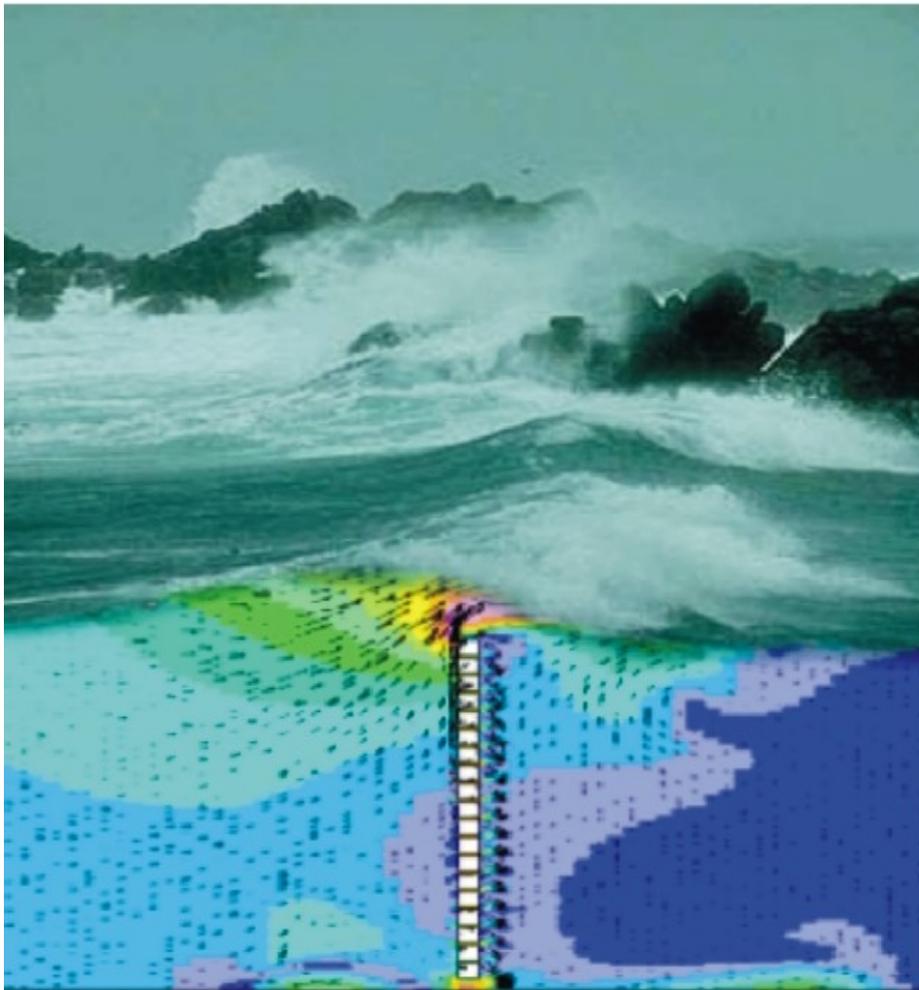


ROLF HABEL

„KÜNSTLICHE RIFFE“
ZUR WELLENDÄMPFUNG



MENSCH & BUCH VERLAG

ROLF HABEL

„Künstliche Riffe“ zur Wellendämpfung

Vom Fachbereich 10 der Technischen Universität Berlin
-Verkehrswesen und Angewandte Mechanik-
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nitsche

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Günther F. Clauss

Prof. Dr.-Ing. Christoph Haberland

Tag der wissenschaftliche Aussprache: 13. März 2001

Berlin 2001

D83

Für meine Familie

ROLF HABEL, HORTENSIENSTR. 16, 12203 BERLIN

R.Habel@gmx.de

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Habel, Rolf

„Künstliche Riffe“ zur Wellendämpfung /
vorgelegt von Rolf Habel.

-Berlin: Mensch-und-Buch-Verlag.,2001

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2001

ISBN 3-89820-208-9

D 83

© MENSCH & BUCH VERLAG, Berlin 2001

Sprengelstr. 4-5, 13353 Berlin - <http://www.menschundbuch.de>

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus zu vervielfältigen.

Vorwort

Die vorgestellte Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während dieser Forschungsarbeit begleitet und unterstützt haben. Ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther F. Clauss für die wissenschaftliche und menschliche Betreuung der Arbeit. Seine konstruktive Kritik, Erfahrung und stete Motivation half Probleme zu überwinden und mutig neue Wege zu gehen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Haberland für die Begutachtung der Arbeit und dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nitsche.

Breite Unterstützung auf allen Gebieten habe ich in den zurückliegenden Jahren von allen Mitarbeitern des Fachgebiets Meerestechnik erhalten. Von der Vielzahl meiner Kollegen, die mich unterstützten, möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Martin Vannahme MSC herausheben, der mir nicht nur ein kritischer Kollege, sondern seit über 10 Jahren auch ein unschätzbare Freund ist. Nicht zu vergessen ist auch Frau Ingrid Meifert vom Sekretariat sowie die Mechanik- und Elektronikwerkstatt des Instituts für Schiffs- und Meerestechnik, die den Bau unzähliger Wellenfilter und Messsonden unterstützt hat. Herrn Dr.-Ing. G. Kuhlmann danke ich für seine Anregungen zur Klärung offener Forschungsfragen.

Stellvertretend für die vielen studentischen Mitarbeiter, die mich während meiner Forschungsarbeit begleitet haben, möchte ich Christian Schmittner, Oliver Zarbock und Daniela Bräu für die tatkräftige Unterstützung bei den Versuchsserien in Berlin und Hannover sowie bei der Erstellung von Grafiken danken. Danken möchte ich auch Csaba Pákozdi, der durch seine im Rahmen dieser Arbeit betreute Diplomarbeit einen wertvollen Beitrag zur parametergesteuerten Erzeugung von Rechengittern für die Analyse getauchter Strukturen lieferte.

Durch eine Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) wurden kosten- und arbeitsintensive Versuchsserien in Berlin und Hannover möglich, die eine Basis für die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit und das numerische Modell darstellen. Daher möchte ich neben dem BMBF auch den Projektpartnern von der TU Braunschweig (LWI), insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Gunnar Koether und dem Team der Wellenkanäle in Berlin und Hannover (GWK) danken. Der Firma Computational Dynamics möchte ich für die kompetente und freundliche Beratung bezüglich spezifischer Softwareprobleme sowie das Interesse an meiner Arbeit danken.

Zu guter letzt möchte ich meiner wunderbaren Frau Nina, meinen Eltern und meiner gesamten Familie danken, die mir stets Motivation gespendet haben und mir menschliche Rückendeckung gaben. Danke auch an meinen Sohn Roman, der sich in seinem gerade abgeschlossenen ersten Lebensjahr bemühte mir ab und zu ein paar Stunden Schlaf zu gönnen und mich stets mit seinem Lachen erfreute.

Vielen Dank Euch allen!

 - Berlin, März 2001

Kurzfassung

Die Dissertation präsentiert die numerische und experimentelle Analyse von „Künstlichen Riffen“ zur Wellendämpfung. Zum Schutz von erosionsgefährdeten Küstenabschnitten, an denen die einlaufende Seegangsenergie auf ein tolerierbares Maß reduziert werden soll, stellen die vorgestellten Unterwasser-Filtersysteme als Künstliche Riffe ein innovatives und vorteilhaftes System gegenüber konventionellen Lösungen dar. Die Filtersysteme bestehen aus getauchten, hintereinander gestaffelten Einzelfiltern unterschiedlicher Porosität, die den einlaufenden Seegang zum Teil transmittieren, zum Teil reflektieren und dissipieren.

In der Arbeit werden zunächst *globale Kennwerte* anhand systematischer Modellversuche ermittelt. Bei den Experimenten in Wellenkanälen verschiedener Größe – beispielsweise dem großen Wellenkanal in Hannover (GWK) mit einer Länge von 324 m - wird vorwiegend eine spezielle Versuchstechnik mit transienten Wellenzügen eingesetzt, die eine zeitsparende Analyse über ein breites Frequenzspektrum erlaubt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird ein *lineares semi-empirisches Berechnungsmodell* vorgeschlagen, das durch modifizierte Randbedingungen, eine deutliche Verbesserung bestehender Verfahren darstellt.

Zur detaillierten Analyse der Künstlichen Riffe wird in dieser Arbeit eine neue *nichtlineare numerische Berechnungsmethode* zur instationären viskosen Berechnung von getauchten Filtern im Seegang unter Berücksichtigung der freien Oberfläche vorgestellt. Sie basiert auf einer Kopplung der Reynolds Averaged Navier-Stokes Gleichungen (RANSE) mit der Volume of Fluid (VOF) Methode. Aufbauend auf dem RANSE/VOF Verfahren wird eine effektive Vorgehensweise zur Geometriemodellierung und Diskretisierung des Rechengebietes vorgestellt. Die zur Erzeugung der Wellen erforderliche Kinematik am Wellenblatt wird im Rahmen der Arbeit entwickelt und in das vorhandene Strömungsprogramm integriert. Der Vergleich der Berechnungen mit experimentellen Versuchsergebnissen beweist die hohe Genauigkeit des Verfahrens bezüglich der ermittelten Wellenauslenkungen, Geschwindigkeiten und Strukturkräfte. Die anschließende *Analyse lokaler und nichtlinearer Strömungsphänomene* getauchter Strukturen unterstützt die Entwicklung optimierter Künstlicher Riffe.

Zusammenfassend werden in der Arbeit Ergebnisse für lokale Strömungsphänomene und globale Größen ermittelt. Sie liefern neue Erkenntnisse bezüglich des Übergangs vom Nahfeld zum Fernfeld, der Abschätzung von Energieverlusten, der nichtlinearen Transformation von Energieanteilen aus langperiodischen Wellen in hochfrequente Komponenten sowie des Transmissions- und Reflexionsverhaltens von getauchten Strukturen. Als Schlussfolgerung der Analysen werden Kriterien für die Gestaltung innovativer Künstlicher Riffe für den Einsatz im Küstenschutz festgelegt.

Abstract

This thesis presents a numerical and experimental analysis of artificial reefs in waves. Underwater filter systems are an innovative and favourable solution to reduce the energy of incident waves efficiently and can be used as artificial reefs to avoid erosion of unprotected coasts and beaches. Artificial reefs consist of multi-layer filters with different porosity which partly transmit, reflect and dissipate the incoming wave energy.

Firstly an experimental analysis is conducted to obtain *global values*. For experiments in wave flumes of different scale – for example the huge wave flume of Hannover (GWK) with a length of 324 m – a special test procedure with transient wave trains is used, which allows a time efficient analysis for broad frequency spectra. On the basis of these results an improved *linear semi-empirical model* with modified boundary conditions is presented.

For a detailed analysis of artificial reefs a new *non-linear numerical method* for transient viscous computation of submerged filters in waves is presented. It is based on the coupling of the Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANSE) with the volume of fluid (VOF) method. Using the RANSE/VOF module an efficient method for geometric modelling and grid generation is presented. The kinematics at the wave paddle for generating waves is developed, and integrated into the existing flow solver. The comparison of computed results with experimental data demonstrates the good agreement of the method concerning wave elevations, velocities and structure forces. The *analysis of local non-linear flow phenomena* of submerged structures helps to develop optimised artificial reefs.

In summary this thesis presents results for local flow phenomena and global values. New knowledge is obtained on the transition of the near-field to the far-field, the non-linear transformation of energy from low-frequency waves to high-frequency components, and the transmission and reflection characteristics of submerged structures. In conclusion, design criteria for the construction of innovative artificial reefs for coastal protection are presented.

KÜNSTLICHE RIFFE ZUR WELLENDÄMPFUNG

1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION.....	1
1.2	ZIELE.....	3
2	STAND DER FORSCHUNG	5
2.1	WELLENTHEORIEN.....	5
2.2	ALLGEMEINE VERFAHREN ZUR WELLENDÄMPFUNG.....	11
2.3	ANALYSE DURCHLÄSSIGER STRUKTUREN.....	13
2.4	NUMERISCHE VERFAHREN.....	16
3	VERSUCHSAUFBAU UND -PROGRAMM	23
3.1	WELLENKANÄLE.....	23
3.2	AUFBAU DER KÜNSTLICHEN RIFFE.....	25
3.3	MESSTECHNIK.....	27
3.4	VERSUCHSPROGRAMM.....	30
3.4.1	<i>Grundlagen der Versuchstechnik mit transienten Wellenzügen und Seegang</i>	30
3.4.2	<i>Untersuchte Strukturen</i>	36
4	SEMI-EMPIRISCHES MODELL	39
4.1	TRANSMISSION, REFLEXION UND DISSIPATION.....	39
4.1.1	<i>Reflexion für Einzelfilter und Filtersysteme</i>	39
4.1.2	<i>Transmission für Einzelfilter und Filtersysteme</i>	42
4.2	POROSITÄTSVERTEILUNG AM FILTER.....	46
4.3	SEMI-EMPIRISCHES BERECHNUNGSVERFAHREN.....	49
5	NICHTLINEARES NUMERISCHES VERFAHREN	55
5.1	ERHALTUNGSGLEICHUNGEN.....	55
5.2	TURBULENZMODELL.....	57
5.3	VOF METHODE ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DER FREIEN OBERFLÄCHE.....	59
5.4	LÖSUNGALGORITHMEN.....	63
5.5	SPEZIELLE MODELLBILDUNG FÜR „KÜNSTLICHE RIFFE“.....	64
5.5.1	<i>Geometrie</i>	64
5.5.2	<i>Generierung des Rechnernetzes</i>	65
5.5.3	<i>Wellenerzeugung, Randbedingungen und Materialeigenschaften</i>	66
5.6	VALIDIERUNG DES NUMERISCHEN VERFAHRENS.....	69
5.6.1	<i>Versuchsanordnung</i>	69
5.6.2	<i>Validation für Pegel, Geschwindigkeiten und Kräfte</i>	69
6	LOKALE NICHTLINEARE STRÖMUNGSPHÄNOMENE	73
6.1	ÜBERGANG VOM GESTÖRTEN NAHFELD ZUM FERNFELD.....	74
6.2	NAHFELD: STRÖMUNG UM EINEN DURCHLÄSSIGEN FILTER.....	76
6.3	DISSIPATIVE PROZESSE AM FILTER.....	79
7	AUSLEGUNG EINES KÜNSTLICHEN RIFFS	83
7.1	ENTWURFSKRITERIEN.....	84
7.2	WELLENTTRANSFORMATION AM RIFF.....	85
7.3	SEEGANGSBELASTUNG DES BAUWERKS.....	86
7.4	EMPFEHLUNG EINES EFFEKTIVEN KÜNSTLICHEN RIFFS.....	91
8	ZUSAMMENFASSUNG	93
9	LITERATUR	95
10	NOMENKLATUR	99
11	ANHANG	101

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1: Schutzfunktion eines Riffes vor Stranderosion	1
Abb. 1.2: Natürliches Riff um eine Insel	1
Abb. 1.3: Typisches Unterwasser-Filtersystem im Wellenkanal	2
Abb. 1.4: CFD Berechnung und natürliche Brandung	4
Abb. 2.1: Definition von Wellenparametern	5
Abb. 2.2: Wellenprofile nach Stokes-Wellentheorien	6
Abb. 2.3: Bereichsgrenzen der Wellentheorien (<i>Shore protection manual</i> , 1984)	7
Abb. 2.4: Einfluss unterschiedlicher Wellenparameter auf das Geschwindigkeitsprofil	8
Abb. 2.5: Ausbreitung einer Wellengruppe (<i>Clauss et al.</i> , 1992)	10
Abb. 2.6: Überblick über Wellenbrechertypen nach <i>Bergmann et al.</i> (1999)	11
Abb. 2.7: Aus Steinen geschütteter Wellenbrecher und Alternative aus Geotextil/Sand	12
Abb. 2.8: Uferschutz vor Koserow durch Wellenbrecher nach <i>Stückrath et al.</i> (1998)	12
Abb. 2.9: Wellenabsorber nach <i>Tanimoto und Takahashi</i> (1994)	13
Abb. 2.10: Prinzipskizze der <i>Ninian</i> Plattform mit durchlässiger Außenstruktur	14
Abb. 2.11: Verschiedene „Caisson“ Wellenbrecher nach <i>Urashima und Kondo</i> (2000)	14
Abb. 2.12: Einbaubeispiel für Seitenwandabsorber in Seegangversuchen	15
Abb. 2.13: Prinzipdarstellung: Transmission und Reflexion an einem getauchten Einzelfilter	16
Abb. 2.14: Energietransfer an einer getauchten Wand nach der Theorie von <i>Wiegel</i> (1960)	17
Abb. 2.15: Vergleich Messung/Theorie nach <i>Abul-Azm</i> (1993)	19
Abb. 2.16: Methoden zur Bestimmung der Trennschicht zwischen Fluiden	20
Abb. 3.1: Ansicht der Wellenkanäle: KWK Berlin, MWK Berlin, GWK Hannover	24
Abb. 3.2: Frontansicht eines Filterelements mit relativer Bauwerkshöhe d_s/d	25
Abb. 3.3: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Unterwasser-Filtersystemen	26
Abb. 3.4: Aufbau der unterschiedlichen Kraftmesswagen (KMW)	28
Abb. 3.5: Ultraschallsonde und Propellerkopf zur Geschwindigkeitsmessung	29
Abb. 3.6: Transientes Wellenpaket zu verschiedenen Zeitpunkten als Funktion des Ortes (Wassertiefe $d=4,2\text{m}$) nach <i>Kühnlein</i> (1997)	31
Abb. 3.7: Transientes Wellenpaket an verschiedenen Orten als Funktion der Zeit (Wassertiefe $d=4,2\text{m}$) nach <i>Kühnlein</i> (1997)	31
Abb. 3.8: Reflexionsbestimmung mit Wellenpaketen (GWK)	34
Abb. 3.9: Zeitregistrierungen eines transienten Wellenzuges (GWK)	35

Abb. 3.10: Auswahl untersuchter Filtersysteme (MWK und GWK).....	37
Abb. 4.1: Reflexion verschiedener Filtersysteme.....	40
Abb. 4.2: Einfluss des Filter Abstands auf Reflexion und Transmission.....	41
Abb. 4.3: Transmissionsanalyse mit Wellenpaketen (a).....	42
Abb. 4.4: Transmissionsanalyse mit Wellenpaketen (b).....	43
Abb. 4.5: Transmittierte Energie für Filter und Filtersysteme (MWK und GWK).....	44
Abb. 4.6: Anteile von Reflexion, Transmission und Dissipation ausgewählter Unterwasser-Filter an der Gesamtenergie.....	45
Abb. 4.7: Variation der Porositätsverteilung an einem 5% und 11% Filter.....	46
Abb. 4.8: Transmission bei verschiedener Porositätsverteilung ($d_s/d = 0,93$).....	47
Abb. 4.9: Versuche im Wellenkanal der TU Berlin (MWK) – Porosität im Mittel 11%.....	48
Abb. 4.10: Transmission – Porosität im Mittel 11%.....	48
Abb. 4.11: Energietransfer an getauchten Strukturen (links: bisherige lineare Verfahren rechts: mit vertikalem Energietransfer).....	49
Abb. 4.12: Vergleich von Messserien mit dem neuen Ansatz ($H_l/d = 0,15$ bis $0,45$).....	51
Abb. 4.13: Vergleich von Messserien mit dem neuen Ansatz ($H_l/d = 0,25$).....	51
Abb. 4.14: Mit dem semi-empirischen Modell berechnete transmittierte Energie E_T	52
Abb. 4.15: Mit dem semi-empirischen Modell berechnete Koeffizienten C_t , C_r und C_d	52
Abb. 4.16: Messung und Berechnung für Wellentransmission.....	53
Abb. 5.1: Schematische Darstellung von Turbulenz nach <i>Ferziger</i> und <i>Perić</i> (1996).....	57
Abb. 5.2: Lage der Variablen in einer Berechnungsgitterzelle.....	60
Abb. 5.3: Größen für Druckermittlung an freier Oberfläche.....	61
Abb. 5.4: Rotierendes Rechteck mit (a) HYPER-C und (b) CICSAM Verfahren.....	62
Abb. 5.5: Geometrie, Gitter und Randbedingungen für die numerische Analyse.....	64
Abb. 5.6: Numerische Diffusion bei „groben“ Rechengittern.....	65
Abb. 5.7 Gitterstruktur im Nahfeld des Filters.....	66
Abb. 5.8 Pegelanstieg bei ungünstiger Druckrandbedingung am „Auslass“.....	67
Abb. 5.9: Versuchsanordnung für die Validierung.....	69
Abb. 5.10: Wellenauslenkung: Initial und hinter einem Filter ($P=5\%$).....	70
Abb. 5.11: Messung und Berechnung für Geschwindigkeiten und Kräfte im Nahfeld.....	71
Abb. 6.1: Numerische Simulation: Transmission und Reflexion eines Wellenzuges.....	74
Abb. 6.2: Wirbelbildung im Nahfeld hinter einer getauchten Wand.....	75
Abb. 6.3: Filter ($P=11\%$): Geschwindigkeitsvektoren zu drei Zeitpunkten.....	76
Abb. 6.4: Filter ($P=11\%$): Geschwindigkeitsbetrag und –vektoren zu drei Zeitpunkten.....	77

Abb. 6.5: Messung und Berechnung der Geschwindigkeiten im Nahfeld des 11% Filters.....	78
Abb. 6.6: Wirbel hinter der Struktur.....	80
Abb. 6.7: Turbulente kinetische Energie an einer getauchten Wand (MWK).....	82
Abb. 7.1: Transformation von Energieanteilen aus „langen“ Wellen in hochfrequente Komponenten an getauchten Strukturen.....	86
Abb. 7.2: Kraftregistrierung einer einzelnen Filterkomponente für ein Wellenpaket.....	87
Abb. 7.3: Prinzip des Kraftverlaufs an getauchten und ausgetauchten Filtern.....	87
Abb. 7.4: Kräfte auf einen Filter, P=11% (GWK).....	88
Abb. 7.5: Kräfte auf einen Filter, P=11% (MWK).....	88
Abb. 7.6: Gesamtkraft als Funktion der Wellenhöhe: Filter, P=11% (GWK).....	89
Abb. 7.7: Gesamtkraft als Funktion der Wellenperiode: Filter, P=11% (GWK).....	89
Abb. 7.8: Maximale Gesamtkraft als Funktion der einlaufenden Wellenenergie.....	90
Abb. 7.9: Einkammersystem mit rechteckigen und runden Aussparungen.....	91
Abb. 7.10: Strömungsvorgänge am „Künstlichen Riff“.....	91
Abb. 7.11: Strömungsvorgänge am Filter mit einer einzelnen Öffnung.....	92
Abb. 11.1: Aufbau eines Zweikammersystems (GWK).....	103
Abb. 11.2: Zeitregistrierung eines transienten Wellenzuges (GWK, $K_p=140m$).....	104
Abb. 11.3: Zeitregistrierung eines transienten Wellenzuges (GWK, $K_p=180m$).....	105
Abb. 11.4: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 11% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$).....	106
Abb. 11.5: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 20% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$).....	107
Abb. 11.6: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 26,5% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$).....	108
Abb. 11.7: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 43% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$).....	109
Abb. 11.8: Untersuchte Filtersysteme im Wellenkanal der TU Berlin (MWK).....	110
Abb. 11.9: Untersuchte Filtersysteme im Wellenkanal der TU Berlin (MWK).....	111
Abb. 11.10: Ergebnisse der linearen Wellentheorie (Airy).....	112

1 Einleitung

1.1 Motivation

Küsten und Strände, die dem anlaufenden Seegang ungeschützt ausgesetzt sind, weisen starke Erosionserscheinungen auf. Durch brandenden Seegang wird Bodenmaterial aufgewirbelt, das durch Strömungen seewärts verlagert wird. In der Nord- und Ostsee ist ein großer Teil der Küsten von dauerhaftem Rückgang betroffen. An besonders erosionsgefährdeten Stellen ist der Einsatz von schützenden Bauwerken sinnvoll. Hierfür sind passive Strukturen, die über die Wasserlinie hinausragen sowie aktive Maßnahmen im vorgelagerten Küstenfeld denkbar.

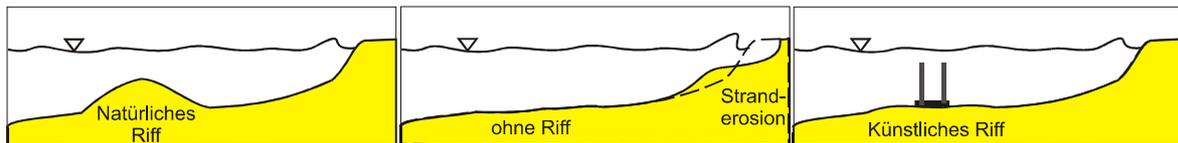


Abb. 1.1: Schutzfunktion eines Riffes vor Stranderosion

Aktive Maßnahmen im Küstenvorfeld orientieren sich in ihrer Wirkungsweise an natürlichen Riffen. Durch Interaktion mit dem einlaufenden Wellenfeld wird ein Teil der Wellenenergie reflektiert, ein Teil transmittiert und ein Teil dissipiert. Dadurch verringern sich die Wellenkräfte im Strandbereich und die Erosion mit seeseitigem Sedimenttransport wird verhindert.



