweidimensionale Untersuchungen sind im Forschungsprojekt „Optimierung von Deichprofilen – Mathematische Modellierung von Wellenauf- und -überlauf“ KIS 03KIS032 ebenfalls durchgeführt wurden (NIEMEYER et al., 2004). Eine Validierung des zweidimensionalen Modells OTT-2D konnte aufgrund der Modellkonfiguration nicht durchgeführt werden. Zweidimensionale Modellanwendungen sind daher z. Zt. auf relative Aussagen im Rahmen von Variantenuntersuchungen beschränkt.

8. Danksagung

Dieser Artikel enthält Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Optimierung von Deichprofilen – Mathematische Modellierung von Wellenauf- und -überlauf“ (03KIS032) des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Die Autoren danken den Kollegen vom

Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, insbesondere H. Schüttrumpf, für die Bereitstellung von Versuchsdaten aus dem KFKI-Forschungsvorhaben „Wellenüberlaufbelastung von Deichbinnenböschungen“ (03KIS009) und N. Ohle vom Franzius-Institut der TU Hannover für die Bereitstellung von Daten aus dem Forschungsprojekt „Schräger Wellenaufbau auf Deichen und anderen Hochwasserschutzbauwerken“ (03KIS015, 03KIS016). Dank gilt auch den Kollegen R. Kaiser, D. Glaser, G. Münkewarf und A. van Hetinga der NLWKN-Forschungsstelle Küste für die vielfach gewährte Unterstützung.

9. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- BALDOCK, T. E. and SIMMONDS, D. J.: Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry, *Coastal Engr.* 38, pp 167–176, 1999.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C. and HOLTHUIJSEN, L. H.: A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions. Part I, Model Description and Validation, *J. Geophys. Research*, 104, C4, 1999.
- BURCHARTCH, H. F. and HUGHES, S. A.: Coastal Engineering Manual, Fundamentals of design Chapter 5. Part VI, CERC, Waterways Experiment Station, US Army corps of Engineering, Vicksburg, USA, 2003.
- DEAN, R. G. and DALRYMPLE, R. A.: Water wave mechanics for engineers and scientists, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Volume 2, World Scientific, Singapore, S. 368 ff., 1991.
- DE ROUCK, J.; BOONE, C. and VAN DE WALLE, B.: 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-CT97-0116, 2002.
- DE ROUCK, J.; GEERAERTS, J.; TROCH, P.; KORTENHAUS, A.; PULLEN, T. and FRANCO, L.: New Results on Scale Effects for Wave Overtopping at Coastal Structures, *Proc 5th Int. Conference on Breakwaters*, 2005.
- DODD, N.: A numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *ASCE J Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng.* 124, pp 73–81, 1998.
- HU, K.; MINGHAM, C. G. and CAUSON, D. M.: Numerical simulation of wave overtopping of coastal structure using the non-linear shallow water equation, *Coastal Engineering*, Vol. 41: pp 433–365, 2000.
- HUBBARD, M. E. and DODD, N.: Anemone: OTT-2D – A User Manual, Report TR 65, HR Wallingford, 2000.
- HUBBARD, M. E. and DODD, N.: A 2-D numerical model of wave runup and overtopping, *Coastal Eng.*, 47, 1–26, 2002.
- MADSEN, D. S. and WHITE, S. M.: Reflection and transition characteristics of porous rubble mound breakwaters, Report No. 207, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1975.
- MEI, C. C.: The applied dynamics of ocean surface waves, *Advanced Series on Ocean Engineering* Volume 1, World Scientific, Singapore, S. 764, 1989.
- NIEMEYER, H.; KAISER, R. u. WITTING, M.: Abschlußbericht zum KfKI-Forschungsvorhaben „Optimierung von Deichprofilen“, Projektnummer: 03KIS032, unveröffentlicht, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technik, 2004.
- NIEMEYER, H.; SCHULZ, D.; KAISER, R.; MÖLLER, J.; SCHÜTTRUMPF, H.; PULLEN, T. and VAN GENT, M. R. A.: Validation of mathematical modeling of wave overtopping on dykes, *Proc. ICCE 2002*, Cardiff, 2002.
- OUMERACI, H.; SCHÜTTRUMPF, H.; SAUER, W. and MÖLLER, J.: Physical Model Tests on Wave Overtopping with Natural Sea States. LWI-Report No. 852, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Braunschweig, 2000.
- OUMERACI, H.; SCHÜTTRUMPF, H.; MÖLLER, J. and KUDELLA, M.: Loading of the Inner Slope of Seadikes by Wave Overtopping, LWI-Report No. 858, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Braunschweig, 2001.
- OUMERACI, H.: Strengths and limitations of physical modelling in coastal engineering – synergy