Abb. 1.2: Natürliches Riff um eine Insel

Über die Wasserlinie herausragende Strukturen eignen sich hervorragend als Uferbefestigung, Wellenabsorber und Wellenbrecher, haben jedoch den Nachteil aller passiven Schutzmaßnahmen: Sie werden als „Verfälschung“ der Küste empfunden, beeinträchtigen das natürliche Landschaftsbild und werden daher lediglich in Küstenregionen eingesetzt, in denen sich die geforderte Schutzwirkung durch umweltfreundlichere Alternativen schwer erzielen lässt. Besonders in Küstenregionen, in denen der Tourismus eine starke Rolle spielt bzw. die Erhaltung der Küste als Naturraum im Vordergrund steht, stellen aktive Schutzmaßnahmen wie z.B. *Unterwasser-Filtersysteme zur Wellendämpfung*¹ eine alternative Lösung dar (Abb. 1.3).

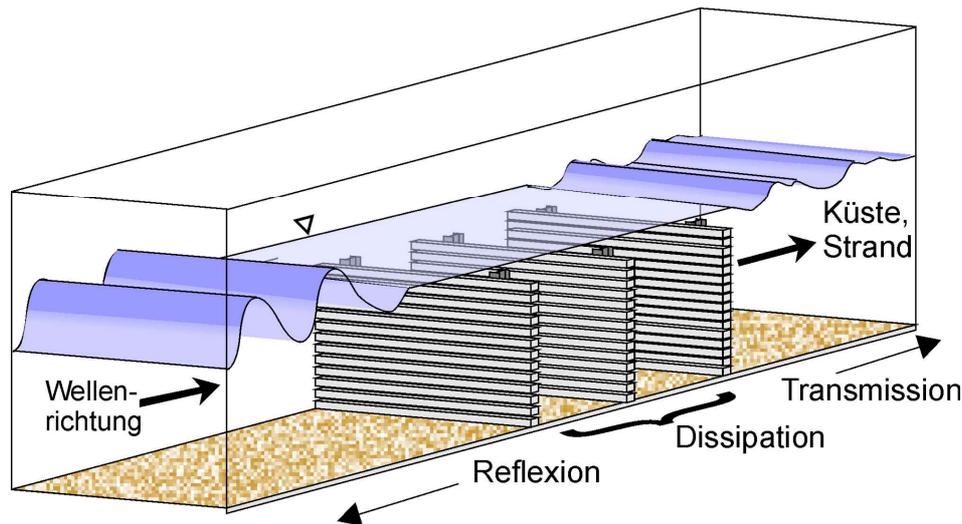


Abb. 1.3: Typisches Unterwasser-Filterssystem im Wellenkanal

Sie können im Küstenvorfeld installiert werden und wandeln hier einen Teil der Wellenenergie in andere Energieformen (Wärme, Turbulenz, Schall, usw.) um, während die Seegangsbelastung des Ufers bzw. Strandes auf ein tolerierbares Maß reduziert wird. Damit ähneln sie in ihrer Wirkungsweise natürlichen Riffen. Ein System aus getauchten durchlässigen Wänden ist eine mögliche Bauform solcher Künstlicher Riffe. Unterwasser-Filterssysteme bestehen aus vertikalen, hintereinander gestaffelten, porösen Filterelementen, die unterhalb der Wasseroberfläche abschließen und dadurch das Landschaftsbild nicht beeinträchtigen. Derartige Strukturen sind praktisch unsichtbar und dissipieren und reflektieren die einlaufende Wellenenergie nicht erst an der Küstenlinie, sondern zu einem beträchtlichen Teil bereits am Unterwasser-Filterssystem im Küstenvorfeld. Dabei wird die Seegangsbelastung des natürlichen Ufers bzw. Strandes nicht gänzlich eliminiert, sondern auf ein tolerierbares Maß reduziert. Eine detaillierte Analyse dieser Systeme dient der Entwicklung effektiver Bauwerke für den Küstenschutz. Die Unterwasserfilter lassen dabei folgende Vorteile erwarten:

- Unsichtbar von der Küste
- Reduktion von Transmission und Uferbelastung bei geringer Reflexion
- Nichtlineare Transformation langer Wellen in kurze, für den Strand unschädliche Wellen
- Mögliche Wasserzirkulation zwischen wellenberuhigter Zone und offenem Meer
- Geringer Platzbedarf der einzelnen Filterelemente und ein breites Einsatzspektrum

¹ BMBF Forschungsvorhaben TU Braunschweig / TU Berlin (1.1.1998 - 30.9.2000)

Als aktive Schutzmaßnahmen sind derartige Bauwerke besonders für Gebiete wie das Mittelmeer und die Ostsee mit geringen tidebedingten Wasserspiegeländerungen geeignet. In der Ostsee sind beispielweise rund 70% der Mecklenburg-Vorpommerschen Außenküste von einem dauerhaften Küstenrückgang betroffen. Der Fremdenverkehr sowie die Sorge um die Erhaltung des Naturraumes lassen hier nur in wenigen Ausnahmen einen massiven Küstenverbau zu.

1.2 Ziele

Hauptziel der Arbeit ist die Auslegung eines neuartigen effektiven Küstenschutzbauwerks, dessen Wirkung auf der Dämpfung der Seegangsenergie beruht. Dies erfordert die genaue Kenntnis seiner Eigenschaften im Seegang, die im wesentlichen durch die Wechselwirkung zwischen Luft, Wasser und Bauwerk diktiert werden. Im Rahmen der Arbeit sollen solche künstlichen Riffe hinsichtlich Wellendämpfung und Belastung analysiert und optimiert werden. Dazu müssen zunächst auf der Basis von systematischen Modellversuchen die Haupteinflussparameter für Transmission und Reflexion identifiziert werden, damit ein lineares semiempirisches Modell entwickelt werden kann. Dieses dient einer effizienten Bauwerksauslegung und liefert gegenüber bestehenden Verfahren eine bessere Prognose. Allerdings ist ein derartiges Prognosemodell aufgrund der Vernachlässigung von Reibung, Turbulenz und nichtlinearer Wechselwirkungseffekte nicht in der Lage, einen vertieften Einblick in die physikalischen Phänomene in Strukturnähe zu geben und die Dissipation des Systems direkt, d.h. unabhängig von Transmission und Reflexion zu bestimmen. Um hier zusätzliche Informationen zu erhalten, die auch durch experimentelle Analysen nur schwierig zu beschaffen sind, ist die Anwendung einer nichtlinearen numerischen Methode erforderlich. Die Entwicklung und Anwendung einer solchen Methode, die eine nichtlineare Beschreibung der Strömungsvorgänge um getauchte Strukturen und erstmalig Aussagen über die Dissipation an derartigen Strukturen ermöglicht, ist ein wichtiges Teilziel dieser Arbeit. Zusammen mit der experimentellen Analyse können damit Kriterien für den Entwurf optimaler künstlicher Riffe definiert werden. Die wesentlichen Arbeitspunkte der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entwicklung eines *linearen semi-empirischen Modells* für die Bauwerksauslegung auf der Basis systematischer Modellversuche.
- *Numerische Modellierung*, die eine nichtlineare Beschreibung der transienten Wechselwirkungseffekte zwischen getauchter Struktur und Wellen ermöglicht. Zur Berücksichtigung von Wellenkinematik, Verwirbelungen, Viskosität und der freien Oberfläche wird eine Kopplung zwischen einem RANSE² Löser und der VOF³ Methode realisiert.
- Validierung der Numerik mit aussagekräftigen Versuchsdaten und detaillierte *Analyse lokaler nichtlinearer Strömungsphänomene*.
- *Auslegung künstlicher Riffe* hinsichtlich Wellendämpfung und Belastung.

² RANSE Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations

³ VOF Volume of Fluid Methode zur Beschreibung der freien Oberfläche

Aus den gestellten Anforderungen und Zielen ergibt sich die Vorgehensweise bzw. Struktur der Arbeit. In Kapitel 2 werden wichtige Definitionen der Wellentheorie und der Stand der Forschung bezüglich gängiger Verfahren zur Wellendämpfung, Analyse durchlässiger Strukturen und numerischer (linearer und nichtlinearer) Rechenverfahren dargestellt.

In Kapitel 3 wird auf den Versuchsaufbau der systematischen Modellversuche eingegangen. Neben den Wellenkanälen und der Messtechnik wird insbesondere die spezielle Versuchstechnik mit transienten Wellenpaketen beschrieben (Clauss und Kühnlein, 1997). Die Anwendung dieser Versuchstechnik zur Transmissions- und Reflexionsbestimmung an Künstlichen Riffen wird erläutert.

Auf der Basis der systematischen Modellversuche werden in Kapitel 4 die Haupteinflussparameter für Transmission und Reflexion identifiziert und ein lineares semi-empirisches Modell zur Bauwerksauslegung vorgestellt, das durch modifizierte Randbedingungen eine Verbesserung bisheriger Verfahren darstellt.

Zur detaillierten numerischen Analyse nichtlinearer Strömungsphänomene werden in Kapitel 5 die Grundlagen und die Anwendung eines neuen nichtlinearen Verfahrens (RANSE/VOF) zur instationären viskosen Berechnung von getauchten Filtern vorgestellt. Die Berechnungsergebnisse werden mit aussagekräftigen Versuchdaten verglichen.

Mit diesem numerischen Verfahren werden anschließend (Kapitel 6) lokale und nichtlineare Strömungsphänomene analysiert, die zur Klärung der Wechselwirkungseffekte zwischen der einlaufenden Welle und der umspülten Struktur beitragen. Auf der Basis der numerischen und experimentellen Analysen werden Entwurfskriterien für Künstliche Riffe erstellt (Kapitel 7).

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit werden abschließend in Kapitel 8 zusammengefasst.

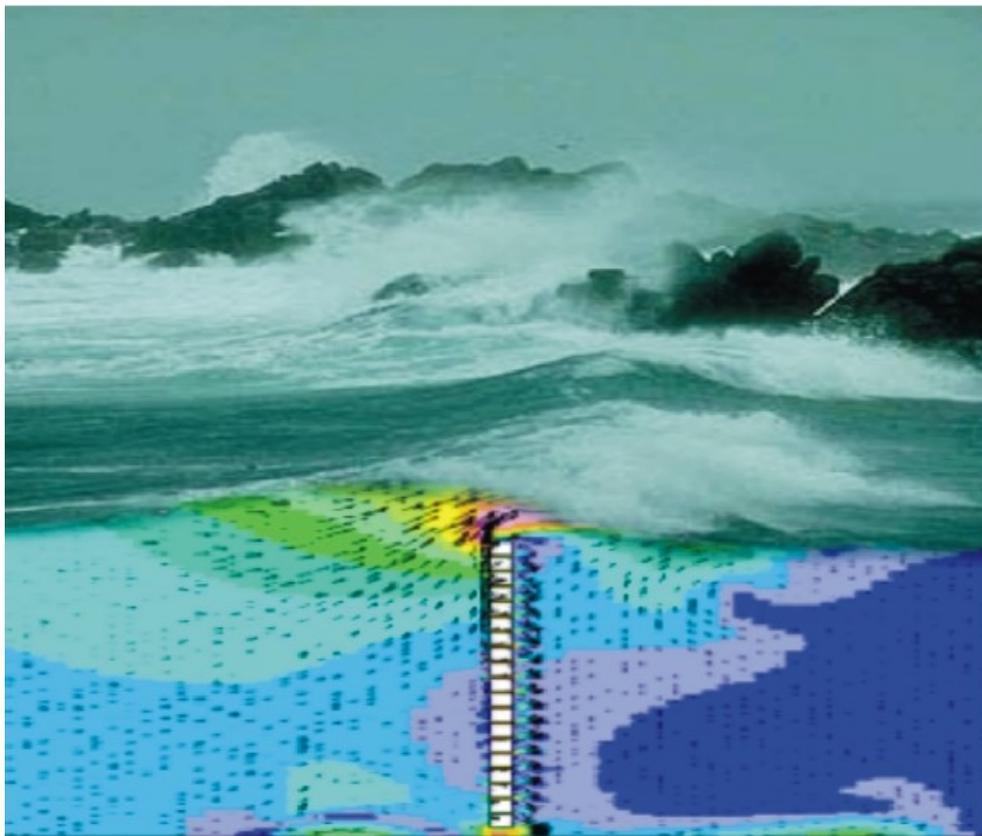


Abb. 1.4: CFD Berechnung und natürliche Brandung

2 Stand der Forschung

Vor dem Überblick über gängige Verfahren zur Wellendämpfung und einer Klassifizierung der unterschiedlichen Systeme werden für die Arbeit relevante Definitionen und Gesetze der Wellentheorie angegeben. Danach werden Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Untersuchung durchlässiger Strukturen beschäftigen. Schließlich folgt ein Überblick von Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der linearen und nichtlinearen numerischen Simulation.

2.1 Wellentheorien

Es werden problembezogene Definitionen aus der Wellentheorie und eine kurze Einführung in die spezifische Problemstellung gegeben. In Abb. 2.1 ist der auf eine Struktur treffende Wellenzug mit Wellen- und Strukturparametern dargestellt.

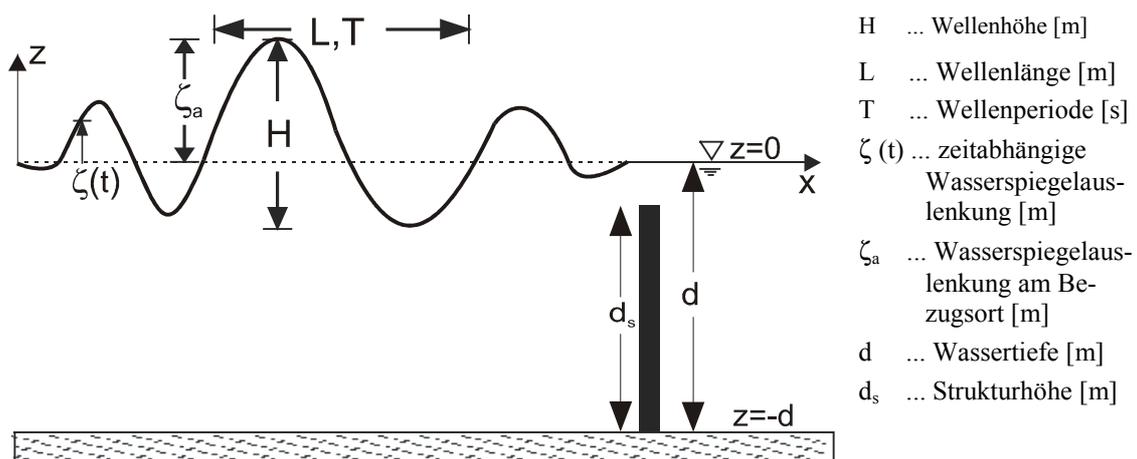


Abb. 2.1: Definition von Wellenparametern

Die angegebenen Wellenparameter charakterisieren einen Wellenzug, der mit geeigneten Wellentheorien beschrieben werden kann.

Die Wellentheorien liefern Lösungen eines Randwertproblems und teilen sich in die lineare Wellentheorie und Wellentheorien höherer Ordnung. Die Linearisierung ergibt sich für Tiefwasserwellen durch Reihenentwicklung in Potenzen der relativen Wellensteilheit H/L unter der Annahme geringer Wasserspiegelauslenkungen. Führt man die Reihenentwicklung durch und bricht die Reihe nach dem ersten Glied ab, erhält man Lösungen der klassischen „linearen Wellentheorie“ nach *Airy* und *Laplace*. Hier werden die Wellenamplituden im Verhältnis zur Wellenlänge und Wassertiefe so klein angenommen, dass die Randbedingungen näherungsweise an der Ruhewasserlinie $z = \zeta = 0$ erfüllt werden können. Weil es sich dabei um Lösungen der linearen Laplace-Differentialgleichung $\nabla^2 \Phi = 0$ handelt, sind beliebige Überlagerungen und somit eine spektrale Betrachtungsweise des Seegangs und seiner Wirkung möglich – ein Vorzug, der auch in der Modellversuchstechnik elegante Analyseverfahren zulässt.

Eng verwandt mit diesem Modell sind die nichtlinearen *Stokes*-Theorien zweiter und höherer Ordnung, die sich auch aus den *Laplace*-Gleichungen ableiten lassen, jedoch die Reihenentwicklungen bis zum zweiten, dritten oder höherem Glied fortsetzen. Die Lösungen enthalten neben den Grundanteilen nach der *Airy*-Theorie (sog. „freie“ Frequenzen) noch „gebundene“ Frequenzen in Form sog. Oberwellen, die die gleiche Phasengeschwindigkeit c (Gleichung 1.5) wie die Grundschwingung haben. Durch diese „gebundenen“ Frequenzen ist es möglich, eine nichtlineare Welle (kurzer, steiler Wellenberg – langes flaches Tal) mathematisch darzustellen.

In Abb. 2.2 werden Wellenprofile der *Stokes*-Theorie (II-IV) mit der linearen *Airy*-Theorie verglichen.

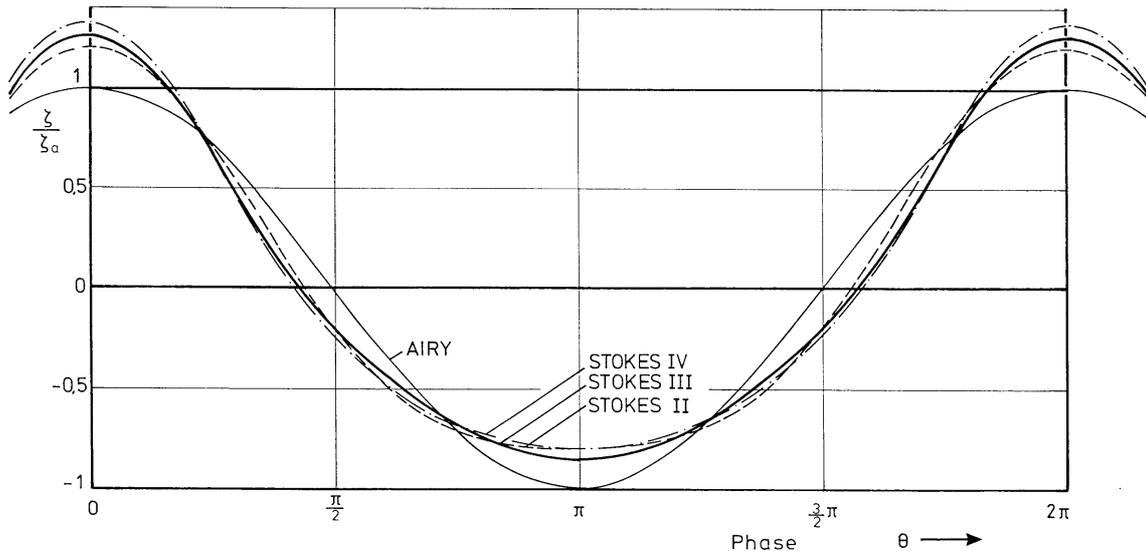


Abb. 2.2: Wellenprofile nach Stokes-Wellentheorien

Wählt man einen Reihenansatz in Potenzen von H/d (relative Wassertiefe), erhält man sogenannte *Flachwassertheorien*. Ein Vertreter dieser Theorien ist die *Cnoidalwellentheorie*.

Für die Bewertung meeres technischer Konstruktionen und Küstenschutzbauwerken sind diese Ansätze insoweit wichtig, als Theorien höherer Ordnung aufgrund größerer Partikelgeschwindigkeiten und –beschleunigungen auf höhere Kräfte führen, als die lineare Wellentheorie. In Abb. 2.3 sind die Gültigkeitsbereiche der einzelnen Wellentheorien dargestellt. Als Abgrenzungskriterium wird die *Ursell-Zahl*,

$$U_R = \frac{HL^2}{d^3}, \quad (2.1)$$

die sich aus den in Abb. 2.1 definierten Wellenparameter ergibt, verwendet. Die Kurven mit konstanter *Ursell-Zahl* $U_R = 26$ und 500 kennzeichnen die Bereichsgrenzen der

- *Cnoidalwellentheorie*, die der Berechnung periodischer Flachwasserwellen dient, und der
- *Einzelwellentheorie*, die zur Analyse von Erdbeben- und Flutwellen herangezogen wird

Die Abgrenzung ist willkürlich, da sich die Einzelwellen als Cnoidalwellen mit sehr großer Periode und Wellenlänge definieren lassen.

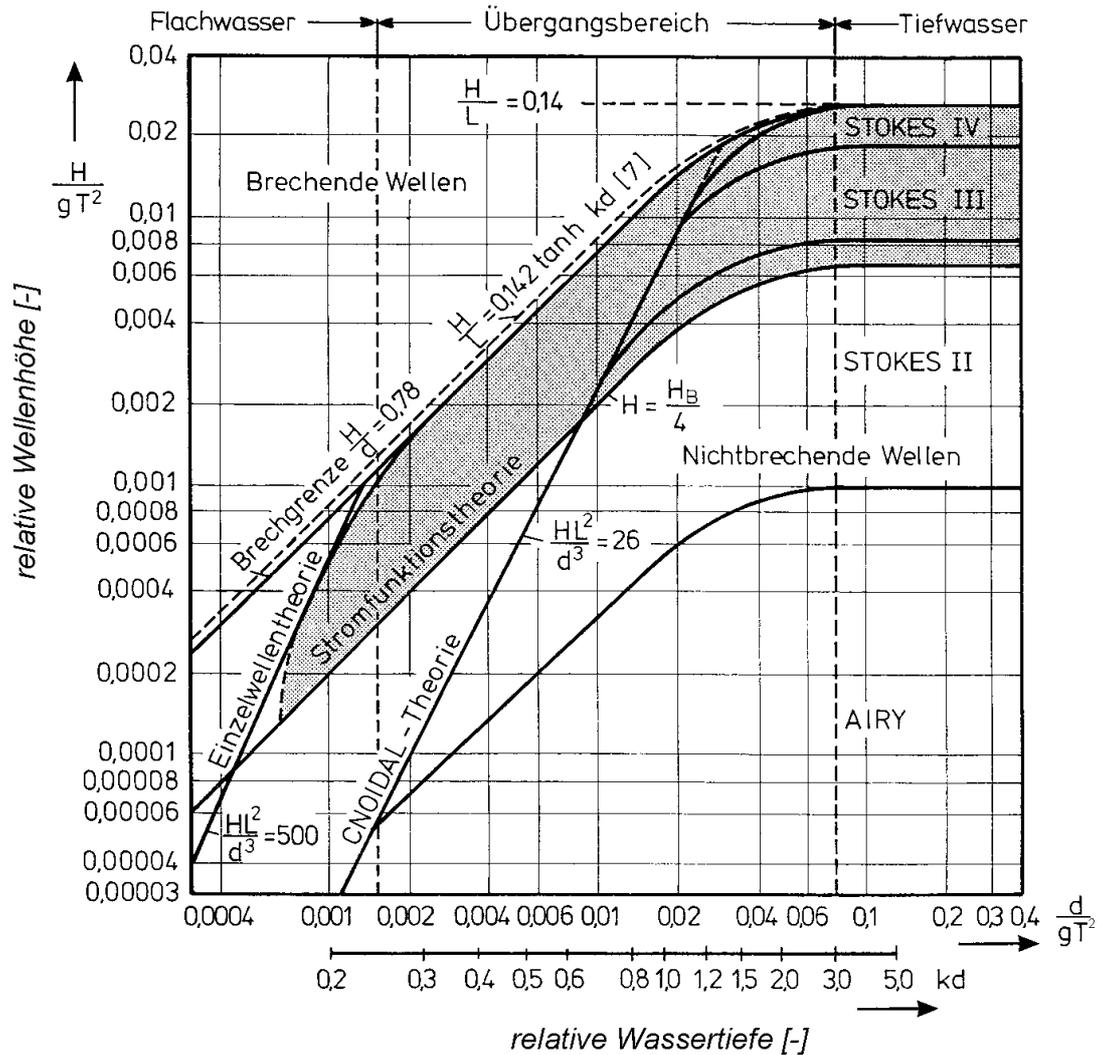


Abb. 2.3: Bereichsgrenzen der Wellentheorien (*Shore protection manual*, 1984)

Die gezeigten Bereichsgrenzen verdeutlichen, dass die lineare Wellentheorie nach *Airy* ein breites Einsatzspektrum von Flachwasser bis Tiefwasser besitzt. Diese Theorie wird im folgenden verwendet um für die Arbeit relevante Größen darzustellen.

So lässt sich mit dieser Theorie auch die Energie einer Welle beschreiben, die sich aus potentieller und kinetischer Energie zusammensetzt. Die potentielle Energie oszilliert unabhängig von der Wassertiefe örtlich und zeitlich mit \sin^2 der Wellenphase θ , während die kinetische Energie bei großen Wassertiefen konstant ist und bei kleinen Wassertiefen der potentiellen Energie gleicht (*Clauss et al.*, 1992). Mit gegebenen Wellenparametern folgt für die gesamte Wellenenergie E_{Well} im zeitlichen Mittel

$$E_{Well} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 L b_w \text{ [Nm]}, \quad \text{mit Breite der Welle } b_w = 1\text{m} \quad (2.2)$$

d.h. sie hängt bei konstanter Wellenlänge nur vom Quadrat der Wellenamplitude ab.

Für den Analyseteil (Kapitel 4 und 6) ergeben sich spezifische Fragestellungen, die sich auf die Wechselwirkung zwischen Welle und Struktur beziehen. Diese sind für Transmission, Reflexion und Dissipation, die Bauwerksbelastungen und den Übergang des lokalen Strömungsfeldes in das Fernfeld von Bedeutung. Die Wechselwirkungen hängen nicht nur von

der Bauwerksgeometrie, sondern auch von den Seegangparametern der einlaufenden Wellen ab. In Abhängigkeit der Wassertiefe d , der Wellenperiode T und der Wellenhöhe H ergibt sich die Wellenlänge L und das Geschwindigkeitsprofil der einlaufenden Welle. Diese Größen lassen sich für den ungestörten Wellenzug nach linearer Wellentheorie bestimmen. Mittels der im folgenden dargestellten Dispersionsgleichung wird iterativ aus der Wassertiefe d und der Wellenperiode T die Wellenzahl k bzw. die Wellenlänge L bestimmt.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{kg \tanh kd} \quad \text{mit } k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.3)$$

Mit bekannter Wellenzahl k lässt sich in Abhängigkeit der Phasenlage θ das horizontale Geschwindigkeitsprofil in Tiefenrichtung z errechnen.

$$u_{\text{hori}}(z) = \zeta_a \omega \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos \theta \quad (2.4)$$

Zur Illustration sind in Abb. 2.4 Geschwindigkeitsprofile für typische in den Untersuchungen verwendete Seegangparameter bei einer Wassertiefe von $d=4\text{m}$ dargestellt.

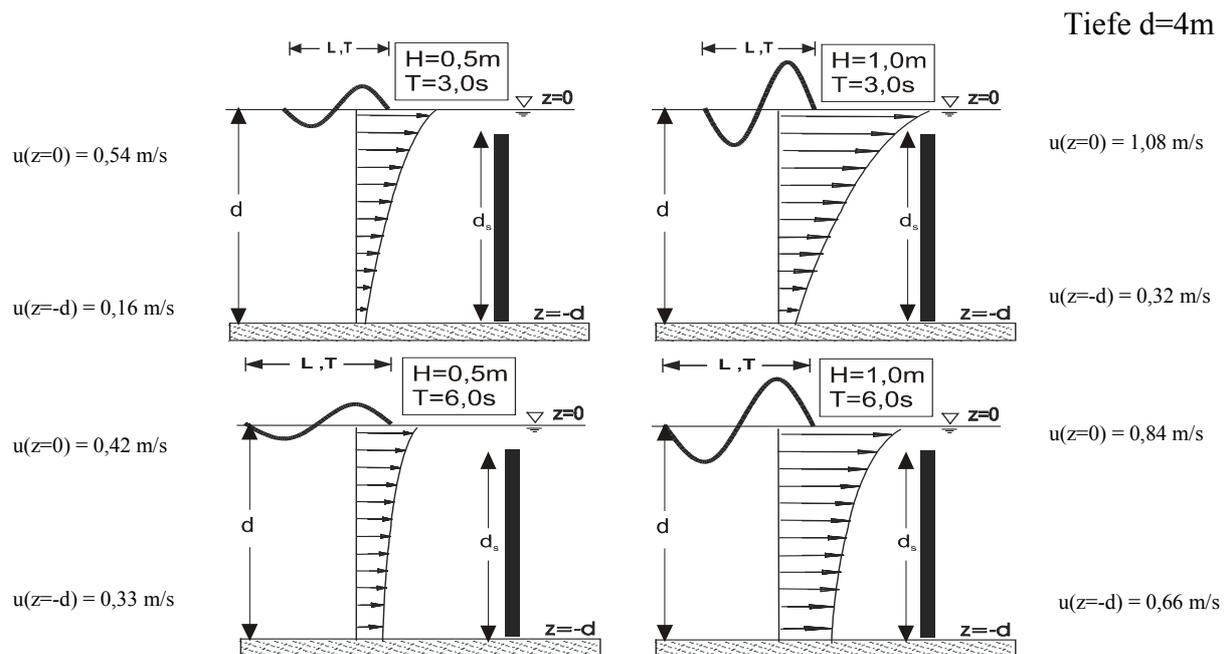


Abb. 2.4: Einfluss unterschiedlicher Wellenparameter auf das Geschwindigkeitsprofil

In systematischen Experimenten werden neben der Struktur auch die einlaufenden Wellenparameter variiert. Dazu wird vorwiegend die von *Clauss* und *Kühnlein* (1997) weiterentwickelte Technik der transienten Wellenpakete verwendet, die eine zeitsparende Analyse über einen breiten Frequenzbereich ermöglicht.

In den Experimenten lassen sich folgende Phänomene beobachten: Die einlaufende Welle trifft auf das Bauwerk und ein Teil der Welle wird reflektiert, ein Teil wird transmittiert und der Rest dissipiert. In der Nähe der Struktur findet neben einem horizontalen Energietransfer

durch die Bauwerksöffnungen auch ein vertikaler Energietransfer statt. Dieser führt dazu, dass ein großer Anteil der Energie über das Bauwerk hinweg transmittiert wird. Diese Beobachtung wird im Rahmen dieser Arbeit detailliert analysiert und steht im Gegensatz zu bisherigen linearen Theorien (Kapitel 2.4).

Hinter dem Bauwerk wird mittels einer Frequenzanalyse die nichtlineare Transformation von langperiodischen Energieanteilen in hochfrequente Komponenten beobachtet. In der Arbeit wird die Frage untersucht, ob es sich bei diesen Komponenten um „gebundene“ Wellen oder um „freie“ Wellen handelt. Freie Wellen besitzen im Gegensatz zu den „gebundenen“ Wellen die Eigenschaft, sich mit eigenständiger Phasengeschwindigkeit c auszubreiten.

Die Phasengeschwindigkeit wird aus der Vorstellung abgeleitet, dass sich für einen mitbewegten Beobachter die Wellenform nicht ändert, sofern die Geschwindigkeit so gewählt wird, dass die Phase $\theta = kx - \omega t$ konstant bleibt.

Mit $d\theta = kdx - \omega dt = 0$ folgt hieraus die sogenannte Phasengeschwindigkeit c :

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} \quad (2.5)$$

Mit (2.3) ergibt sich

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} , \quad (2.6)$$

d.h. die Phasengeschwindigkeit hängt von der Wellenzahl k und der Wassertiefe d ab. Lange Wasserwellen breiten sich also bei gleicher Wassertiefe schneller aus als kurze, eine Erscheinung die Dispersion genannt wird.

Für die Versuchsbeobachtung an getauchten Filtern kann also der folgende Rückschluss gezogen werden. Handelt es sich bei den hochfrequente Komponenten um „freie“ Wellen, so breiten diese sich langsamer aus als niederfrequente langperiodische Wellen. Die später durchgeführten Analysen im Zeitbereich beantworten diese Frage.

Die eben erläuterte Phasengeschwindigkeit der Einzelwelle ist deutlich zu unterscheiden von der sogenannten Gruppengeschwindigkeit c_{gr} eines Wellenzuges, die identisch mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Energie ist:

$$c_{gr} = \frac{c}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \quad (2.7)$$

Für Tiefwasser entspricht sie der halben Phasengeschwindigkeit, für Flachwasser der Phasengeschwindigkeit und wird dann Schwallgeschwindigkeit genannt.

Die Erscheinung unterschiedlicher Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten in Tiefwasser lässt sich deutlich im Wellenkanal beobachten: Beim Einschalten des Wellengenerators breiten sich die Wellen zwar mit Phasengeschwindigkeit aus, verlieren jedoch im Bereich der Wellenfront deutlich an Höhe, da hier die Orbitalbewegung in Gang gebracht und somit potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt wird. In folge davon breitet sich die Gesamtenergie bzw. die Wellenfront im Mittel mit der niedrigeren Gruppengeschwindigkeit c_{gr} aus (Abb. 2.5).

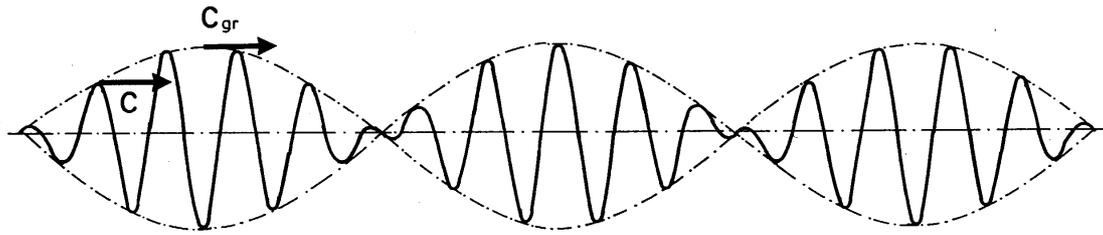


Abb. 2.5: Ausbreitung einer Wellengruppe (Clauss et al., 1992)

Umgekehrt beobachtet man nach Abschalten der Wellenmaschine, dass die Wellenbewegung nicht plötzlich abbricht, sondern weitere Wellen generiert werden. Diese Erscheinung beruht auf der Rückwandlung kinetischer in potentielle Energie im Nachlauf der letzten, vom Generator erzeugten Welle.

Abschließend werden in der Strömungsmechanik gebräuchliche Kennzahlen angegeben. Die *Froude* und *Reynolds-Zahl* werden aus der Anströmgeschwindigkeit v_0 , der charakteristischen Länge l_0 , der Erdbeschleunigung g und der kinematischen Viskosität ν berechnet:

$$\text{Froude-Zahl:} \quad Fr = \frac{v_0}{\sqrt{gl_0}} \quad (2.8)$$

$$\text{Reynolds-Zahl:} \quad Re = \frac{v_0 l_0}{\nu} \quad (2.9)$$

Die *Froude-Zahl* gibt das Verhältnis von Trägheitskraft zu Schwerkraft bzw. von kinetischer Energie zu potentieller Energie an. Die *Reynolds-Zahl* gibt das Verhältnis von Trägheitskraft zu Zähigkeitskraft an. In Modellversuchen in Wasser sind beide Kennzahlen nicht gleichzeitig in Übereinstimmung mit der Großversion zu bringen.

Als Maß für Transmission und Reflexion von Wellen sind in der Literatur die folgenden Koeffizienten gebräuchlich:

$$\begin{aligned} \text{Transmissionskoeffizient:} \quad C_t &= \frac{H_t}{H_i} \\ \text{Reflexionskoeffizient:} \quad C_r &= \frac{H_r}{H_i} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Die Koeffizienten beziehen die transmittierte und reflektierte Wellenhöhe auf die Wellenhöhe der ungestörten Initialwelle und sind daher dimensionslos.

2.2 Allgemeine Verfahren zur Wellendämpfung

Im Küsteningenieurwesen finden Wellenbrecher in verschiedenen Bauformen eine breite Anwendung. Einen Überblick über typische Wellenbrecher und deren Klassifizierung nach *Bergmann et al. (1999)* liefert Abb. 2.6. Entsprechend der Bauform lassen sich die meisten Bauwerke in senkrechte und geschüttete Wellenbrecher einteilen. Wellenbrecher, die sich nicht in diese Kategorie einordnen lassen, werden als Sonderbauweisen definiert.

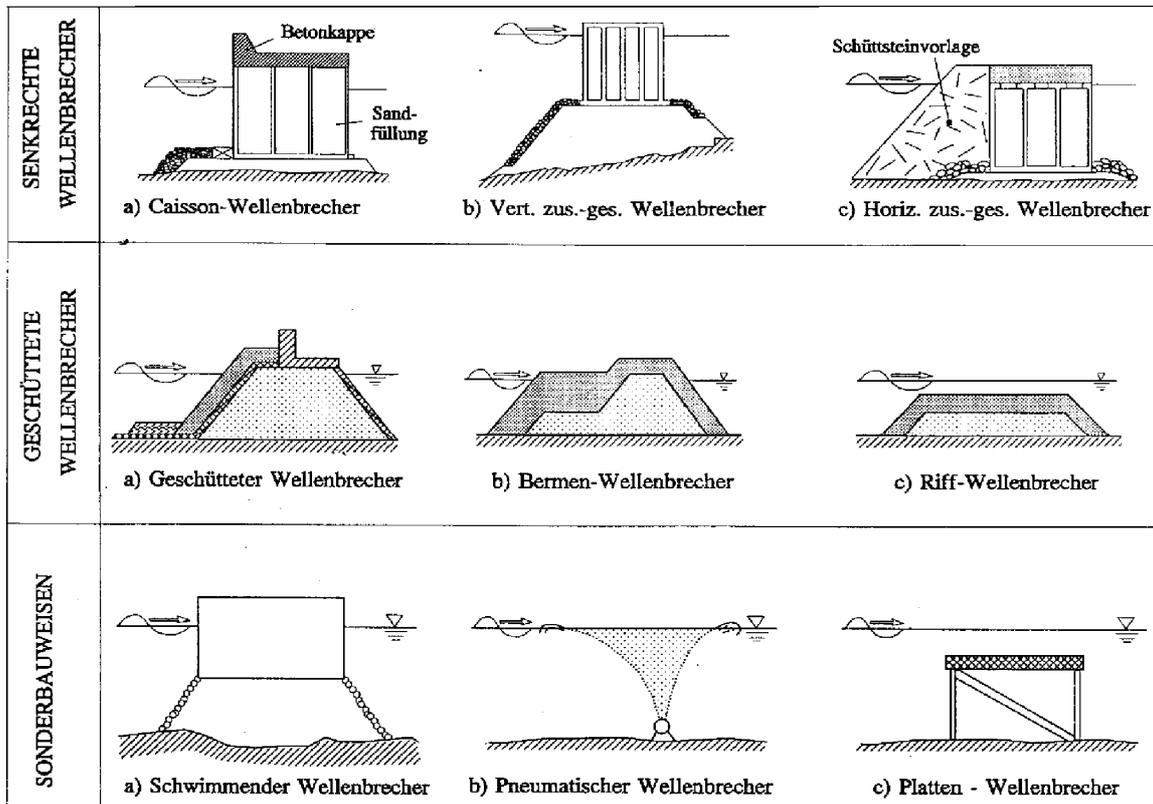


Abb. 2.6: Überblick über Wellenbrechertypen nach *Bergmann et al. (1999)*

Die senkrechten Wellenbrecher werden überwiegend als passive Bauwerke zum direkten Schutz von Hafenanlagen und Küstenabschnitten verwendet. Die geschütteten Wellenbrecher und insbesondere der Riff-Wellenbrecher werden häufig als aktive Bauwerke im Küstenvorfeld installiert.

Der Einsatz des jeweiligen Wellenbrechertyps richtet sich nach den Nutzungsvorgaben, den örtlichen Gegebenheiten, Umweltrichtlinien, den zu erwartenden Baukosten und der Bedeutung des Wellenbrechers (*Oumeraci, 1994*). Nicht zuletzt spielt auch die Erfahrung der planenden Ingenieure und der ausführenden Baufirma eine Rolle. So werden beispielsweise in Japan sehr häufig horizontal zusammengesetzte Wellenbrecher eingesetzt, die daher auch als „Japanische Wellenbrecher“ bekannt sind. Die Grundidee dieser Wellenbrecher besteht darin, dass die Schüttsteinvorlage bereits einen Teil der Wellenkräfte aufnimmt und somit die resultierende Maximalkraft auf den Caisson verringert. Die geringeren Belastungen ermöglichen eine günstigere Bauausführung des Caissons, die allerdings mit den Mehrkosten für die Stein- schüttung verrechnet werden muss.

In der praktischen Anwendung bestehen geschüttete Wellenbrecher (ausgetaucht) und Riff-Wellenbrecher (getaucht) sehr oft aus Steinen. Die Vorteile einer relativ einfachen Bauausführung („Steine ins Wasser fallen lassen“) und der an vielen Orten gegebenen Verfügbarkeit des Baustoffes überwiegen oft die Nachteile bezüglich Standfestigkeit und Bauvolumen.

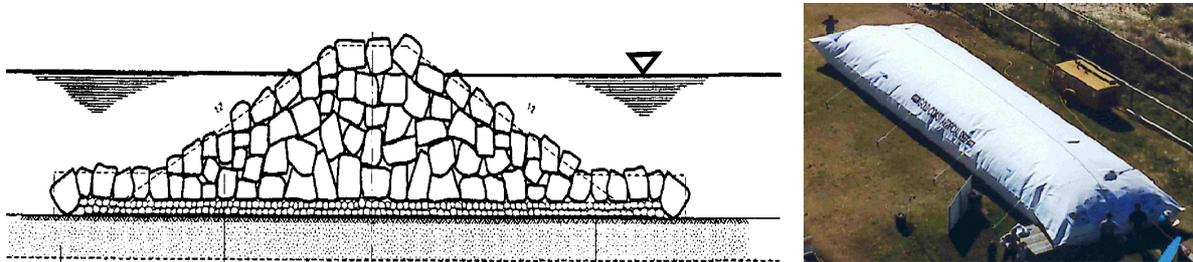


Abb. 2.7: Aus Steinen geschütteter Wellenbrecher und Alternative aus Geotextil/Sand

Ein Ersatz der Steinbauweise kann durch die Verwendung von Sandsäcken aus Geotextilien erfolgen (Heerten *et al.*, 2000). Diese Sandsäcke (Abb. 2.7, rechts) können in verschiedenen Größen und Gewichten hergestellt werden. Das Füllmaterial (Sand) wird von hochfesten Geotextilien umgeben und wird vor Ort abgefüllt. Dies kann unter Umständen einen erheblichen Preisvorteil mit sich bringen. Mit dieser Technik wurde beispielsweise vor der australischen „Goldcoast“ ein künstliches Strandprofil erzeugt, das für den Küstenschutz und gleichzeitig für den Surfsport optimiert wurde.

Ein weiteres praktisches Beispiel für erfolgreichen Küstenschutz wird von Stückrath *et al.* (1998) gegeben. An dem besonders gefährdeten Steilküstenabschnitt Streckelsberg bei Koserow auf der Insel Usedom wurden drei aus Steinen geschüttete Wellenbrecher installiert. Dadurch wird an diesem Steilküstenabschnitt der Küstenrückgang gestoppt und auch die Flachküste geschützt, die sich quasi an der Steilküste „aufhängt“.

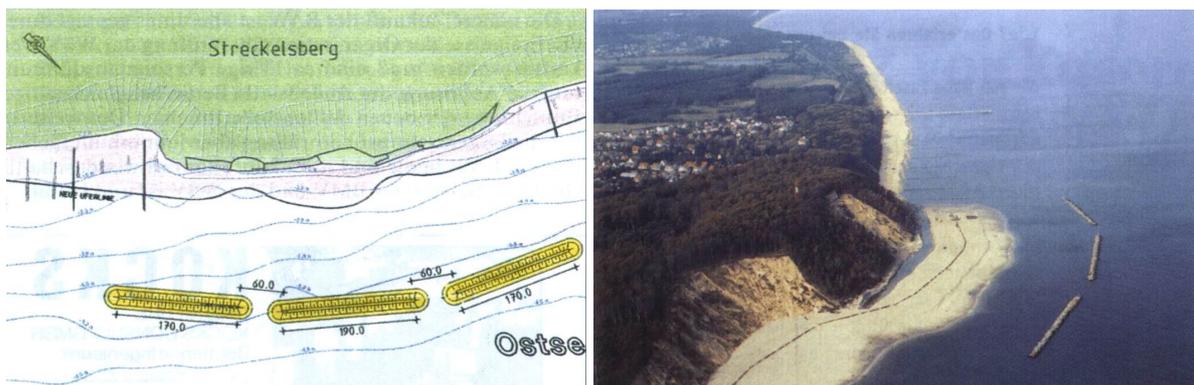


Abb. 2.8: Uferschutz vor Koserow durch Wellenbrecher nach Stückrath *et al.* (1998)

Ist keine effektive Möglichkeit gegeben, den Sandabtransport zu stoppen, wird häufig auf die Methode des Sandvorspülens zurückgegriffen, um die Küste zu erhalten. Auf der Insel Sylt werden dafür beispielsweise mehrere Millionen DM pro Jahr ausgegeben.

2.3 Analyse durchlässiger Strukturen

Die Wechselwirkungen zwischen Welle und Struktur spielen in verschiedenen Gebieten der maritimen Technik und des Küsteningenieurwesens eine wichtige Rolle. Durchlässige und aufgelöste Strukturen werden sowohl beim Hafen- und Küstenschutz als auch in der Offshore Industrie zur Beeinflussung der Wellenfelder und Wellendämpfung eingesetzt.

Das grundlegende Prinzip von porösen Filtern zur Wellendämpfung beruht auf der Tatsache, dass eine auf das System einlaufende Welle zu einem Teil transmittiert, zum anderen Teil reflektiert und dissipiert wird (vgl. Abb. 1.1, Abb. 2.13). Dieses Verhalten leitet *Jarlan* (1961) aus den in der Akustik gültigen Regeln analog für Wasserwellen ab. Er entwirft einen durch die Wasserlinie ragenden Absorber, der aus einer durchlässigen Wand vor einer undurchlässigen Rückwand aufgebaut ist. *Jarlan* folgert aus den theoretischen Betrachtungen, dass es möglich ist, Wellen durch den Einbau durchlässiger Wände zu dämpfen und kann dies experimentell bestätigen.

Tanimoto und *Takahashi* (1994) stellen experimentelle Untersuchungen an Wellenbrechern und Wellenabsorbern (Abb. 2.9) zum Schutz von Häfen vor. Die Wellenabsorber bestehen aus zylindrischen Elementen mit einer durchlässigen Wand vor einer undurchlässigen Rückwand (Caisson). Sie weisen darauf hin, dass sowohl die Reflexion als auch die auf die Struktur wirkenden Wellenkräfte abgemindert werden, wenn zusätzlich vor dem Caisson eine oder mehrere durchlässige Wände installiert sind. Die „numerischen“ (=analytischen) Ansätze beschränken sich auf die Prognose der Belastungen der verwendeten Strukturen.

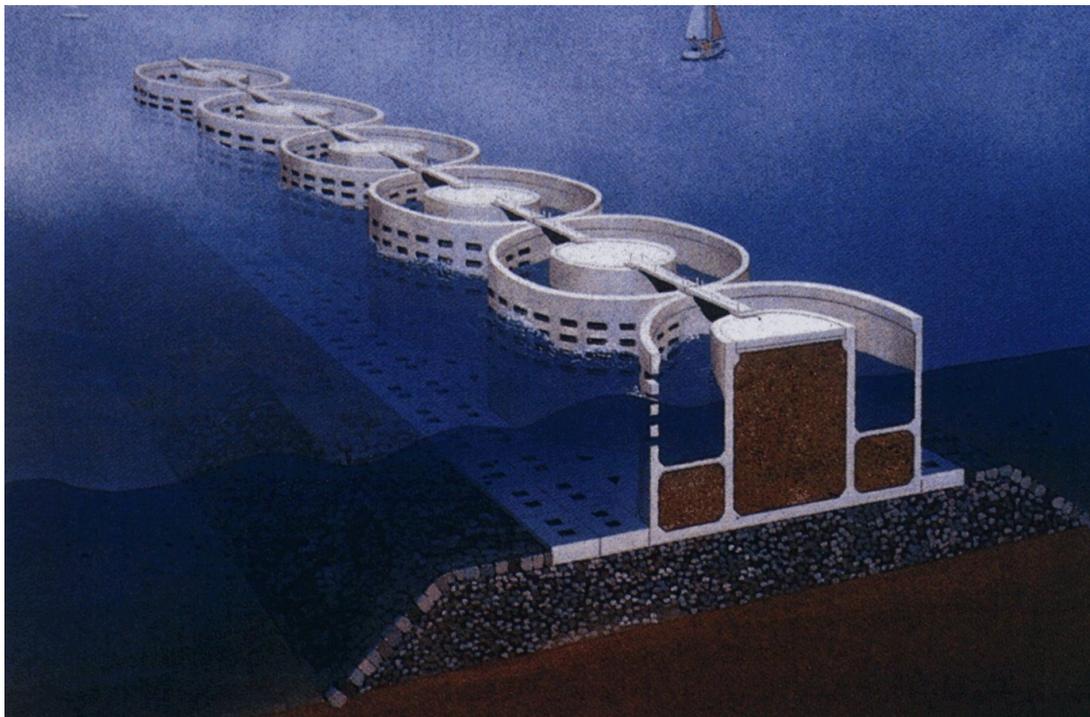


Abb. 2.9: Wellenabsorber nach *Tanimoto* und *Takahashi* (1994)

Bergmann und *Oumeraci* (1998) untersuchen die Druckverteilung auf die aus porösen Einzelwänden bestehenden Absorbersysteme in großmaßstäblichen Versuchen. *Clauss* und *Kuhlmann* (1995) entwickeln Entwurfsansätze für derartige Absorbersysteme auf der Basis

systematischer Modellversuche mit transienten Wellenpaketen. Eine Methode zur Optimierung dieser Systeme für den Einsatz als Seegangabsorber zur Wellendämpfung in Häfen und Binnenwasserstraßen wird von *Kuhlmann* (1998) vorgestellt.