- effects with numerical modelling and field measurements. Proceedings Hydralab Workshop on Experimental Research and Synergy Effect with Mathematical Models, Evers, K.-U., Grüne, J., Van Os, A. (eds.), Hannover, Germany, pp. 7–38, 1999.
- PEREGRINE, D. H.: Equations for water waves and the approximation behind them, In *Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport*, ed. R. E. Meyer, 95–121, 1972.
- RICHARDSON, S. R.; INGRAM, D. M.; MINGHAM, C. G. and CAUSON, D. M.: 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, 2001.
- RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. and BOOIJ, N.: A Spectral Model for Water Waves in the Near Shore Zone, Proc. 24th Intern. Conf. o. Coast. Engrg., Kobe/Japan, ASCE, New York, 1995.
- SHAO, S.; JI, C.; GRAHAM, D. I.; REEVE, D. E.; JAMES, P. W. and CHADWICK, A. J.: Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model, *Coastal Engineering*, Vol. 53, No. 9 pp. 723–736, 2006.
- SAVILLE, T.: Laboratory data on wave run up and overtopping on shore structures. Dayton, Ohio, U.S. Army, Beach Erosion Board, Document Service Centre, No. 64, 1955.
- SCHÄFFER, H. A.; DEIGAARD, R., MADSEN, P.: A Two-Dimensional Surf Zone Model Based on the Boussinesq Equations. Proc. Of the 23rd Int. Conf. On Coastal Engineering (ICCE), Venice, 1992.
- SCHRÖTER, A.: Nichtlineare zeitdiskrete Seegangssimulation im flachen und tiefen Wasser. Dissertation, Inst. für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Bericht Nr. 42, Hannover, 1995.
- SCHÜTTRUMPF, H.: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen – experimentelle und theoretische Untersuchungen, Fachbereich Bauingenieurwesen, TU Braunschweig, Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau, LWI, Braunschweig, Germany, Heft 149, S. 1–124, 2001.
- SCHÜTTRUMPF, H.; MÖLLER, J.; OUMERACI, H.; GRÜNE, J. and WEISSMANN, R.: Effects of Natural Sea States on Wave Overtopping of Seadikes. Proceedings Waves 2001 Conference. San Francisco, S. 1565–1574, 2001.
- SCHULZ, K.-P.: Maßstabeffekte beim Wellenaufbau auf glatten und rauhen Böschungen. Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität, LWI, Braunschweig, Germany, Heft 149, S. 1–124, 1992.
- STRYBNY, J. and ZIELKE, W.: Extended Eddy-Viscosity-Concept for Wave Breaking in Boussinesq Type Models Proc. Of the 27rd Int. Conf. On Coastal Engineering (ICCE), Sydney, 2000.
- STRYBNY, J.: Ein phasenauflösendes Seegangmodell zur Ermittlung von Bemessungsparametern für Küstenstrukturen, Bericht 69/2004, Inst. für Strömungsmech. und elektr. Rechnen im Bauwesen, Uni Hannover, 2004.
- VAN DER MEER, S. W. and JANSSEN, J. P. F. M.: Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes. Published in: *Wave Forces inclined and Vertical Structures*. Ed. Z. DEMIRBILEK. pp 1–27, 1995.
- VAN DER MEER, S. W.; TÖNJES, P. and DE WAAL, J. P.: A code for dike height and design and examination. Proc. Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters. (Ed. N.W.H. Allsop) Thomas Telford, London, 1998.
- VAN GENT, M. R. A.: The modeling of wave action on and in coastal structures, *Coastal Engr.* Vol. 22 No 3./4, 1994.
- VAN GENT, M. R. A.: Wave Interaction with permeable Coastal Structures. Dissertation. Delft Hydraulics Pres., 1995.
- VAN GENT, M. R. A. and DOORN, N.: Numerical model simulations of wave propagation and wave run-up on dikes with shallow foreshores, Proc. Coastal Dynamics 2001, 2001.
- WARD, D. L.; WIBNER, C. G. and ZHANG, J.: Runup on coastal revetments under the influence of onshore wind. *Journal of Coastal Research*, 14(4), 1325–1333. ISSN 0749-0208, 1998.
- WEIßMANN, R. u. RICHWIEN, W.: Bodenmechanische Prozesse beim Wellenüberlauf über Deiche, *GEOLEX (2003) Heft 3*, S. 5–10, 2003.
- WESTON, B. P.; BORTHWICK, A. G. L.; TAYLOR, P. H.; HUNT, A. C. and STANSBY, P. K.: The performance of a hybrid Boussinesq model on wave runup and overtopping predictions for coastal structures, Proc. Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters. (Ed. N.W.H. Allsop) Thomas Telford, 2005.

- WITTING, M.; ZANKE, U. and MEWIS, P.: Twodimensional deterministic modeling of waves at the coast of the island Sylt (German-Bight), Proceedings of Advances in Hydroscience and Engineering; Volume 5, Cottbus/Berlin, 1998.
- WITTING, M.; KAISER, R.; SCHÜTTRUMPF, H. and NIEMEYER, H. D.: Use of nonlinear shallow water wave overtopping model for seawall and dyke design: Validation and comparison studies. Proc. Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters. (Ed. N.W.H. Allsop) Thomas Telford, 2005.