Urashima und *Kondo* (2000) untersuchen konventionelle Caisson-Wellenbrecher und eine Abwandlung mit durchlässigen Wänden hinsichtlich der resultierenden Kräfte. Als Ergebnis stellen sie fest, dass durch die Verwendung von zwei durchlässigen Wänden die resultierenden Kräfte im Vergleich zu konventionellen Systemen um mehr als die Hälfte reduziert werden.

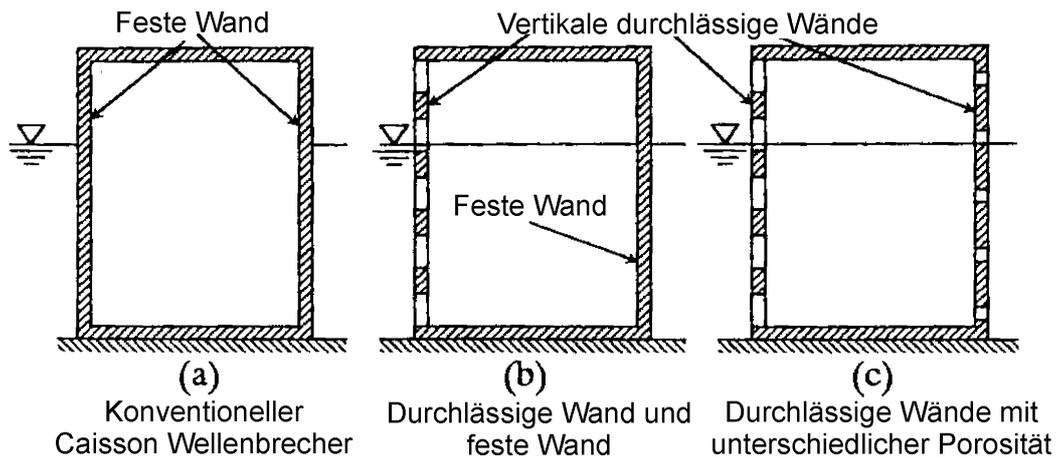


Abb. 2.11: Verschiedene „Caisson“ Wellenbrecher nach *Urashima und Kondo* (2000)

Zum Schutz der *Ekofisk* und *Ninian* Bohrplattformen mit einer über Jahrzehnte reichenden Lebensdauer wurde nach dem Prinzip von *Jarlan* die durchlässige Struktur so ausgelegt, dass neben maximaler Wellendämpfung auch die Belastungen optimiert werden. In Abb. 2.10 ist die bei der *Ninian* Plattform realisierte Anwendung einer durchlässigen Struktur zu sehen. Die durchlässige Außenhülle schützt die tragende Struktur der Bohrplattform. Allerdings ist der zusätzliche Bauaufwand erheblich. Daher wird bei der Planung anderer Plattformen eine in der Nähe der Wasserlinie möglichst „schlanke“ und dadurch transparente Tragstruktur verwendet, um die auftretenden Kräfte in diesem Bereich gering zu halten. Durch diese Bauweise kann auf eine Schutzhülle verzichtet werden.

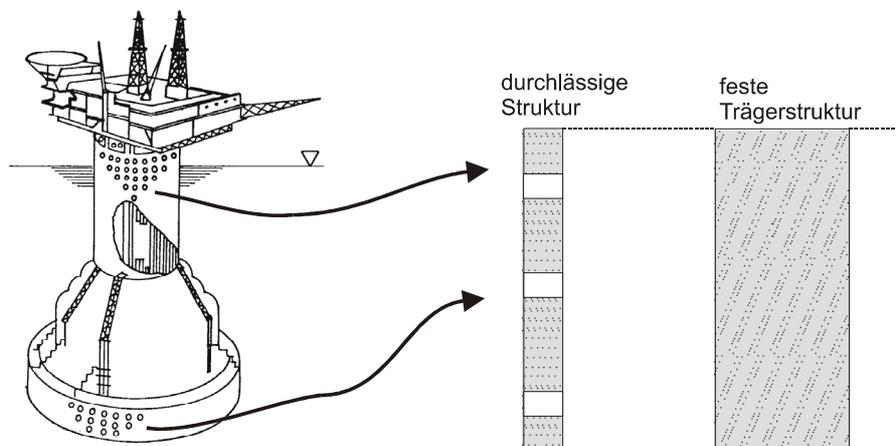


Abb. 2.10: Prinzipskizze der *Ninian* Plattform mit durchlässiger Außenstruktur

Ein spezielles Anwendungsgebiet durchlässiger Strukturen ist der Einbau von Seitenwandabsorbern in Modellversuchen (Clauss und Chen 1990). Mehrere optimal angeordnete Lochbleche verhindern die Entstehung von Seitenwandreflexionen. Diese treten in Experimenten aufgrund von Radiations- und Diffraktionswellen des Modells im Wellenfeld auf. Durch den Einbau der durch die Wasserlinie ragenden Seitenwandabsorber können Beeinträchtigungen der Messung vermieden werden. Die Porosität der Lochbleche nimmt zur Wand hin ab und wird zusammen mit dem Abstand zwischen den Blechen auf ein gegebenes Seegangsspektrum hin optimiert. Der Vorteil dieser Absorber ist, dass sie gegenüber herkömmlichen Böschungen einen geringeren Platzbedarf benötigen und dadurch der Einbau in engen Versuchskanälen möglich ist.

Diese Seitenwandabsorber werden am Fachgebiet Meerestechnik für verschiedene Seegangsversuche herangezogen. Abb. 2.12 zeigt beispielsweise den Versuchsaufbau, wie ihn Clauss und Vannahme (1999) für dynamische Versuche mit Schwimmkranen realisiert haben. Die Absorber werden nur in dem Bereich des Kanals seitlich angebracht, in dem das Modell untersucht wird und Wechselwirkungen mit den Kanalwänden entstehen.

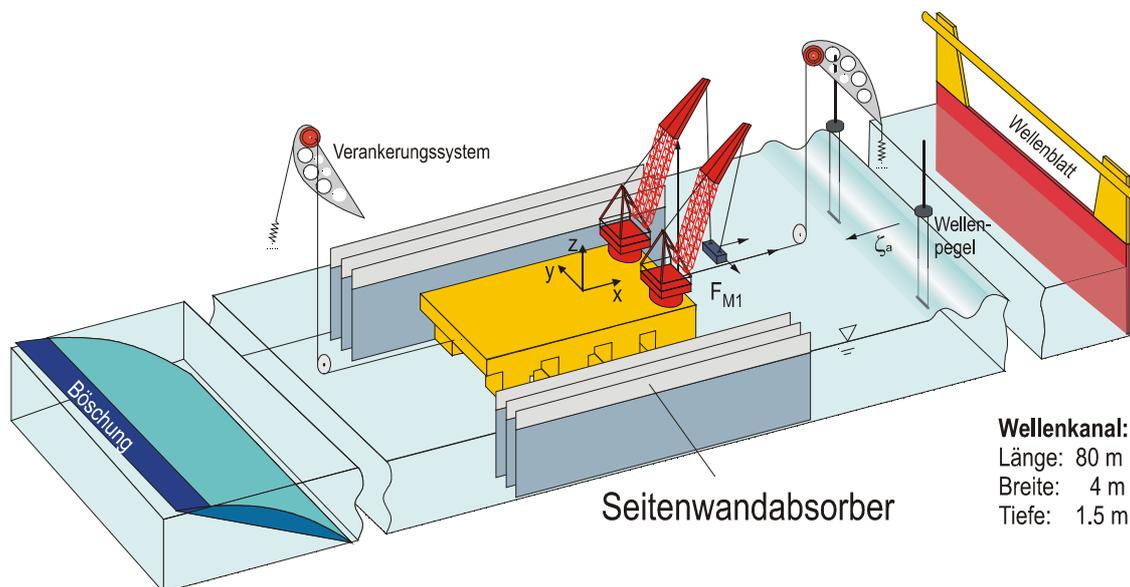


Abb. 2.12: Einbaubeispiel für Seitenwandabsorber in Seegangsversuchen

Mit der externen Energiedissipation durch Verwirbelung und Wellenbrechung vor und an getauchten (aber undurchlässigen) Strukturen haben sich versuchstechnisch Hyun und Shin (1997) und Iwata *et al.* (1996) befasst. In den Versuchen steht neben der Festlegung spezieller Brecherkennzahlen und Brechertypen bei schlagartiger Abminderung der Wassertiefe die Ermittlung des Verhältnisses von Wellenhöhe zu Wasserüberdeckung des Bauwerkes für die Klassifikation brechender und nichtbrechender Wellen im Vordergrund.

Die Aufspaltung der Seegangenergie in höherfrequente Anteile beim Wellenbrechen wird von Sayao (1995) untersucht. Er ermittelt in Modelluntersuchungen - unabhängig von der Charakteristik der einlaufenden Wellen - eine Reduktion der Wellenperiode um rund 25%.

Durch die Analyse systematischer Modellversuche mit transienten Wellenpaketen an getauchten Filtern können Clauss und Habel (1999) die hydrodynamischen Eigenschaften und die wichtigsten Einflussparameter für das Transmissionsverhalten poröser Bauwerke bestimmen. Sie stellen fest, dass durch Interaktion eines Wellenfeldes (Abb. 2.13) mit getauchten Filtern lange Wellen gedämpft werden und ein Teil ihrer Energie in kurze, hochfrequente

Wellen transformiert wird. Diese nichtlineare Transformation von Seegangenergie langperiodischer Wellen in hochfrequente Komponenten bewirkt eine selektive Dämpfung erosionsfördernder Seegangsanteile. Das größere Erosionspotential langer Wellen beruht auf der Tatsache, dass deren Partikelgeschwindigkeiten nach Gl. (2.4) bei gleicher Wellenhöhe und Wassertiefe in Bodennähe höher sind als bei kurzen.

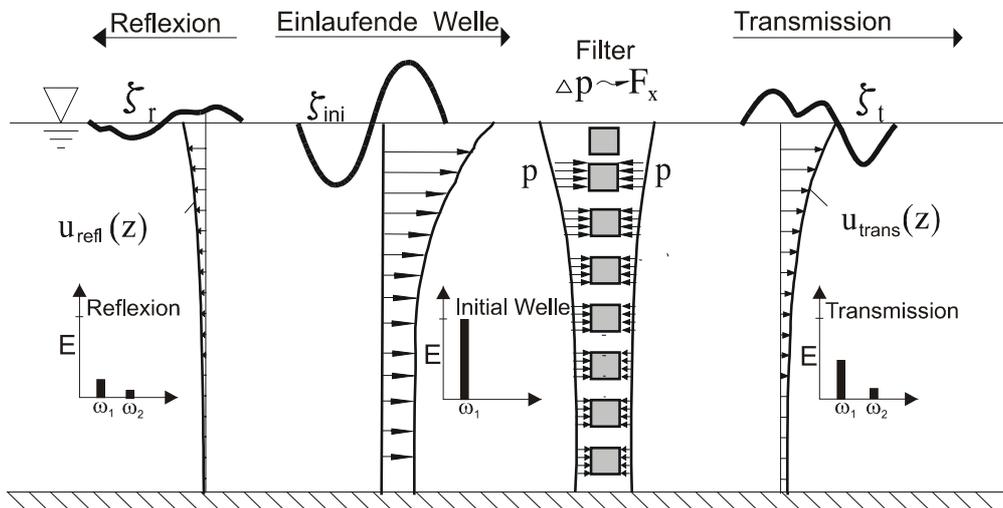


Abb. 2.13: Prinzipdarstellung: Transmission und Reflexion an einem getauchten Einzelfilter

Die vorgestellten Erkenntnisse für über die Wasserlinie ragende Absorber-Strukturen sind als Ausgangsbasis geeignet, um im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Tauglichkeit von ebenfalls porösen, allerdings getauchten, bis kurz unter die Wasserlinie reichende Strukturen für den Einsatz im Küstenschutz zu untersuchen.

Die hydromechanischen Wirkungsprinzipien, die Energieflüsse und –transformationen können in den vorangegangenen Untersuchungen nicht umfassend geklärt werden. Um insbesondere Turbulenzen und Verwirbelungen im Nahfeld des Bauwerkes und die damit verbundenen Prozesse wie z.B. Lufteintrag, Energiedissipation etc. abzubilden, wäre eine instationäre Erfassung von Felddaten (Drücke, Geschwindigkeiten, ...) notwendig. Dies ist messtechnisch bisher nur mit größtem Aufwand und unter Laborbedingungen im kleinen Maßstab möglich.

Zur Auslegung und Optimierung von Künstlichen Riffen ist daher neben der Messung eine numerische Methode erforderlich.

2.4 Numerische Verfahren

Eine Kategorie „numerischer“ Verfahren für durchlässige Strukturen basiert auf analytischen Lösungen, die aus der linearen Wellentheorie hergeleitet wurden. Damit können - nach Abgleich mit Messungen - in Teilbereichen zufriedenstellende Ansätze für Transmission und Reflexion gegeben werden. Eine Aufdeckung der Wirkungsprinzipien, die für nichtlineare Effekte und Dissipation verantwortlich sind, ist damit jedoch nicht möglich. Dies ist aber dringend notwendig, um die Genauigkeit und Treffsicherheit dieser Verfahren zu erhöhen bzw. neue Ansätze zu formulieren. Daher werden im Anschluss an die Darstellung bestehender linearer Analysemodelle, geeignete Verfahren zur nichtlinearen Strömungsberechnung diskutiert.

Erste Ansätze zur Beschreibung der Transmissionscharakteristik von getauchten Strukturen werden von *Dean (1945)* und *Johnson et al. (1951)* vorgeschlagen. Der analytische Ansatz von *Johnson et al. (1951)* für den Transmissionskoeffizienten C_t lautet:

$$C_t = \sqrt{1 - \frac{2kd_s + \sinh(2kd_s)}{2kd + \sinh(2kd)}} \quad (2.11)$$

mit C_t als Verhältnis von transmittierter zu einlaufender Wellenhöhe, Tiefe d , Strukturhöhe d_s , Wellenzahl k

Damit kann die Transmission durch ein getauchtes undurchlässiges Bauwerk mit der Strukturhöhe d_s beschrieben werden.

Wiegel (1960) formuliert einen ähnlichen Ansatz für getauchte und durchlässige Strukturen. Danach beruht, wie bei *Johnson et al. (1951)*, der Anteil transmittierter Energie auf einer rein geometrischen Aufteilung des ungestörten horizontalen Geschwindigkeitsprofils vor der Wand (Abb. 2.14).

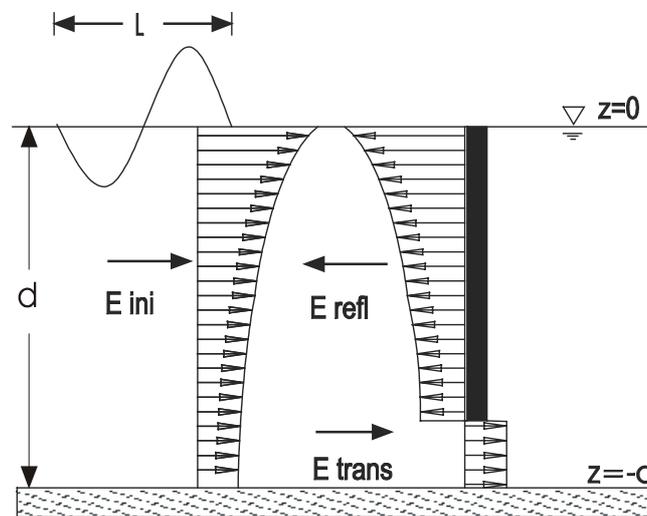


Abb. 2.14: Energietransfer an einer getauchten Wand nach der Theorie von *Wiegel (1960)*

Das bedeutet, dass nur ein horizontaler Energiefluss berücksichtigt wird. Der in der Realität in Wandnähe auftretende Energietransfer in vertikaler bzw. Tiefenrichtung bleibt unberücksichtigt. Nach linearer Wellentheorie und der Annahme, dass die Porosität P sich gleichmäßig über die Tiefe verteilt, ergibt sich für die transmittierte Energie E_t und den Transmissionskoeffizienten C_t :

$$E_t = E_i \cdot P \quad (2.12)$$

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} = \sqrt{\frac{E_t}{E_i}} = \sqrt{P} \quad (2.13)$$

mit H_t ... transmittierte Wellenhöhe
 H_i ... initiale Wellenhöhe

Diese Ansätze, wie auch der folgende von *Hartmann* (1969) der den Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit der Verbauung W bzw. der Porosität P darstellt, ergeben zwar einen qualitativ richtigen Verlauf von Transmission und Reflexion, unterschätzen jedoch für den Fall getauchter Strukturen die Energie, die über das Bauwerk hinwegströmt.

$$C_t = \sqrt{1 - W^2} = \sqrt{2P - P^2} \text{ mit Verbauung } W = 1 - P \quad (2.14)$$

Für Bauwerke, die über die Wasserlinie ragen, stellt *Kuhlmann* (1998) einen numerischen Ansatz vor, der unter Verwendung empirisch ermittelter Faktoren und auf der Basis der linearen Wellentheorie in der Lage ist, die Wellentransmission und Reflexion für beliebige Seeangsspektren zu ermitteln. Damit ist er in der Lage, Absorbersysteme bezüglich Porosität und Kammerabstand zu optimieren. Allerdings sind empirische Faktoren und damit die Durchführung von Modellversuchen im Vorfeld notwendig. Ein „Überspülen“ des Bauwerks wird in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Kriebel und Bollmann (1996) erweitern die Theorie von *Wiegel* (1960) für vertikale Wellenbrecher, indem sie bei der Interaktion zwischen Welle und Struktur die reflektierte Welle berücksichtigen. Ausgehend von der Kontinuitätsgleichung im Bereich der Bauwerksöffnungen leiten Sie die folgende Beziehung zwischen dem Transmissionskoeffizienten C_t und dem Reflexionskoeffizienten C_r ab:

$$C_t = 1 - C_r \quad (2.15)$$

Dieser Zusammenhang besitzt empirischen Charakter mit Gültigkeit für vertikale Wände und Einzelfilter, ist aber in dieser Form nicht auf Strände, Böschungen oder Steinschüttungen anwendbar. Auch in diesem Modell wird die Randbedingung der linearen Wellentheorie beibehalten, bei der die Wasserspiegelauslenkung an der Oberfläche gleich Null ist. Daher gibt auch dieses Modell den Einfluss des Wellenüberlaufs bei getauchten Strukturen ungenügend wieder. Eine direkte Bestimmung der Dissipation ist mit den vorgestellten Modellen nicht möglich.

Der Vergleich von *Abul-Azm* (1993) zwischen seinem eigenen linearem Prognosemodell, dem analytischen Verfahren von *Johnson et al.* (1951) und Messwerten von *Dick* und *Brebner* (1968) sowie *Khader* und *Rai* (1980) zeigt, dass mit den bisherigen Ansätzen bei der Wellentransmission teilweise erhebliche Prognosefehler gemacht werden. Die bisherigen Ansätze geben zwar einen qualitativ richtigen Verlauf der Transmission – unterschätzen jedoch die Energie, die durch und über das Bauwerk strömt in dem Bereich von $0,6 < d_s/d < 0,95$ erheblich (Abb. 2.15).

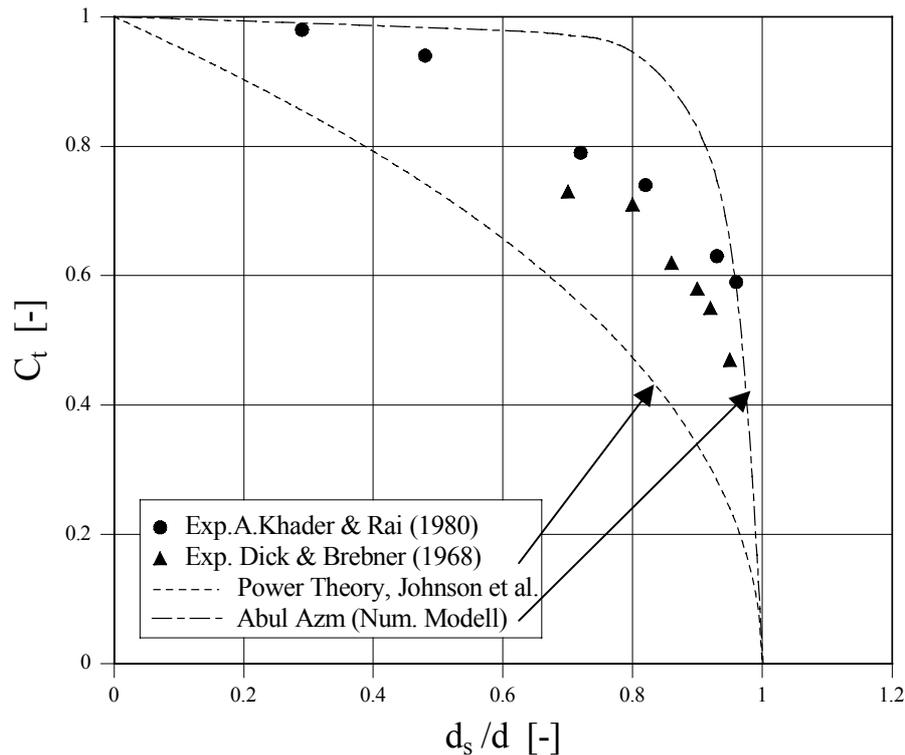


Abb. 2.15: Vergleich Messung/Theorie nach *Abul-Azm* (1993)

Daran wird deutlich, dass eine rein geometrische Aufteilung des horizontalen Geschwindigkeitsprofils und die Randbedingungen der linearen Wellentheorie den Anforderungen nicht genügen. Vielmehr zeigen systematische Experimente von *Clauss* und *Habel* (1999), dass durch die Bauwerksöffnungen und (bei getauchten Strukturen) über das Bauwerk hinweg eine größere Energiemenge transmittiert, als in den analytischen Modellen berücksichtigt wird.

Es wird daher in Kapitel 4 dieser Arbeit durch die Einführung modifizierter Randbedingungen ein lineares semi-empirisches Modell entwickelt, das für getauchte Strukturen eine verbesserte Prognose von Transmission und Reflexion liefert und insbesondere den Einfluss des Wellenüberlaufs berücksichtigt. Die Dissipation ist mit diesem linearen Verfahren nur indirekt (auf der Grundlage empirischer Daten für Transmission und Reflexion) bestimmbar.

Im Wechselspiel zwischen Welle und Struktur spielen neben Geschwindigkeit und Druck auch Viskosität, Wirbel sowie die nichtlineare Beschreibung der freien Oberfläche eine Rolle. Daher muss zur vollständigen Beschreibung der Strömung um Unterwasser-Filter ein Verfahren gewählt werden, das in der Lage ist, all diese Phänomene zu erfassen. Grundsätzlich bieten Verfahren, die auf der Lösung der Navier-Stokes (NS) bzw. der zeitlich gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANSE) basieren, diese Möglichkeit. RANSE basierte CFD Methoden werden für komplexe Strömungsberechnungen erfolgreich bis zu Reynolds-Zahlen von ca. 10^6 - 10^7 eingesetzt (*Larsson et al.*, 1998). Höhere Reynoldszahlen erfordern bei gleicher Rechengenauigkeit ein feineres Rechengitter und entsprechend angepasste Turbulenzmodelle. Zur Entwicklung solcher Turbulenzmodelle stehen im sehr hohen Reynolds-Zahl Bereich ($>10^9$) allerdings nur ungenügend experimentelle Untersuchungen zur Verfügung. Die Reynolds-Zahlen für die Versuche im großen Wellenkanal (GWK) liegen in einer Größenordnung von 10^5 bis 10^6 und daher in einem für die Berechnung akzeptablen Bereich.

Als besonderes Problem für die Berechnung von Künstlichen Riffen in Seegang erweist sich die Berücksichtigung der freien Oberfläche und der Wellenkinematik. *Ferziger* und *Perić* (1996) erläutern verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung der freien Oberfläche und die Grundlagen verschiedener CFD-Methoden. Sie unterscheiden diese Möglichkeiten in:

- Methoden mit exakter Trennfläche („Oberflächenmethoden“). Hier folgt das Gitter der nichtlinearen zeitlich veränderlichen freien Oberfläche. Dazu ist es notwendig, das Rechengitter zu jedem Zeit- bzw. Rechenschritt der Oberfläche anzupassen.
- Methoden ohne exakte Trennfläche („Volumenmethoden“). Hier wird die Trennfläche zwischen Luft und Wasser auf dem bestehenden Rechengitter abgebildet. Das Rechengitter bleibt somit während des gesamten Simulationsvorganges konstant. Allerdings muss ein zusätzlicher Algorithmus zur Bestimmung der Trennfläche gelöst werden.

Innerhalb dieser Kategorien gibt es zur Berücksichtigung der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft verschiedene Methoden. Beispielsweise wenden *Takikawa et al.* (1997) die Marker – and – Cell (MAC) Methode an, um Wellen über einem getauchten quaderförmigen und undurchlässigen Wellenbrecher zu untersuchen. Die Ergebnisse werden mit „Particle Tracking Velocimetry (PTV)“ Geschwindigkeitsmessungen verglichen. Bei der MAC-Methode werden Regionen im Rechnetzzwerk gekennzeichnet, die entweder mit Wasser oder mit Luft gefüllt sind. Mit der MAC-Methode können auf diese Weise Regionen in einzelnen Zellen unterschieden werden, die voll Flüssigkeit oder leer sind. Daraus kann dann der Verlauf einer Trennfläche - der freien Oberfläche - ermittelt werden. Die große Anzahl von Marker-Partikeln treibt jedoch den benötigten Speicherbedarf für eine Rechnung erheblich in die Höhe. Als weitere Möglichkeit zur gekoppelten Berechnung mit freier Oberfläche berechnen *Muzaferja et al.* (1995) die Strömung um ein Profil mittels Oberflächenverfolgung und bewegten Gittern. Durch die Anpassung des Gitters an die freie Oberfläche erhalten sie eine exakte Trennschicht zwischen Luft und Wasser. Allerdings ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, sich überschneidende Grenzflächen zu berücksichtigen, wie sie zum Beispiel bei brechenden Wellen entstehen.

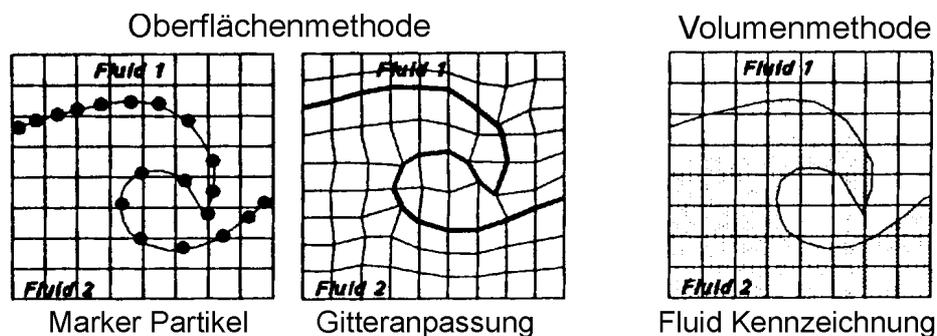


Abb. 2.16: Methoden zur Bestimmung der Trennschicht zwischen Fluiden

Eine Kategorie numerischer Verfahren verwendet eine Kopplung von RANSE (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) und VOF (Volume of Fluid) Methode. Die dabei verwendete VOF-Methode basiert auf Arbeiten von *Harlow* und *Welch* (1965) sowie *Hirt* und *Nichols* (1981). Im Gegensatz zur MAC-Methode wird hierbei eine neue Variable eingeführt, die einen Wert zwischen 0 (100% Luft) und 1 (100% Wasser) annehmen kann. Dadurch ist es möglich, stark verformte Oberflächen und sogar brechende Wellen zu simulieren. Mit einem solchen Verfahren berechnet *Wu* (1994) die Druckschlagbelastung auf senkrechte Wände, wobei er zur Beschreibung der freien Oberfläche ein „Donator-Acceptor-Verfahren“ verwendet und laminare Strömung voraussetzt. Aufgrund der laminaren Strömung können in der Re-

alität auftretende Turbulenzen nicht bestimmt werden. Ein Durchströmen bzw. Überspülen der Struktur wird nicht berücksichtigt.

Zur exakteren Beschreibung der Trennschicht zwischen zwei Fluiden wird von *Ubink* (1997) der sogenannte CICSAM⁴-Algorithmus als Erweiterung des „Donator-Acceptor“ Verfahrens vorgeschlagen, der die Beschreibung der freien Oberfläche verbessert. Für die vorliegende Arbeit wird dieses von *Ubink* vorgeschlagene und in die VOF-Methode integrierte CICSAM-Differentiations-Schema verwendet. Dieser Algorithmus steht in dem Strömungslöser STAR-CD zur Verfügung und kann mit verschiedenen Turbulenzmodellen und den zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) gekoppelt werden.

Auf der Grundlage dieses Verfahrens führen *Clauss* und *Habel* (2000) eine Berechnung von Wellen mit freier Oberfläche durch und können die Ergebnisse experimentell validieren. Durch Weiterführung der vorangegangenen Untersuchungen wird in der vorliegenden Arbeit die Strömung um eine komplexe, durchlässige und getauchte Struktur innerhalb des Wellenfeldes unter Berücksichtigung von Viskosität, Turbulenz und der freien Oberfläche numerisch berechnet und ausführlich analysiert. Aufbauend auf dem RANSE/VOF Verfahren wird eine effektive Vorgehensweise zur Geometriemodellierung und Diskretisierung des Rechengebietes vorgestellt. Insbesondere an die Gittergenerierung unter Berücksichtigung der Rechenkapazität und -genauigkeit werden höchste Ansprüche gestellt. Die zur Erzeugung der Wellen erforderliche Kinematik am Wellenblatt wird im Rahmen der Arbeit entwickelt und in das vorhandene Strömungsprogramm integriert.

Es wird untersucht, ob mit der vorgeschlagenen Vorgehensweise die exakte Modellierung von Schwerewellen möglich ist. Außerdem soll gezeigt werden, dass mit einer problemangepassten Diskretisierung des Rechengebietes die nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen Wellen und porösen Strukturen erfolgreich berechnet werden können. Zum Vergleich mit Initialrechnungen kommen im Rahmen der Arbeit ermittelte Versuchsdaten und Wellentheorien zum Einsatz.

⁴ CICSAM ... Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes

3 Versuchsaufbau und -programm

Zielstellung der experimentellen Untersuchungen ist die Validierung der numerischen Verfahren sowie die Analyse der Strömungsphänomene an Künstlichen Riffen und damit die Diskussion der hydrodynamischen Eigenschaften solcher Strukturen. Die Versuche werden in zwei Wellenkanälen der TU Berlin und in Kooperation mit der TU Braunschweig am Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover durchgeführt. In diesem Kapitel werden die einzelnen Wellenkanäle, der Versuchsaufbau und die Messtechnik erläutert. Die experimentelle Analyse und die Ermittlung globaler Kennwerte erfolgt in Kapitel 4.

3.1 Wellenkanäle

Die Versuche werden in Wellenkanälen verschiedener Maßstäbe durchgeführt. Dabei ergeben sich folgende Untersuchungsschwerpunkte:

- Kleiner Wellenkanal (KWK) des Fachgebiets Meerestechnik, TU Berlin:

Dieser Kanal (Abb. 3.1) besteht komplett aus Acrylglas und dient damit primär der Beobachtung von Strömungsvorgängen an getauchten Einzelfiltern und Filtersystemen. Der Kanal ist 12 m lang, 0,3 m breit und hat eine Wassertiefe d von 0,4 m. Im Kanal können optional bis zu zwei Wellenmaschinen installiert und getrennt angesteuert werden. Zur Generierung der Steuersignale wird ein Frequenzspektrum oder der zeitliche Verlauf der Wasserspiegelauslenkungen vorgegeben. Neben den Versuchen zur Visualisierung werden auch ergänzende Experimente und Vorversuche in diesem Kanal durchgeführt, die in den großen Wellenkanälen einen immensen Zeitaufwand mit sich bringen.

- Mittlerer Wellenkanal (MWK) des Instituts für Wasserbau, TU Berlin:

Hier werden systematische Untersuchungen an einzelnen Filterelementen und –systemen zur Analyse von Transmission, Reflexion sowie der Seegangsbelastungen durchgeführt. Der Wellenkanal ist 80 m lang, 4 m breit und hat eine Wassertiefe d von 1,5 m. Das Wellenblatt wird von einem Hydraulikzylinder angetrieben und ist in einem Pendelrahmen aufgehängt (Abb. 3.1). Die maximale Auslenkung des Wellenblattes beträgt $\pm 0,4$ m. Damit ist die Erzeugung beliebiger, hydrodynamisch sinnvoller Wellen (reguläre Wellengruppen, irregulärer Seegang und transiente Wellengruppen) im Bereich von $T=0,6$ s bis 5,0 s mit maximalen Wellenhöhen bis zu $H_{\max} = 0,6$ m möglich. Ein Messrechner steuert die Bewegung des Wellenblattes und registriert simultan die angeschlossenen Messkomponenten. Da neben Pegelmessungen in einigen Versuchen auch Einzelkräfte und Geschwindigkeiten registriert werden, eignen sich die Versuche auch zur Validation der Numerik.

- Großer Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste, Hannover:

Zur Überprüfung der in den Voruntersuchungen (MWK) erzielten Ergebnisse werden hier für ausgewählte Bauwerke großmaßstäbliche Versuche in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig durchgeführt. Der Wellenkanal hat eine Länge von 324 m, ist 5 m breit und es werden Wassertiefen d von 4 bis 5 m realisiert. Die zweiteilige Wellenklappe wird von einem Rechner angesteuert und im Pusherbetrieb mit einer maximalen Leistung von 900 kW angetrieben. Die Versuche eignen sich besonders gut zu Validationszwecken. Zum einen können

simultan 128 Sensoren (Pegel, Kräfte, Geschwindigkeiten) registriert werden. Zum anderen ermöglichen die großen Abmessungen des Kanals, eine Vielzahl der Sonden in unmittelbarer Nähe des Bauwerkes zu platzieren. So können beispielsweise Geschwindigkeiten im Nahfeld des Filters und zwischen den Filterelementen registriert werden.



Abb. 3.1: Ansicht der Wellenkanäle: KWK Berlin, MWK Berlin, GWK Hannover

3.2 Aufbau der Künstlichen Riffe

Zum Dämpfen der Wasserwellen werden getauchte Einzelfilter und Filtersysteme untersucht. Laufen Wellen gegen eine transparente Wand (Filterelement), so wird ein Teil der Wellen reflektiert, ein Teil transmittiert und ein Teil dissipiert. Der prinzipielle Aufbau eines einzelnen Filterelementes ist in allen Wellenkanälen ähnlich (Abb. 3.2). Ein Filterelement besteht aus mehreren Filterkomponenten, die horizontal angeordnet sind.

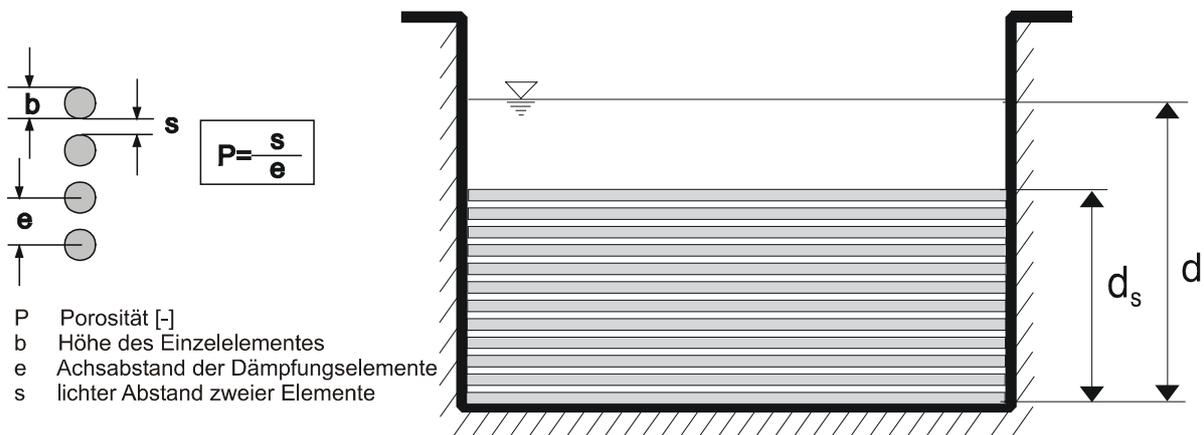


Abb. 3.2: Frontansicht eines Filterelementes mit relativer Bauwerkshöhe d_s/d

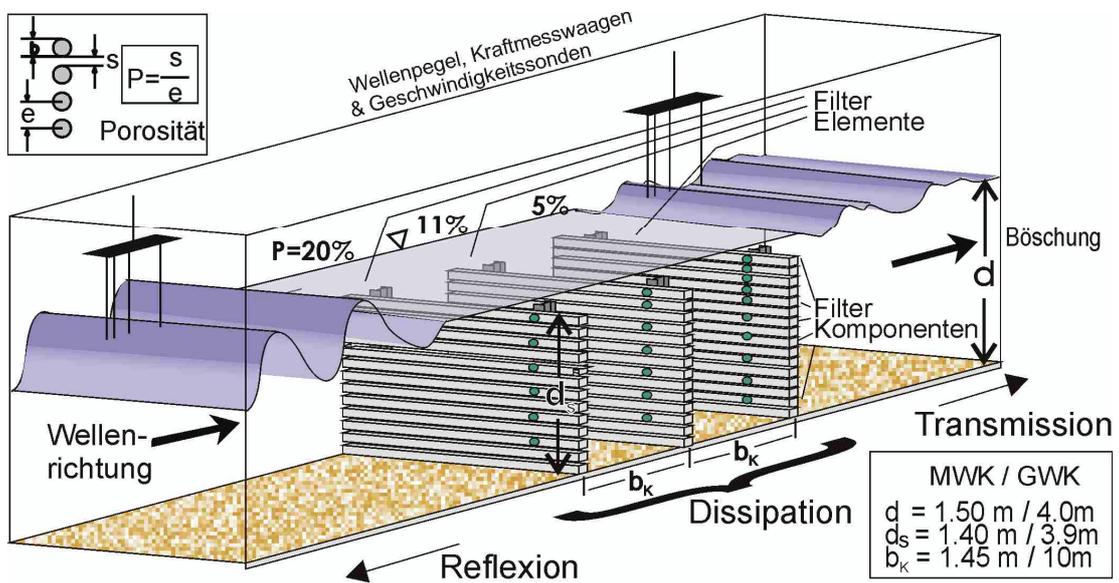
Diese Anordnung erlaubt eine tiefenabhängige Registrierung der Horizontalkraft. Die relative Bauwerkshöhe d_s/d ist ein wichtiger Einflussparameter bezüglich der hydraulischen Eigenschaften und kann durch die Anzahl der verwendeten Filterkomponenten verändert werden. Die Filterkomponenten bestehen aus Stahlrohren mit quadratischen bzw. runden Querschnitten. Die Kantenlänge b bzw. der Durchmesser der Komponenten beträgt 0,08m (MWK) und 0,18m (GWK). Die unterschiedliche Porosität (Abb. 3.2) der Filterwände ergibt sich durch den variablen Abstand der Filterkomponenten und berechnet sich aus dem Verhältnis der „offenen“ Querschnittsfläche des Filters zur Gesamtfläche bzw. aus dem Verhältnis des Spalts s zwischen zwei benachbarten Komponenten und ihrem Achsabstand e . Die Gesamtdurchlässigkeit des Systems bestimmt sich aus relativer Bauwerkshöhe d_s/d und Filterporosität P und wird zur besseren begrifflichen Abgrenzung als Verbauungsgrad W bzw. Verbauung bezeichnet.

Der Versuchsaufbau zur Registrierung der Reflexion, Transmission, des Horizontalkraftverlaufs und der Geschwindigkeiten wird am Beispiel eines 3-Filtersystems erläutert. Der prinzipielle Versuchsaufbau und die Positionen der verwendeten Filter und Sonden sind in Abb. 3.3 dargestellt. Der einlaufende Wellenzug wird an diesem System zum Teil reflektiert, zum Teil transmittiert und zum Teil dissipiert. Beim Übergang des Wellenfeldes über das Filtersystem kann in den Versuchen eine Transformation von langen Wellen in kurze festgestellt werden. Das dargestellte System besteht aus Einzelfiltern unterschiedlicher Porosität. Dabei nimmt die Porosität in Richtung Böschung ab. Dadurch wird erreicht, dass der Welle zunächst (Filter mit 20% Porosität) ein geringer Widerstand entgegengebracht wird und sie ungehindert in das System einläuft, ohne zu reflektieren. Am zweiten Filter (11% Porosität) steigt der Widerstand, wodurch ein Teil der Welle reflektiert und dissipiert wird. Schließlich erreicht der Wellenzug den letzten Filter (5% Porosität), wo er zu einem großen Teil reflektiert und dadurch wieder in Richtung der beiden anderen Filter geleitet wird. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Systemauslegung zu ermöglichen, welche die Dissipation maximiert und dadurch den

Anteil von Transmission und Reflexion auf ein definiertes Maß beschränkt. Dazu können die Filteranzahl n , die relative Bauhöhe d_s/d , die Filterporosität P und der Kammerabstand b_K des Systems variiert werden. Die untersuchten Konfigurationen und die verwendete Messtechnik werden später im Detail dargestellt.

Für die Experimente werden Einzelpegel und sogenannte Pegelharfen vor dem getauchten System installiert, um die Wasserspiegel-Auslenkungen der Initialwelle (ohne Struktur) sowie der reflektierten Welle (mit Struktur) zu registrieren. Zusätzlich sind an verschiedenen Positionen Geschwindigkeitssonden angebracht, um das Strömungsfeld, insbesondere im Nahfeld der Filter beurteilen und die numerischen Berechnungen validieren zu können. Die Wellenpegel am und hinter dem Filtersystem dienen der Aufzeichnung des transmittierten Wellenzugs.

Prinzipieller Versuchsaufbau eines 3-Filter-Systems:



Positionen der Unterwasser-Filter und Sonden (MWK):

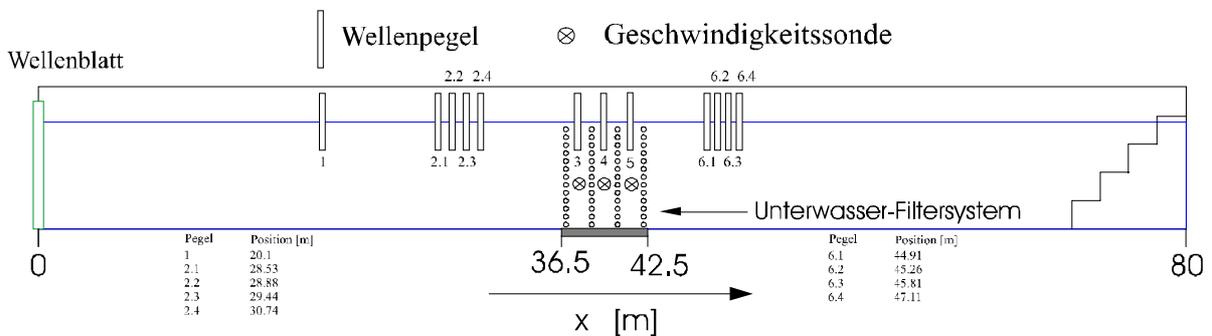


Abb. 3.3: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Unterwasser-Filterssystemen

Die Seegangsbelastungen des Bauwerks werden durch die Installation von Kraftmesswaagen in den einzelnen Komponenten des Filterelements bestimmt.

Rechnergestützt werden die Steuersignale an die Wellenmaschine geleitet und sämtliche Messwerte registriert.

3.3 Messtechnik

Die wesentlichen Messaufnehmer der Versuchsphasen werden nachfolgend beschrieben.

Wellenpegel

Die Registrierung der Wasserspiegelauslenkung sowie die Analyse der Wellendämpfung und der hydraulischen Wirksamkeit des Bauwerks erfolgt mit Hilfe von Wellenpegeln. Sie werden hier sowohl einzeln verwendet, als auch in Form sog. „Pegelharfen“, die aus vier in festgelegtem Abstand montierten Einzelpegeln bestehen. Das Messprinzip der Pegel beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstandes der eingetauchten Sonden bei unterschiedlichen Wasserständen.

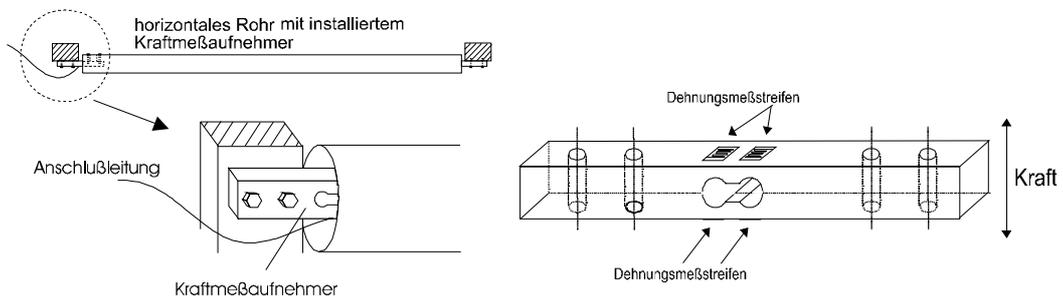
Kraftmesswaagen (KMW)

Zur Ermittlung der Seegangsbelastung des Bauwerks werden die horizontalen Einzelelemente eines Filters mit Kraftaufnehmern versehen. So kann die instationäre Belastung der separaten Elemente bzw. durch Summation die Gesamtbelastung des Bauwerks bestimmt werden. Der prinzipielle Aufbau der unterschiedlichen Kraftaufnehmer mit applizierten Dehnungsmessstreifen (DMS) ist in Abb. 3.4 zu sehen. Für die Untersuchungen im Wellenkanal der TU Berlin (MWK) stehen insgesamt 95, für die großmaßstäblichen Untersuchungen (GWK) 60 am Fachgebiet Meerestechnik gefertigte KMW zur Verfügung. Zur Registrierung der Horizontal- bzw. Vertikalkraft werden die Sonden entsprechend ihrer Kraftmessrichtung installiert (Abb. 3.4).

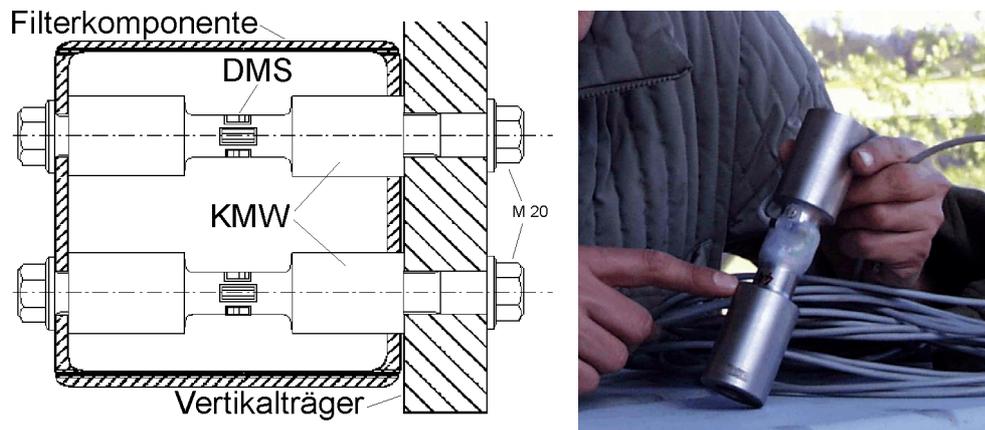
Aufgrund des symmetrischen Aufbaus einer Filterwand werden die Rohre nur an einer Seite mit aktiven Kraftmessaufnehmern angeschlossen. Auf der anderen Seite sind die Rohre mit sog. „Dummys“ (KMW ohne DMS) versehen. Ergebnisse aus Voruntersuchungen mit aktiven KMW auf beiden Seiten bestätigen die Exaktheit der Messung mit nur einer aktiven KMW. Da die Belastungen bei den Versuchen im GWK wesentlich höher liegen, werden zur Kraftaufnahme zwei Kraftmesswaagen bzw. zwei „Dummys“ pro Seite der Filterkomponente verwendet.

Die Kalibrierung der KMW erfolgt bei den Versuchen im mittleren Wellenkanal (MWK) durch definierte Gewichte, die unter Versuchsbedingungen im Wasser auf die liegenden Filter aufgebracht werden. Für die Versuche im GWK Hannover wird ein speziell gefertigter hydraulischer Kalibrierrahmen verwendet, der es erlaubt sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufzubringen. Aus der im Vorfeld ermittelten linearen Kalibrierkurve (Abb. 3.4) ergeben sich die Kalibrierwerte für die Versuche.

KMW für Versuche im MWK Berlin



KMW für Versuche im GWK Hannover



Kalibrierkurve der KMW:

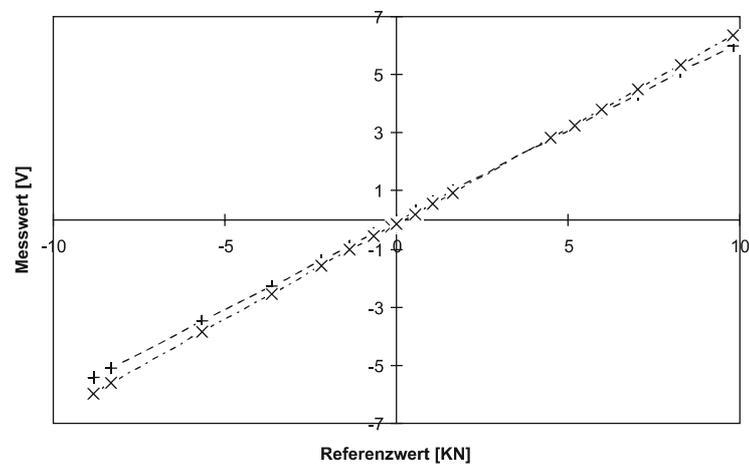


Abb. 3.4: Aufbau der unterschiedlichen Kraftmesswagen (KMW)

Geschwindigkeitssonden:

Die Strömungsgeschwindigkeiten in Strukturnähe und in den Schlitzen der durchlässigen Filterwände sind ein wesentlicher Parameter für die hydrodynamische Charakteristik des Filters. Zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten (u , v , w) werden verschiedene Systeme benutzt. In beiden Wellenkanälen werden 3D-Ultraschallsonden eingesetzt, die auch für niedrige Geschwindigkeiten sehr präzise Signale geben und daher bestens für Validierungszwecke geeignet sind. Allerdings reagieren diese Sonden teilweise empfindlich auf Verunreinigungen im Wasser.

Einige arbeiten nach dem Prinzip der *Laufzeitdifferenzmessung*. Entscheidend für dieses Messprinzip ist die Tatsache, dass Schallwellen ein Trägermedium benötigen und dass eine Bewegung dieses Mediums einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Schallwellen gegenüber ruhenden Bezugspunkten hat.

Die anderen Sonden arbeiten nach dem *Phasendifferenzverfahren*. Bei diesem Verfahren wird die Phasenlage des ausgesendeten und empfangenen Signals bestimmt und verglichen. Ist das Fluid in Bewegung, so ergibt sich zwischen diesen beiden Signalen eine Phasenverschiebung. Aus dieser Phasenverschiebung lässt sich ein Phasendifferenzwinkel bestimmen,



Abb. 3.5: Ultraschallsonde und Propellerkopf zur Geschwindigkeitsmessung

der proportional zur Laufzeitdifferenz ist, über die dann wiederum die mittlere Fluidgeschwindigkeit berechnet werden kann. Der Vorteil des *Phasendifferenzverfahrens* gegenüber der *Laufzeitdifferenzmessung* liegt darin, dass auch kleinste Geschwindigkeiten (bis ca. 0,5 mm/s) gemessen werden können.

Bei den Messungen im GWK wird auch ein Meßsystem der Firma *Schiltknecht Meßtechnik AG* verwendet. Es besteht aus 6 Mikroströmungspropellern, die zur Messung einer Geschwindigkeitskomponente einen Messbereich von 10 m/s zur Verfügung stellen. Diese werden in unmittelbarer Nähe der Struktur und zwischen den Filterkomponenten (Abb. 3.5) in unterschiedlicher Wassertiefe angebracht.

3.4 Versuchsprogramm

3.4.1 Grundlagen der Versuchstechnik mit transienten Wellenzügen und Seegang

Die experimentellen Untersuchungen an einzelnen Filterelementen und komplexen Filtersystemen werden vorwiegend mit transienten Wellenpaketen, sowie mit regulärem und irregulärem Seegang durchgeführt. Dabei werden die Parameter für die verschiedenen Wellenkanäle folgendermaßen gewählt:

Transiente Wellenpakete

Die verwendeten Wellenpakete variieren in der Lage des Konzentrationspunktes K_p (MWK 45m – 65m, GWK 180m – 230m) und der maximalen Auslenkung ζ_a des Wellenzuges am Bauwerk (MWK 0,05m – 0,20m, GWK 0,25m – 1,0m). Der Einsatz transienter Wellenpakete ermöglicht es, in einem einzigen Versuch die Dämpfungswirkung der Einzelfilter über einen breiten Frequenzbereich zu analysieren, der mit regulären Wellen durch eine Vielzahl von Experimenten untersucht werden muss. Im Vergleich mit Initialmessungen ohne Bauwerk können gezielte Aussagen über Ursache und Wirkung der Dämpfung am Bauwerk getroffen werden.

Regulärer Seegang

Reguläre Wellen mit konstanter Wellenfrequenz und -höhe werden beispielsweise bei der Bestimmung der Seegangsbelastung eingesetzt. Die generierten Wellen für den MWK besitzen Perioden T von 1,5s – 3,5s. Die nominalen Wellenhöhen betragen 0,1m bis 0,4m. Im GWK Hannover werden Perioden von 3,0s – 12,0s und Wellenhöhen von 0,5m – 1,0m erzeugt.

Grundlagen der Versuchstechnik mit transienten Wellenpaketen

Eine ausführliche Beschreibung der Versuchstechnik mit transienten Wellenpaketen findet sich bei *Clauss und Kühnlein* (1997). Die Herleitung des Verfahrens sowie eine Erweiterung auf nichtlineare hohe Wellen ist in den Dissertationen von *Bergmann* (1985) und *Kühnlein* (1998) nachzulesen. Im folgenden wird eine kurze Zusammenfassung dieser Versuchstechnik unter besonderer Berücksichtigung der Untersuchungen an getauchten Strukturen gegeben und begründet, welche Vorteile diese Analysetechnik gegenüber alternativen Methoden bietet.

Bei herkömmlichen Untersuchungen mit regulärem und irregulärem Seegang wird die Reflexion und Transmission nach der 3-Pegel-Methode von *Mansard und Funke* (1987) bestimmt. Die Ergebnisse müssen jedoch kritisch betrachtet werden, da

- Reflexionen von der Böschung und Re-Reflexionen vom Wellenblatt die Messung am Filtersystem beeinflussen,
- die Phasenverschiebungen am Filterelement und Nichtlinearitäten im Nahfeld nicht ausgewertet werden können,
- und die hydrodynamischen Prozesse an der Struktur selbst durch die auftretenden Reflexionen gestört werden.

Um diese Störeinflüsse zu vermeiden, wird zur Analyse der „Künstliche Riffe“ vorwiegend die Technik der transienten Wellenpakete eingesetzt. In Verbindung mit Initialmessungen ohne Struktur kann mit diesem Verfahren eine sehr hohe Genauigkeit erzielt werden.

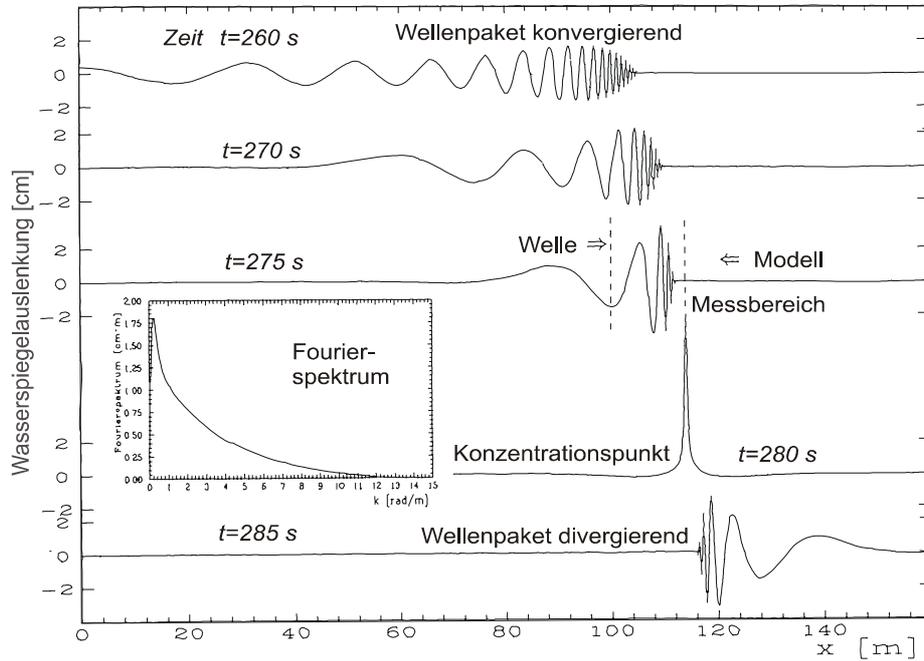


Abb. 3.6: Transientes Wellenpaket zu verschiedenen Zeitpunkten als Funktion des Ortes (Wassertiefe $d=4,2$ m) nach Kühnlein (1997)

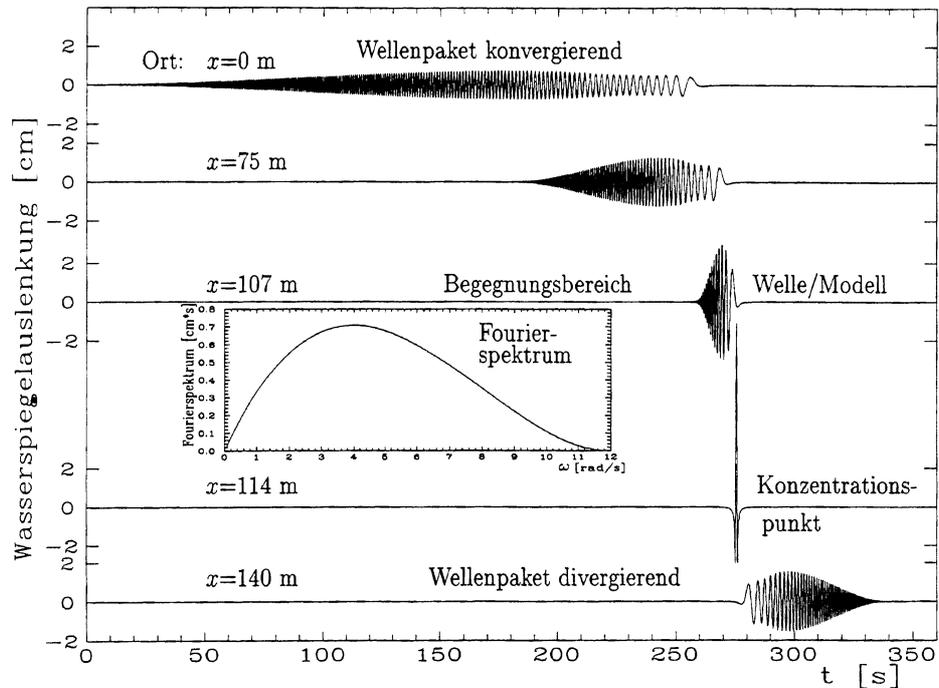


Abb. 3.7: Transientes Wellenpaket an verschiedenen Orten als Funktion der Zeit (Wassertiefe $d=4,2$ m) nach Kühnlein (1997)

Transiente Wellenpakete bestehen aus zeitlich begrenzten (transienten) Wellenzügen, in denen Wellen beliebiger Frequenzen und Amplituden vorkommen. Ein Sonderfall dieser Wellenpakete ist ein zeitlich begrenzter Wellenzug, der nur aus einer (Haupt-)Frequenz besteht. *Davies* und *Zarnick* (1964) stellen das grundlegende Prinzip der transienten Wellenpakete vor, das auf der Dispersionseigenschaft des Wassers beruht: Lange Wellen breiten sich schneller aus als kurze. Dieses Prinzip wird genutzt, um eine gezielte Überlagerung bzw. Verteilung der Wellen verschiedener Grundfrequenzen am Ort des Modells zu erzielen. Beginnt die Wellenmaschine mit der Generierung hochfrequenter Wellen und reduziert im folgenden die Frequenz, so werden die kurzen Wellen von den langen eingeholt und treffen sich im sogenannten Konzentrationspunkt K_p . Im Idealfall besteht dann das Paket im Konzentrationspunkt aus einer einzigen Welle. Hinter diesem Punkt wird der Wellenzug wieder länger. Dieses Verhalten verdeutlicht Abb. 3.6. anhand von Wasserspiegelauslenkungen zu verschiedenen Zeitpunkten als Funktion des Ortes bzw. Abb. 3.7 anhand von Wasserspiegelauslenkungen an verschiedenen Orten als Funktion des Zeit.

Einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung der Wellenpaketmethode zu einer effektiven Versuchstechnik leisten *Takezawa* und *Hirayama* (1976) durch die Einführung des Fourierspektrums zur Erzeugung der Wellenzüge. *Bergmann* (1985) entwickelt auf der Basis von Gauß'schen Wellenpakete eine zuverlässige Versuchstechnik, die die Prognose des Spektrums und des Wellenzuges an jeder Stelle und zu jedem Zeitpunkt im Kanal gewährleistet. Das Gauß'sche Wellenpaket beruht auf der linearen Wellentheorie und ist an jedem Ort und zu jeder Zeit durch einen komplexen Funktionsausdruck bestimmt:

$$a(x, t) = \int_0^{\infty} a(k) e^{i(kx - \omega t)} dk \quad \text{mit Wellenzahl } k, \text{ Wellenamplitude } a \quad (3.1)$$

Das Amplitudenspektrum $a(k)$ folgt einer Gaußverteilung.

$$a(k) = \frac{a_0}{s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k-k_0)^2}{2s^2}} \quad \text{mit Standardabweichung } s \quad (3.2)$$

Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Methoden und Rechenanlagen ist die Verwendung der Gaußverteilung für die Wellenamplituden nicht mehr zwingend. Damit kann der Prozess numerisch durchgeführt werden (*Clauss* und *Kühnlein*, 1995). Von *Kühnlein* (1997) wurde diese Methode weiterentwickelt und ein numerisches Verfahren zur Generierung beliebiger projektorientierter Spektren konzipiert. Mit der Einführung eines Fourierspektrums zur Beschreibung der Amplitudenverteilung der einzelnen harmonischen Elementarwellen lassen sich breitbandige energiereiche Wellenpakete generieren. Diese erfüllen im wesentlichen drei Anforderungen:

- Kurze räumliche und zeitliche Ausdehnung im Interaktionsbereich Wellenzug / Struktur
- Exakte Prognostizierbarkeit des Wellenzuges für jeden Ort im Wellenkanal
- Stabiles Verhalten des Wellenzuges im Kanal durch Anpassung des Fourierspektrums

Die numerische Umsetzung erfolgt unter der Verwendung der Fast-Fourier-Transformation (FFT). Durch die Verwendung der FFT wird eine Zeitfunktion mit n Stützstellen in Fourierkoeffizienten bzw. mit der inversen FFT die Fouriertransformierte in eine Zeitfunktion umgerechnet. Zur Generierung des Wellenpakets wird neben dem Fourierspektrum auch die gewünschte Lage des Konzentrationspunktes K_P sowie die maximale Wellenauslenkung ζ_a am Modellort vorgegeben. Mit diesen Angaben ist die entwickelte Seegangversuchstechnik in der Lage, unter Verwendung der Übertragungsfunktion des Wellenblattes und durch Eingabe der Randbedingungen des Kanals ein exaktes Signal im Zeitbereich für die Wellenmaschine zu berechnen.

Generierung von Wellenpaketen zur Untersuchung der Wechselwirkungen mit der Struktur

Zur Bestimmung der Strukturcharakteristik ist die exakte Bestimmung der Transmission und Reflexion von großer Bedeutung. Aber auch lokale Größen im Nahfeld der Struktur (Geschwindigkeiten, Kräfte, ...) spielen eine Rolle.

Das Hauptproblem bei der Bestimmung von Bauwerksreflexionen ist die exakte Trennung von Überlagerung zwischen einlaufender und reflektierter Welle, sowie von Re-Reflexion des Wellenblattes und der Böschung. Aufgrund ihres begrenzten Zeitfensters kann durch die Verwendung der transienten Wellenpakete der Einfluss der Re-Reflexionen von Wellenblatt und Böschung gänzlich ausgeschlossen werden. In Abhängigkeit der Länge des Wellenzuges sowie dem Abstand zwischen Struktur und Wellenblatt bieten sich zwei Alternativen zur Reflexionsbestimmung:

1. Reflexionsbestimmung innerhalb einer Messung. Bei kurzen Wellenzügen oder ausreichend großem Abstand zwischen Filterelement und Wellenblatt kann die Reflexion direkt mit einem Wellenpegel zwischen Wellenblatt und Struktur registriert werden, da keine Überlagerungen stattfinden (Abb. 3.8).
2. Reflexionsbestimmung durch zusätzliche Initialmessung. Bei längeren Wellenzügen oder kurzem Versuchskanal überlagert sich der einlaufende Wellenzug vor der Struktur mit der entgegenlaufenden Reflexion. Zur exakten Bestimmung der Reflexion wird daher zunächst ein Initialversuch ohne Einbauten durchgeführt und der sogenannte Initialwellenzug registriert. Anschließend wird die Struktur installiert und die Messung wiederholt. Zur Bestimmung der Reflexion wird das Signal der Initialmessung von dem Signal mit Struktur abgezogen.

Die zweite Methode der Initialmessung hat sich für die Bestimmung der Nahfeldinteraktion, der Wellentransmission und in Untersuchungen mit bewegten Modellen bewährt. Deshalb werden in allen Wellenkanälen vor den Messungen mit Struktur grundsätzlich Initialmessungen ohne Bauwerk durchgeführt. Dies gibt die zusätzliche Sicherheit, dass Fehler in den Kalibrationswerten ausgeschlossen werden können, wenn die Ergebnisse mit Struktur im Verhältnis zu Ergebnissen ohne Struktur analysiert werden. Für die Durchführung der Versuche mit Initialmessungen ist es erforderlich, dass die beiden Versuche (insbesondere die Bewegung der Wellenklappe) zum exakt gleichen Zeitpunkt beginnen. Daher werden Messrechner und Wellenblatt über einen Signalgeber gleichzeitig gestartet. Diese Methode erlaubt auch eine Reflexionsanalyse mit regulärem Seegang.

Die transienten Wellenpakete werden so generiert, dass auch eine Auswertung nach der ersten Methode durchgeführt werden kann. Dies bietet den Vorteil, dass während der Versuche eine schnelle Auswertung und optische Kontrolle der Reflexion erfolgen kann. Außerdem setzt das

Vorgehen der 2. Methode die Gültigkeit der Superponierbarkeit zweier Wellenzüge voraus. Bei großen Wellenhöhen ist diese Voraussetzung aufgrund der Nichtlinearität nicht mehr gegeben, weshalb die Reflexionsanalyse ungenau wird.

Im folgenden wird für ein ausgewähltes Wellenpaket (GWK, $K_p=230\text{m}$) die Vorgehensweise bei der Reflexions- und Transmissionsanalyse erläutert. In Abb. 3.8 ist zunächst die prinzipielle Versuchsanordnung im GWK Hannover mit 3 ausgewählten Pegeln dargestellt.

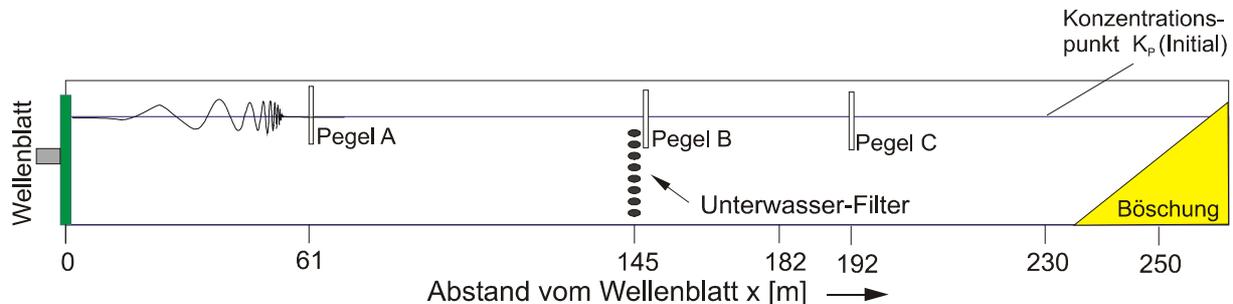


Abb. 3.8: Reflexionsbestimmung mit Wellenpaketen (GWK)

Das Wellenpaket und die Versuchsanordnung werden so gewählt, dass der Konzentrationspunkt K_p des initialen Wellenpakets bei 230m ($145\text{m} + 85\text{m}$), und der des von der Struktur reflektierten Wellenzuges in der Nähe von Pegel A liegt ($145\text{m} - 85\text{m}$). Dadurch wird die Auswertung erleichtert, da im Zeitschrieb auch geringe Reflexionssignale sehr deutlich als „Peak“ erkennbar sind. Zusätzlich wird der Wellenzug in seiner Ausdehnung so bemessen, dass der einlaufende Wellenzug bereits den Pegel passiert hat, bevor die Reflexion registriert wird.

In Abb. 3.9 sind Zeitregistrierungen im GWK Hannover für den transienten Wellenzug ohne Bauwerk (initial) und mit Bauwerk aufgetragen, die das Vorgehen bei der Reflexions- und Transmissionsanalyse illustrieren. Die Messungen sind jeweils für drei Pegelpositionen dargestellt. Am Pegel A wird zunächst der Wellenzug der einlaufenden Welle registriert und für den Fall mit Struktur auch die Wellenreflexion von dieser. Hinter dem Wellenfilter (Pegel B und C) wird die Transmission registriert.

Der initiale Wellenzug läuft ungestört durch den Kanal. Die „langen“ Wellen breiten sich schneller aus, als die „kurzen“ und der Wellenzug konvergiert. Bei Pegel C (nahe des Konzentrationspunktes) überlagern sich die Einzelwellen zu einer gemeinsamen Wellenerhebung. Am Pegel A wird keine Reflexion verzeichnet. Das Ausbreitungsverhalten dieses Wellenzuges entspricht also der in Abb. 3.7 vorgestellten typischen Charakteristik für Wellenpakete.

Ist eine Struktur vorhanden wird der Wellenzug gestört. Dies führt zu Reflexionen vom Bauwerk, die sehr deutlich als „Peak“ an Pegel A abzulesen sind. Das ausgeprägte Reflexionssignal an Pegel A wird dadurch erzielt, dass hier der am Bauwerk „gespiegelte“ Konzentrationspunkt liegt und sich die Reflexionssignale überlagern. Durch den Vergleich mit Initialmessungen wird deutlich, dass die Wellenhöhen an Pegel B und C durch den Filter deutlich reduziert werden.

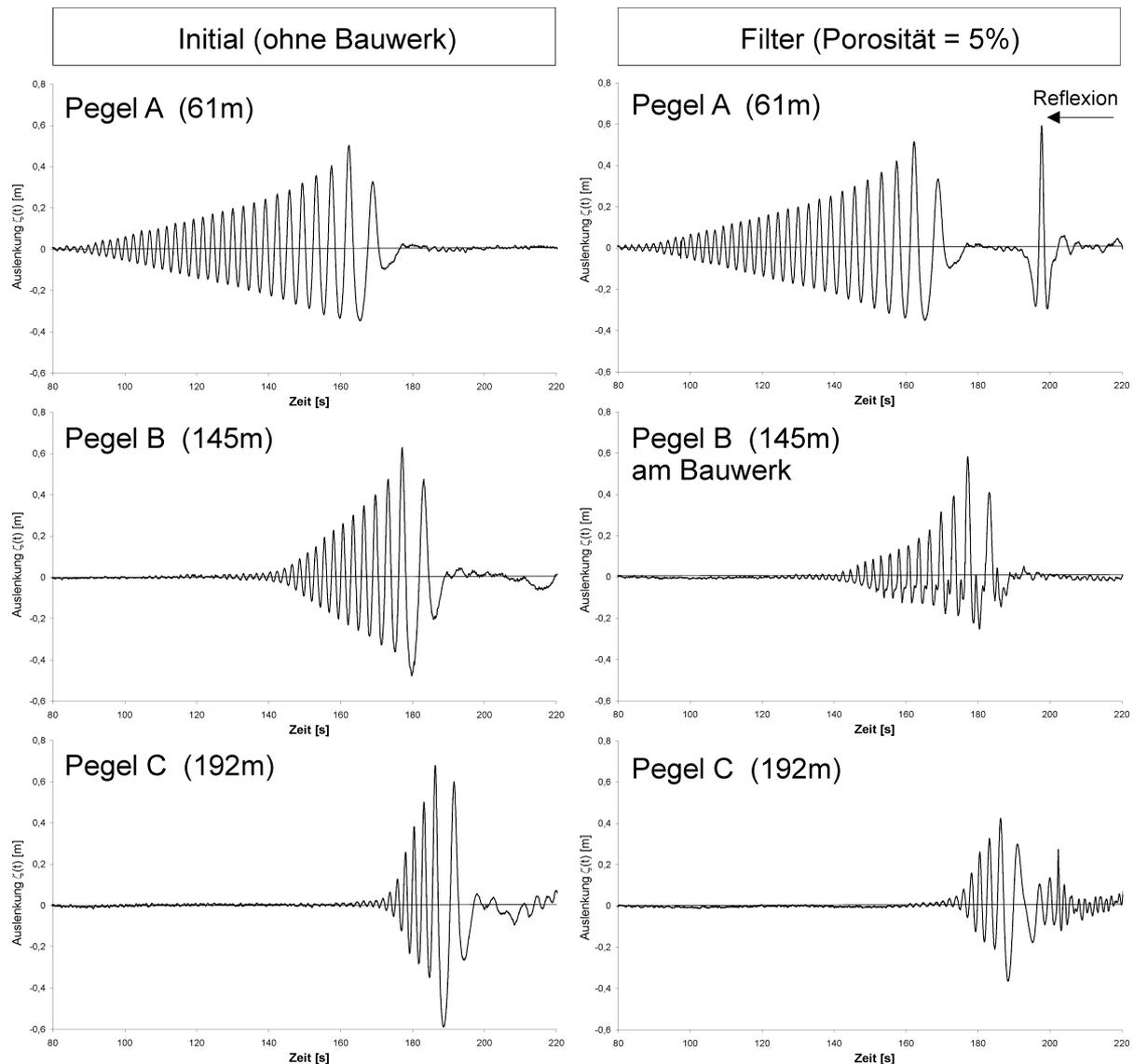


Abb. 3.9: Zeitregistrierungen eines transienten Wellenzuges (GWK)

Die Zeitregistrierung wird für die Auswertung in den Frequenzbereich transformiert. Dort werden Reflexion und Transmission ermittelt. Um bei dieser Analysetechnik im Frequenzbereich nichtlineare Einflüsse (aufgrund der „hohen Wellen“ ist das Spektrum nicht an jedem Ort des Wellenkanal identisch) auszuschließen, wird für die Messung mit und ohne Struktur jeweils der am gleichen Ort befindliche Pegel herangezogen. Ergebnisse dieser Analyse werden in Kapitel 4 präsentiert.

3.4.2 Untersuchte Strukturen

Das Versuchsprogramm teilt sich in die Untersuchung einzelner Filterwände und zusammengesetzter Filtersysteme mit den vorgestellten Wellenzügen. Die Anordnung der Pegel und Sonden ist für beide Untersuchungen im wesentlichen identisch (Abb. 3.3). Es werden jeweils Wellen- und Bauwerksparameter variiert.

Einzelfilter

In allen Wellenkanälen werden zunächst einzelne Filterwände untersucht. Die hierbei variierten Bauwerksparameter sind Porosität und Bauhöhe der Filter. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den unterschiedlich großen Wellenkanälen erlaubt eine Abschätzung des Einflusses von Maßstabeffekten. Zudem sind die Einzelfilteruntersuchungen sehr gut für die Validierung des numerischen Modells geeignet.

Porosität:

Es werden getauchte Einzelfilter mit den Porositäten 43%, 27%, 20%, 11%, 5% und 0% (undurchlässige Wand) untersucht. Die Porosität P bzw. Durchlässigkeit berechnet sich aus dem Verhältnis des lichten Abstandes zweier Elemente zu deren Achsabstand und entspricht damit der Strukturporosität (Abb. 3.2).

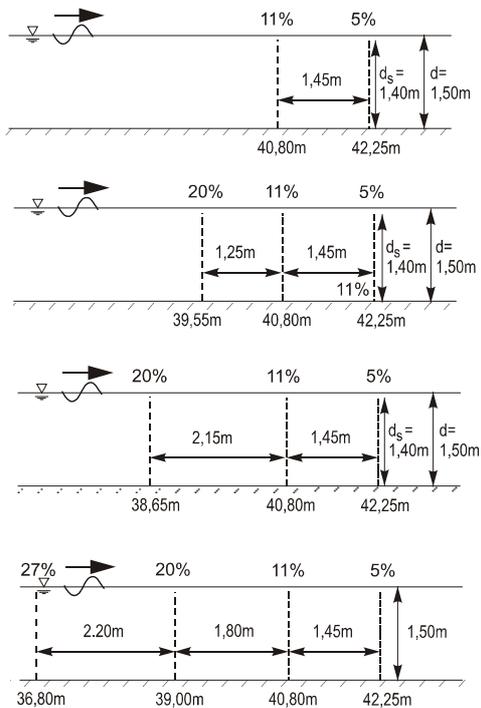
Bauwerkshöhe:

Die relative Bauwerkshöhe d_s/d (Abb. 3.2) der Einzelfilter wird im MWK Berlin von $0,65d$ bis $1,02d$ durch Anpassung der Filterhöhe variiert, indem einzelne Komponenten entfernt werden. Da im GWK Hannover ein Umbau der Struktur mit erheblichem Aufwand verbunden ist, werden dort Messungen bei verschiedenen Wasserständen ($d = 4 - 5\text{m}$) durchgeführt, die zu Werten für d_s/d von $0,78$ bis $0,98$ führen.

Ein- und Mehrkammersysteme

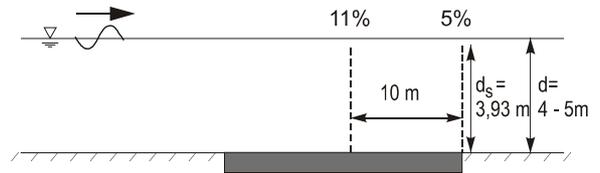
Die hydraulische Wirksamkeit des Unterwasser-Filtersystems muss bezüglich der Anzahl durchlässiger Wände und des zugehörigen Bauaufwandes bewertet werden. Hierfür werden Filteranzahl, Kammerabstand und Bauwerkshöhe variiert und mit ausgewählten Wellenparametern verglichen. Dabei kommen die gleichen Wellenparameter, wie bei der Untersuchung der Einzelfilter zum Einsatz. In Abb. 3.10 ist eine Auswahl der untersuchten Varianten schematisch dargestellt. Es werden die Bezeichnungen EKS (Ein-Kammer-System), ZKS (Zwei-Kammer-System) und DKS (Drei-Kammer-System) verwendet.

Kammersysteme MWK, Berlin:
 Ausgelegt für Wellenperiode $T=2.0s$,
 Wellenlänge: 5.8 m

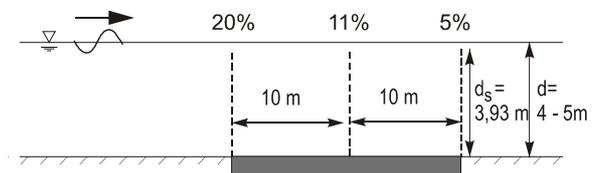


Kammersysteme GWK, Hannover:
 Ausgelegt für Wellen $T=6.0s - 8.0s$,
 Wellenlänge: 34 m - 54 m

EKS
 (2 Filter)



ZKS
 (3 Filter)



DKS
 (4 Filter)

Abb. 3.10: Auswahl untersuchter Filtersysteme (MWK und GWK)

Im Wellenkanal der TU Berlin (MWK) sind Umbaumaßnahmen leichter durchzuführen als im GWK Hannover. Daher werden hier eine Vielzahl von Kammervarianten mit unterschiedlicher Anzahl, Verteilung und Bauhöhe der Filterwände untersucht. Im GWK Hannover werden dann nur Einzelfilter und zwei ausgewählte Filtersysteme (Abb. 3.10) bei unterschiedlichen Wellenparametern analysiert.

Im MWK Berlin wird der Einfluss der Kammerlänge auf Reflexions- und Transmissionseigenschaften vorwiegend anhand der systematischen Variation der Filterabstände eines EKS (mit Einzelfiltern der Porosität 5% und 11%) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Kapitel 4 dargestellt.

4 Semi-empirisches Modell

Für den Entwurf eines effizienten Künstlichen Riffs muss seine hydrodynamische Charakteristik bekannt sein, damit die Haupteinflussparameter variiert werden können. Für eine erste Auslegung ist hierbei der Einsatz eines Berechnungsverfahrens ein hilfreiches Werkzeug, das die Transmission und Reflexion in Abhängigkeit dieser Haupteinflussparameter bestimmt und die Dissipation indirekt aus der Energiebilanz ableitet. Wie in Kapitel 2 gezeigt weisen bestehende analytische bzw. empirische Verfahren bei Anwendung auf getauchte Strukturen teilweise erhebliche Prognosefehler auf. Dies macht die Entwicklung neuer bzw. die Verbesserung bestehender Vorhersageverfahren erforderlich.

Im folgenden werden daher zunächst auf der Basis systematischer Modellversuche die Haupteinflussparameter (Bauwerksgeometrie, Einfluss der Porosität, etc.) hinsichtlich Transmission, Reflexion und Dissipation getauchter Strukturen bestimmt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgt die Entwicklung eines verbesserten linearen semi-empirischen Rechenverfahrens mit modifizierten Randbedingungen. Die Ergebnisse der linearen Berechnung werden mit Messwerten verglichen.

4.1 Transmission, Reflexion und Dissipation

Wie bereits erwähnt ist die Ermittlung der Kennwerte für Transmission, Reflexion und Dissipation für die Auslegung eines Künstlichen Riffs unersetzlich und erfolgt anhand der bereits beschriebenen systematischen Modellversuche mit vorwiegend transienten Wellenpaketen. Durch die Verwendung dieser Versuchstechnik und der damit verbundenen Mess-Software können eine Vielzahl von Versuchen in einem überschaubaren Zeitrahmen durchgeführt werden. Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

4.1.1 Reflexion für Einzelfilter und Filtersysteme

Durch die Reflexion am Bauwerk kommt es zu Wellenüberlagerungen vor dem Filter, die vorbeifahrende Schiffe gefährden können. Eine Reflexion von 100% würde bedeuten, dass sich durch diese „stehenden Wellen“ die Wellenhöhe vor dem Bauwerk verdoppelt. Daher muss die Reflexion des Systems auf ein Minimum reduziert und die Transmission auf ein gegebenes Maß beschränkt werden. Als Zusammenfassung intensiver Messreihen (MWK) werden im folgendem vorwiegend Ergebnisse bezüglich des Einflusses von

- Filterporosität
- Filteranzahl und
- Abstand der Filter zueinander

dargestellt.

In Abb. 4.1 sind Fourierspektren der Reflexion verschiedener Filtersysteme abgebildet. Es handelt sich im einzelnen um eine getauchte undurchlässige Wand (oben links), ein Einkammersystem mit 5% und 11% Filter (oben rechts), ein zweites Einkammersystem mit verändertem Kammerabstand (unten rechts) und ein Dreikammersystem.

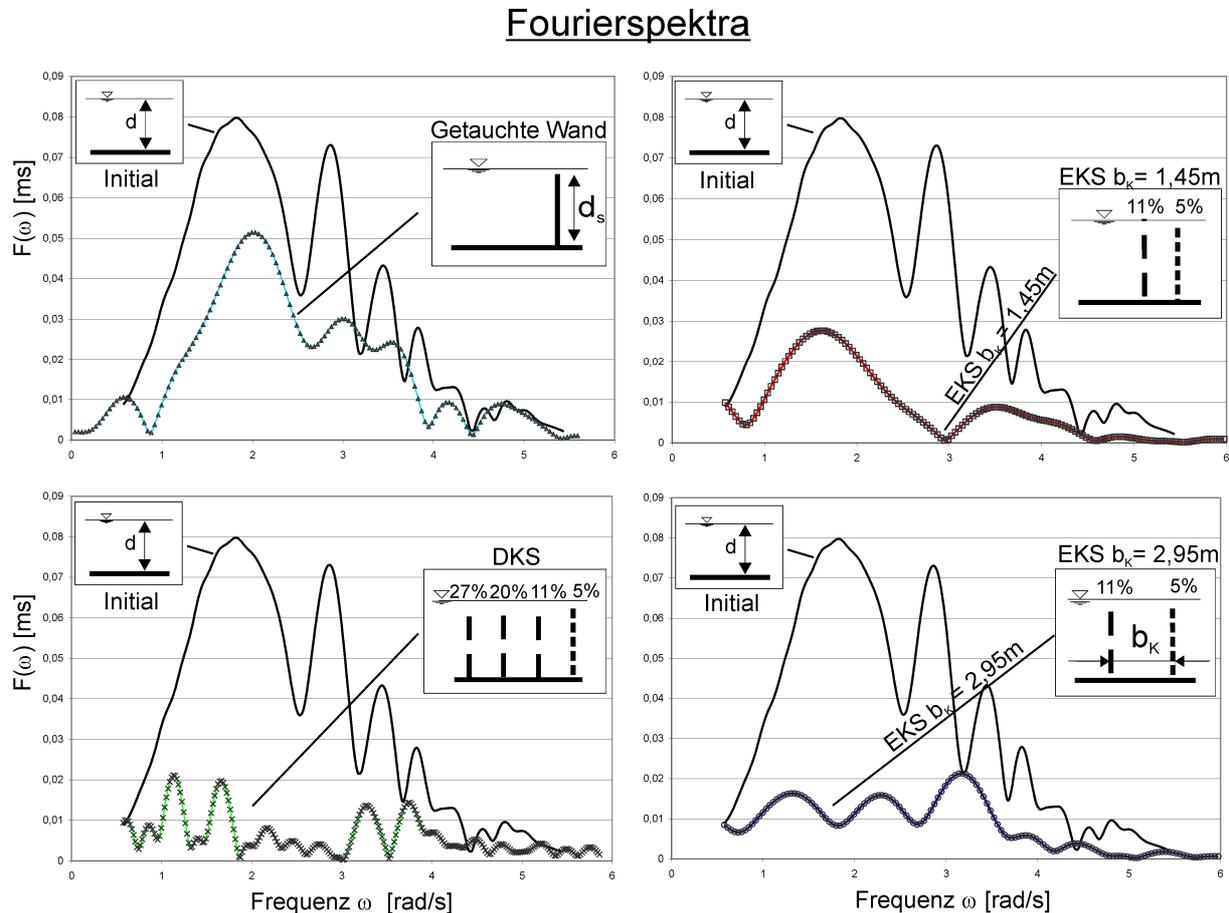


Abb. 4.1: Reflexion verschiedener Filtersysteme

In den Grafiken wird jeweils das Fourierspektrum des initialen transienten Wellenpakets und des reflektierten Wellenzugs dargestellt. Die dabei verwendete Versuchstechnik wurde bereits erläutert.

Die Analyse macht deutlich, dass die getauchte Wand einen hohen Anteil der Welle reflektiert. Im Vergleich zur ausgetauchten undurchlässigen Wand (Reflexion ca. 100%) ist die Reflexion zwar deutlich reduziert, eine Reflexion in diesem Ausmaß ist jedoch hinsichtlich der Gefährdung des Seeverkehrs nicht akzeptabel.

Durch die Einführung eines Systems mit zwei Filtern (EKS, Abb. 4.1 oben rechts) kann die Reflexion des Gesamtsystems bereits deutlich reduziert werden. In Teilbereichen des Spektrums ($\omega=3,14$ bzw. $T=2s$) sinkt der Anteil der Reflexion bereits in die Nähe von Null.

Durch die Variation des Kammerabstandes, d.h. des Abstandes der Filter zueinander, kann die Verteilung der Reflexion im Spektrum beeinflusst werden. Das Einkammersystem mit einem größeren Kammerabstand ($L=2,95m$) erreicht eine Reduktion der Reflexion insbesondere im Bereich langer Wellen ($0,7 < \omega < 2,6$). Ein optimaler Systementwurf sollte genau dieses Ver-

halten zum Ziel haben. Denn auf diese Weise wird die Reflexion effektiv im Bereich mit der höchsten Wellenenergie reduziert. Hochfrequente Wellen hingegen, die im Spektrum mit geringeren Wellenhöhen einhergehen, werden nur maßvoll reduziert.

Schließlich zeigt die Untersuchung mit dem Dreikammersystem (unten links), dass sich die Reflexion im gesamten Spektrum nahezu eliminieren lässt. Allerdings ist zu beachten, dass diese aus vier Filtern bestehende Anordnung einen hohen baulichen Aufwand erfordert.

Die Analysen verdeutlichen, dass neben Porosität und Filteranzahl bei der Reflexion auch der Kammerabstand eine entscheidende Rolle spielt. Zur Quantifizierung dieses Einflussparameters wird in Abb. 4.2 der Anteil von Reflexion und Transmission in Abhängigkeit des relativen Filterabstands b/L dargestellt. Dazu werden in Versuchen mit regulären Wellen (MWK: $T=2s$, $H=0,4m$, $L=5,8m$) die Abstände eines 2-Filter Systems (11% und 5% Filter) systematisch variiert, wobei die einlaufende Wellenlänge konstant bleibt.

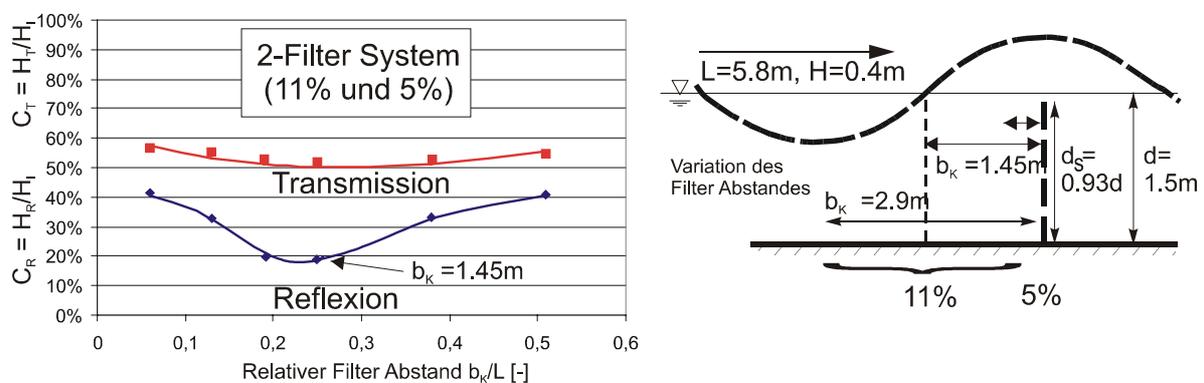


Abb. 4.2: Einfluss des Filter Abstands auf Reflexion und Transmission

Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn der Abstand der Filter zwischen $1/4$ und $1/5$ der initialen Wellenlänge beträgt. Diese Ergebnisse decken sich mit der theoretischen Analyse, denn die Berechnung nach linearer Wellentheorie ergibt ein Optimum für $b_k/L = 0,25$. Das zugrundegelegte Modell geht davon aus, dass in diesem Fall ein großer Teil der Welle an dem 5% Filter reflektiert wird. Dadurch bildet sich vor diesem Filter ein stehendes Wellenfeld. In den jeweiligen Wellenknoten entstehen Gebiete, in denen maximale horizontale Geschwindigkeiten auftreten und die vertikalen gleich Null sind. Im Wellenberg drehen sich die Verhältnisse um. Der zweite Filter wird nun so positioniert, dass er sich in dem Gebiet mit den hohen Horizontalgeschwindigkeiten befindet und auf diese Weise die Wellen effektiv dämpft.

Bei der Wellentransmission kann diese optimale Filterposition nicht in gleicher Ausprägung festgestellt werden. Das liegt daran, dass der Einfluss der Re-Reflexionen von dem 11% Filter auf den 5% Filter als gering einzustufen ist.

Der relative Kammerabstand spielt demnach vor allem für die Reflexion eine Rolle. Bei der Transmission, die im folgendem genauer analysiert wird, ist dieser von untergeordneter Bedeutung.

4.1.2 Transmission für Einzelfilter und Filtersysteme

Die Wellentransmission ist der entscheidende Entwurfsparameter hinsichtlich der Schutzwirkung des Bauwerks auf Strand und Küste. Ziel ist es, ein bestimmtes Maß an Transmission zuzulassen, um touristischen Bedürfnissen zu genügen und Wasseraustausch zu ermöglichen.

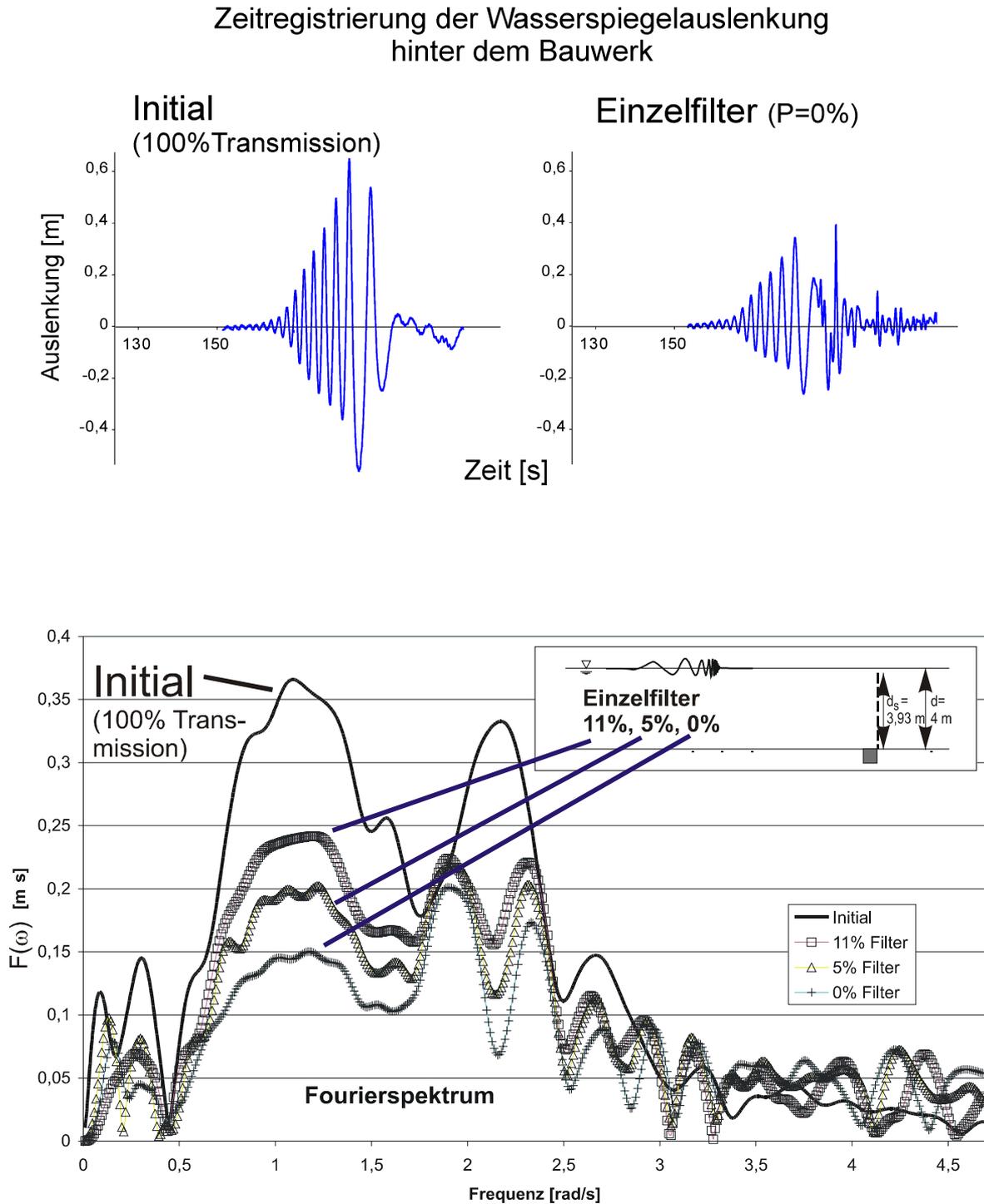


Abb. 4.3: Transmissionsanalyse mit Wellenpaketen (a)

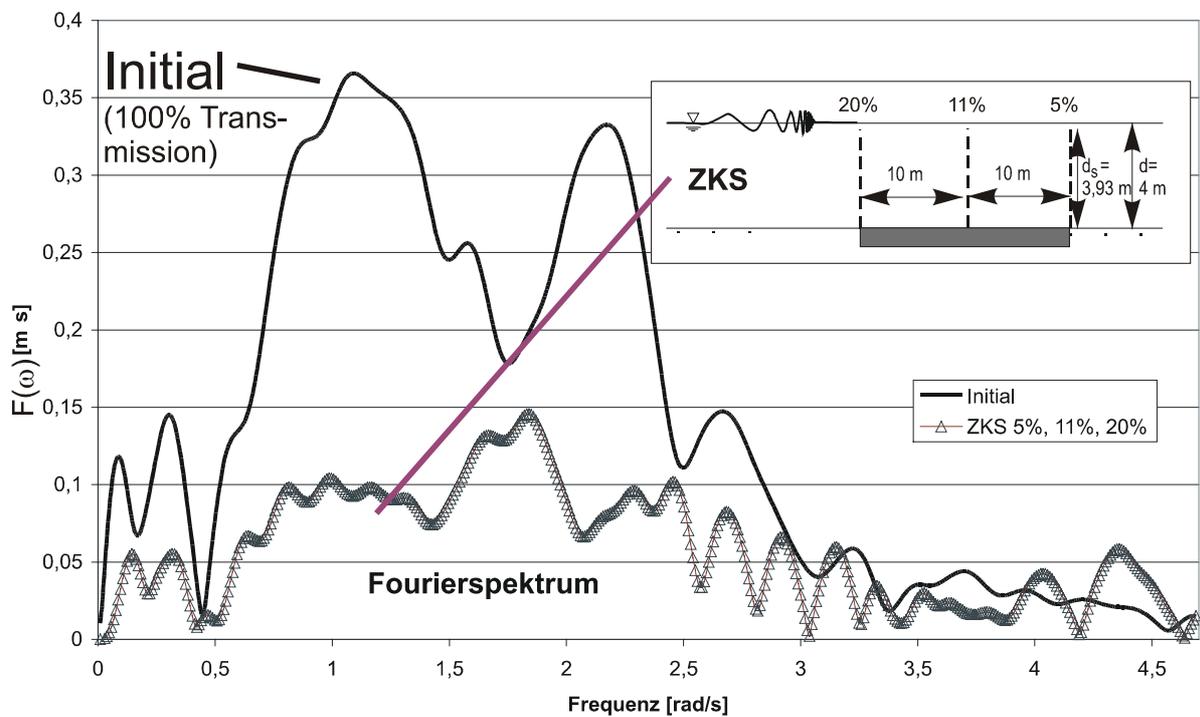
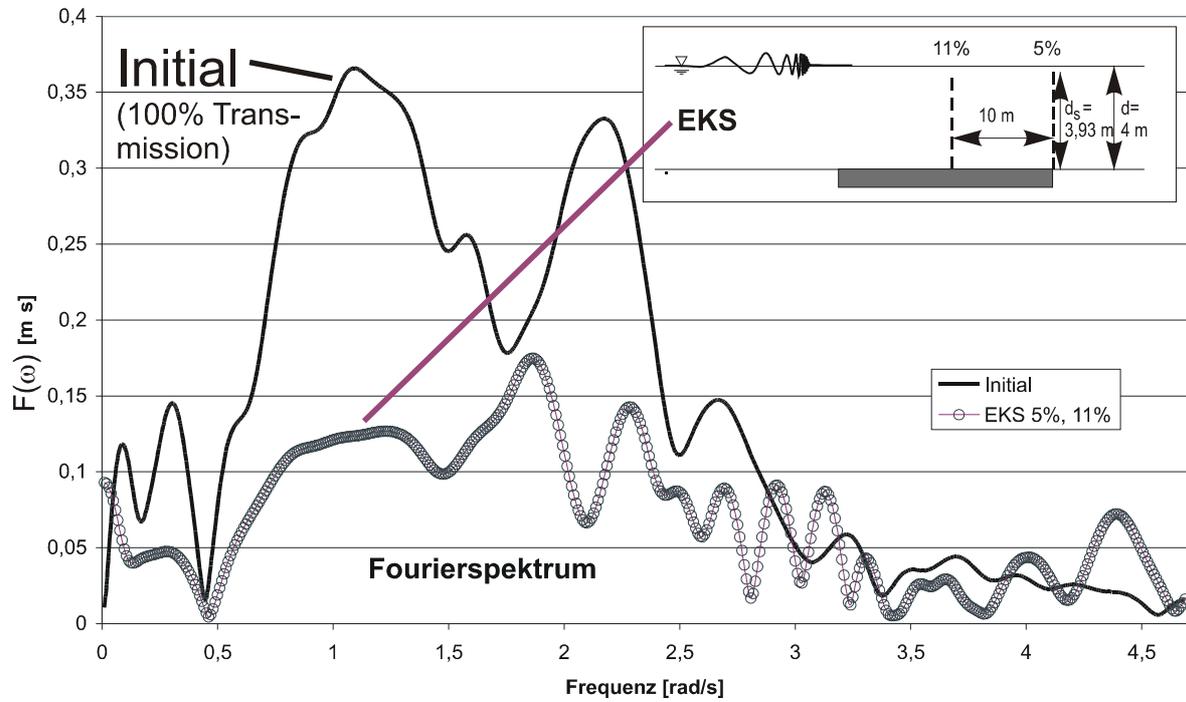


Abb. 4.4: Transmissionsanalyse mit Wellenpaketen (b)

In Abb. 4.3 und Abb. 4.4 sind Fourierspektren für verschiedene Einzelfilter und Filtersysteme sowie die Zeitregistrierung eines transienten Wellenpakets dargestellt. Das Spektrum (Abb. 4.3, unten) verdeutlicht die Abnahme der Transmission mit sinkender Porosität für die untersuchten Einzelfilter (0%, 5%, 11%). Der Vergleich mit einem Einkammersystem (Abb. 4.4, oben) zeigt, dass durch die Verwendung eines zweiten Filters eine zusätzliche Reduktion der Transmission möglich wird. Durch den Einbau eines dritten Filters (Zweikammersystem, Abb. 4.4 unten) wird die Transmission um wenige weitere Prozentpunkte reduziert. Die Reduktion der Wellenhöhe gegenüber der initialen Welle und damit der Wellenenergie wird auch an der Zeitregistrierung (Abb. 4.3) für einen Einzelfilter deutlich. Hier ist auch die nichtlineare Produktion und Überlagerung von kurzen Wellen hinter dem Filter sichtbar. Die entscheidenden Einflussfaktoren auf die Wellentransmission sind demnach die Filteranzahl n , die Filterporosität P und die relative Bauwerkshöhe d_s/d .

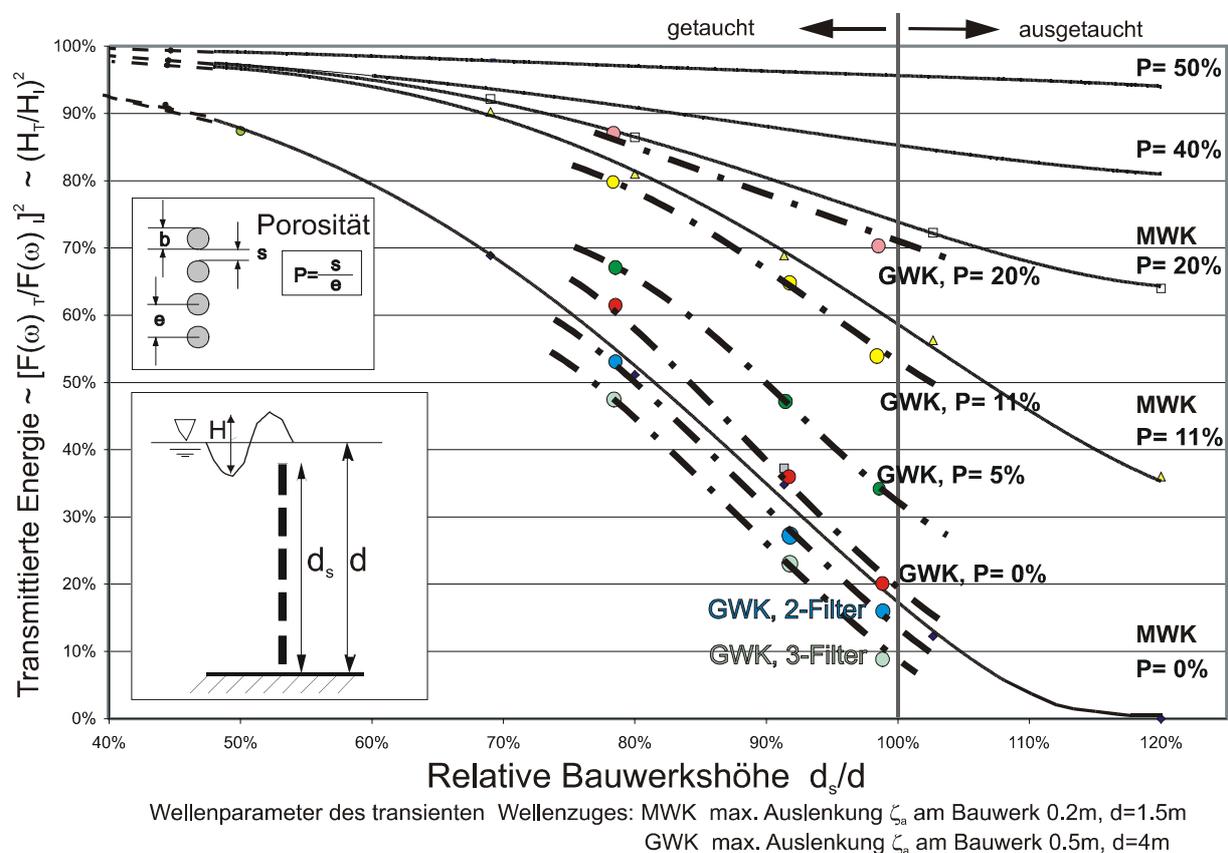


Abb. 4.5: Transmittierte Energie für Filter und Filtersysteme (MWK und GWK)

Abb. 4.5 veranschaulicht diese Abhängigkeit. Dort sind die Ergebnisse der Transmissionsanalyse für verschiedene Filtersysteme in Form der transmittierten Energie ($\sim H^2$, Gl. 2.2) über der relativen Bauwerkshöhe d_s/d aufgetragen. Dabei werden Werte, die in den Wellenkanälen in Berlin (MWK) und Hannover (GWK) experimentell ermittelt wurden, miteinander verglichen. Als Grenzwerte ($d_s/d=120\%$) dienen die in Untersuchungen von *Kuhlmann* (1998) für ausgetauchte Filter ermittelten Transmissionswerte.

Da die Filtercharakteristik nichtlinear ist, sind diese Werte nur für die untersuchten Wellenpakete exakt gültig. Werden höhere Wellen verwendet, verschieben sich die Kurven, bleiben aber vom Trend her identisch. Aus der Grafik (Abb. 4.5) ergibt sich, dass über eine undurchlässige Wand (0% Porosität), deren relative Bauwerkshöhe unter 45% liegt, fast 90% der Wellenenergie transmittiert. Ein 5% Filter mit einer relativen Bauwerkshöhe von 100% (bis an die Ruhewasserlinie) reduziert die transmittierte Energie auf 32%. Reichen die Bauwerke über die Wasserlinie hinaus, wird eine noch höhere Reduktion der transmittierten Wellenenergie erzielt.

Um eine Beurteilung eines Künstlichen Riffs zu ermöglichen, muss neben der Reflexions- und Transmissionseigenschaft auch die Dissipation betrachtet werden. Als Ergebnis systematischer Modellversuche wird in Abb. 4.6 die Energieverteilung von Reflexion, Transmission und Dissipation für optimale Filtersysteme gegeben.

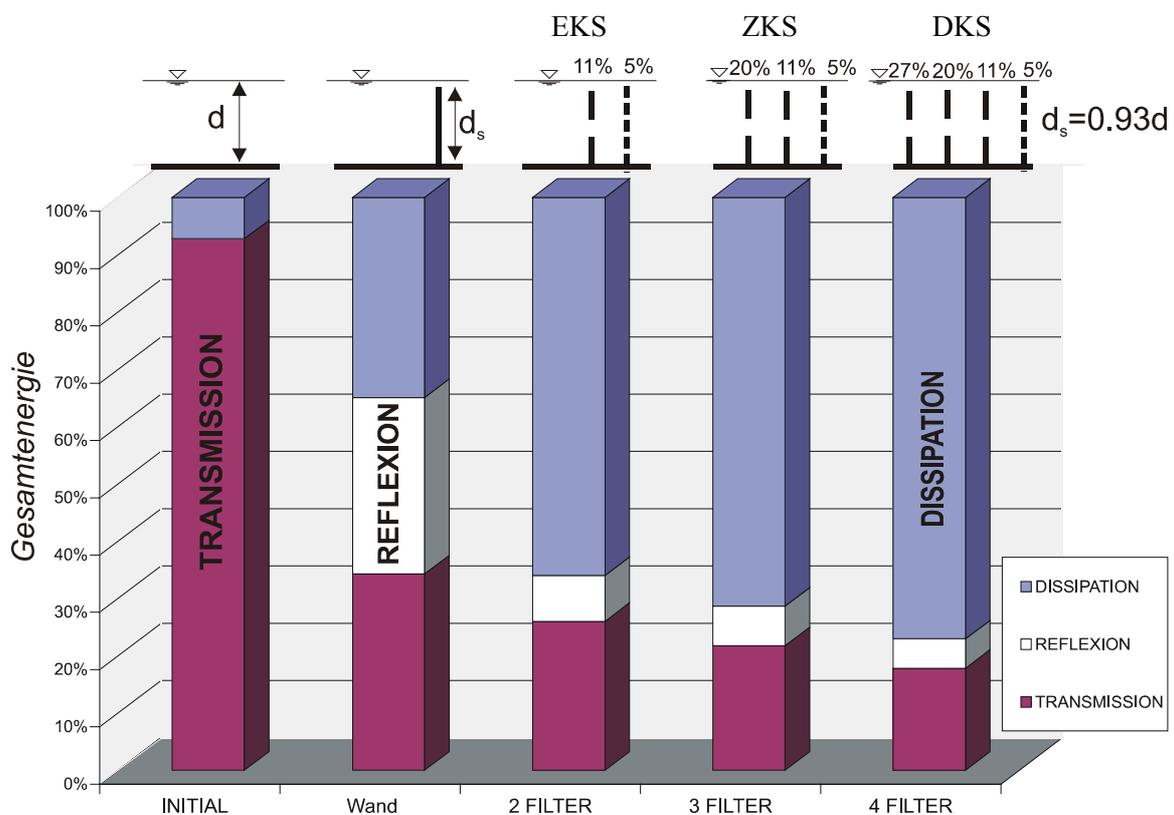


Abb. 4.6: Anteile von Reflexion, Transmission und Dissipation ausgewählter Unterwasser-Filter an der Gesamtenergie

Zu Kalibrierungszwecken ist in der ersten Spalte der Verlust an Wellenenergie zwischen zwei entfernten Pegeln ($\Delta x=30\text{m}$) im Wellenkanal angegeben. Es wird deutlich, dass ein Einzelfilter (zweite Spalte) zwar in der Lage ist, die Transmission zu reduzieren, aber noch einen deutlichen Anteil an Reflexion besitzt. Durch die Einführung eines zweiten Filters an optimaler Position kann die Reflexion reduziert werden und die Dissipation steigt enorm an. Die Einführung zusätzlicher Filter führt zu einem weiteren Anstieg der Dissipation, allerdings mit geringen Steigerungsraten. Der Einbau weiterer Filter muss daher sorgfältig mit dem erforderlichen Bauaufwand abgeglichen werden.

4.2 Porositätsverteilung am Filter

Untersuchungen von *Kuhlmann* (1998) haben bereits gezeigt, dass es bei gleicher Porositätsverteilung innerhalb eines Filters nahezu unerheblich für Transmission, Reflexion und schließlich Dissipation von Absorbersystemen ist, ob die Einzelkomponenten aus quadratischen oder kreisrunden Querschnitten bestehen. Da die mit dem Filtersystem in Wechselwirkung stehenden Wellen bei mittlerer Wassertiefe ein ausgeprägtes Geschwindigkeitsprofil in Tiefenrichtung besitzen, ist es Ziel der folgenden Experimente, zu klären, inwiefern die Anordnung der Porositätsverteilung innerhalb eines Filters Auswirkungen auf dessen Transmissions- und Reflexionsverhalten hat.

Versuche im Plexiglaskanal (KWK):

Es werden zunächst Versuche im Kleinen Wellenkanal (KWK) der TU Berlin durchgeführt. Hier ist es zum einen möglich, die Versuche seitlich zu beobachten, zum anderen kann in kurzer Zeit mit erträglichem Bauaufwand eine Vielzahl von Variationen durchgeführt werden.

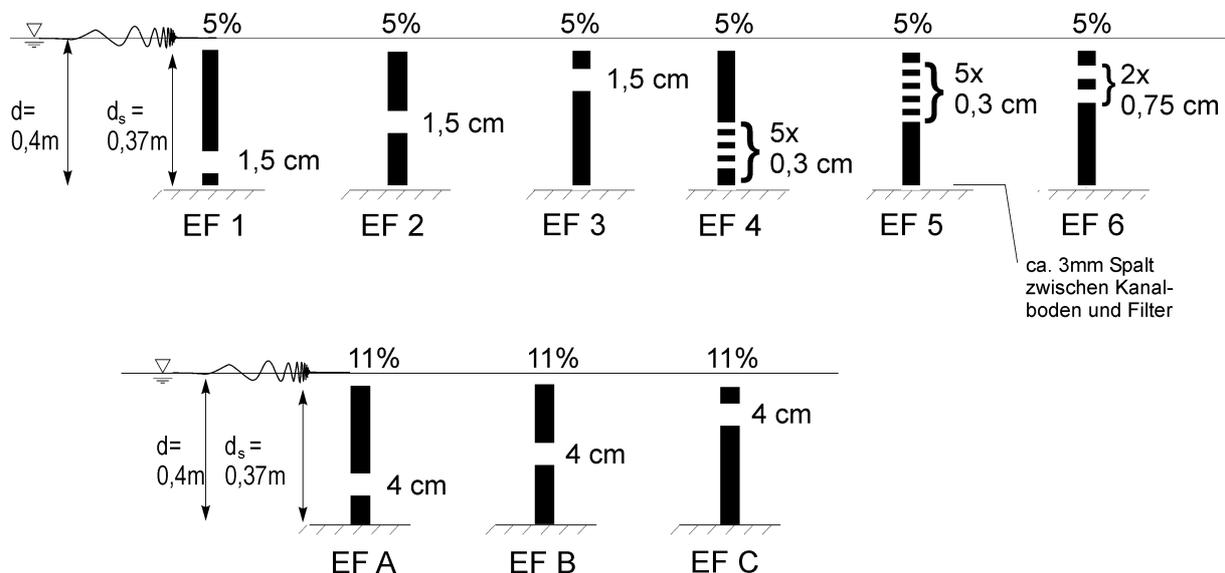
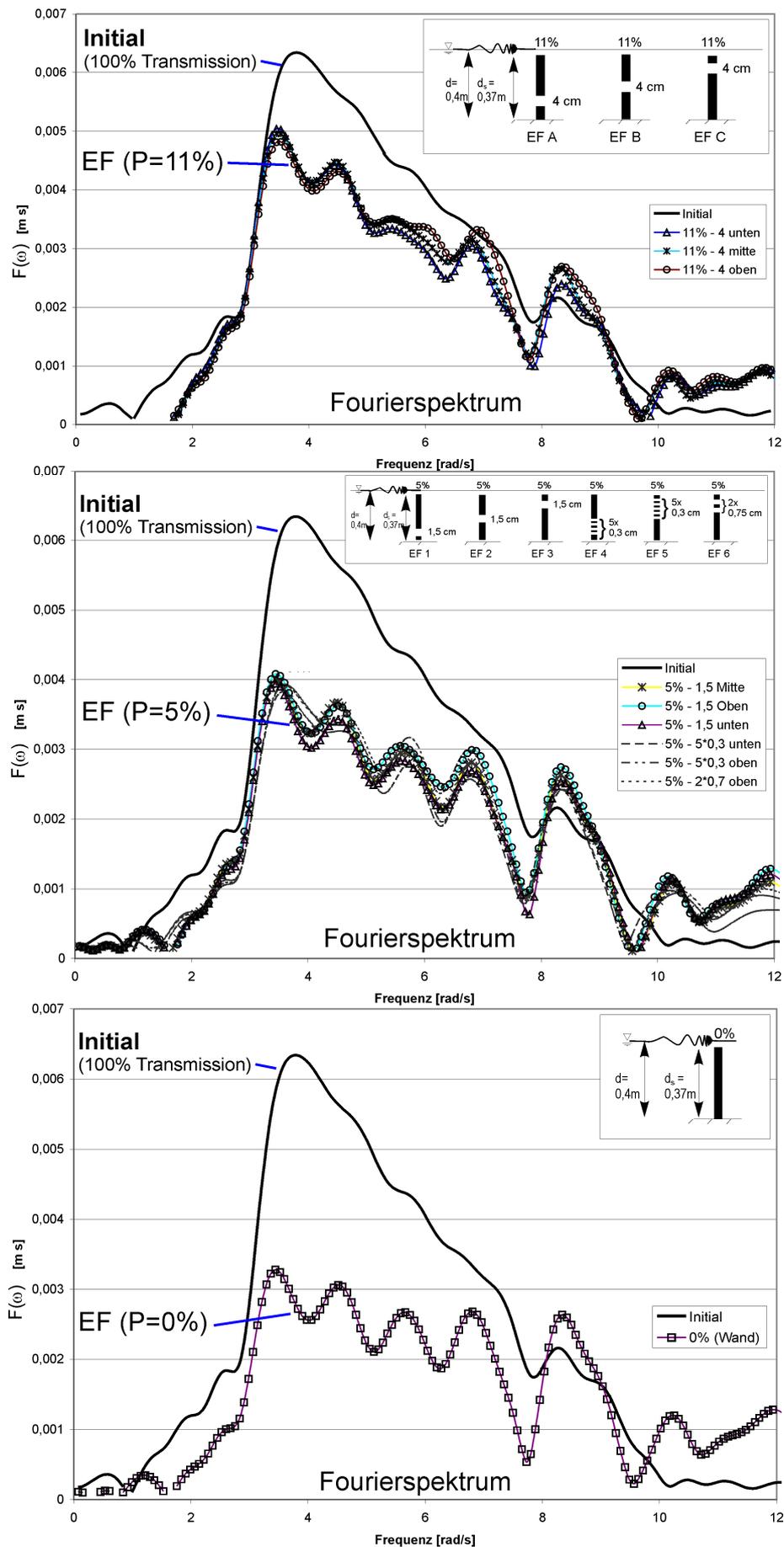


Abb. 4.7: Variation der Porositätsverteilung an einem 5% und 11% Filter

Für die Versuche im KWK wird die Technik der transienten Wellenpakete in Verbindung mit Initialmessungen angewandt, da nur mit dieser Methode sehr exakte Messungen (ohne störende Reflexionen etc.) in diesem kleinen Modellmaßstab durchzuführen sind. Für einen Filter mit 5% und 11% Porosität werden Variationen der Porositätsverteilung durchgeführt. Neben der Position der Porosität wird zusätzlich eine Aufteilung in „viele kleine“ bzw. „wenige große“ Öffnungen vorgenommen. Somit ergeben sich 10 Variationen, die in Abb. 4.7 vorgestellt werden. Als Grenzwert der durchlässigen Filtern fungiert neben den Initialmessungen ohne Bauwerk auch ein Filter mit 0% Porosität (feste getauchte Wand). In Abb. 4.8 sind Fourieranalysen zur Transmission bei verschiedener Porositätsverteilung für die unterschiedlichen Varianten dargestellt. Zunächst (oben) werden die Ergebnisse für einen Filter mit 11% Porosität, dann (mitte) für einen Filter mit 5% Porosität und schließlich (unten) für eine getauchte undurchlässige Wand aufgetragen.

Abb. 4.8: Transmission bei verschiedener Porositätsverteilung ($d_s/d = 0,93$)

Die Analyse der Messdaten durch Fourierspektren (Abb. 4.8) belegen eindeutig, dass die Verteilung der Porosität im Filter für Wellen in Flachwasser und mittleren Wassertiefen (niedrige Frequenzen im Spektrum) keinen bzw. nur einen geringen Einfluss besitzt. Insgesamt ergeben die Versuche, dass der Hauptparameter für die Transmissions- und Reflexionseigenschaften eines Filters nach wie vor die quantitative Größe der Porosität ist. Die Anordnung und Verteilung innerhalb eines Filters sind nur von untergeordneter bzw. ohne Bedeutung, wie auch ergänzende Versuche (Abb. 4.9, Abb. 4.10) im größeren Wellenkanal der TU Berlin (MWK) belegen. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass im Nahfeld des Filters starke Wechselwirkungen in Tiefenrichtung bestehen und die Wellenenergie sich den Weg mit dem geringsten Widerstand sucht. Um diese Wechselwirkungen zu verdeutlichen wird in Kapitel 6 die nichtlineare numerische Simulation angewendet.

links: Schlitzbreite 0,14m

rechts: 14 Schlitz mit einer Breite von 0,01m



Abb. 4.9: Versuche im Wellenkanal der TU Berlin (MWK) – Porosität im Mittel 11%

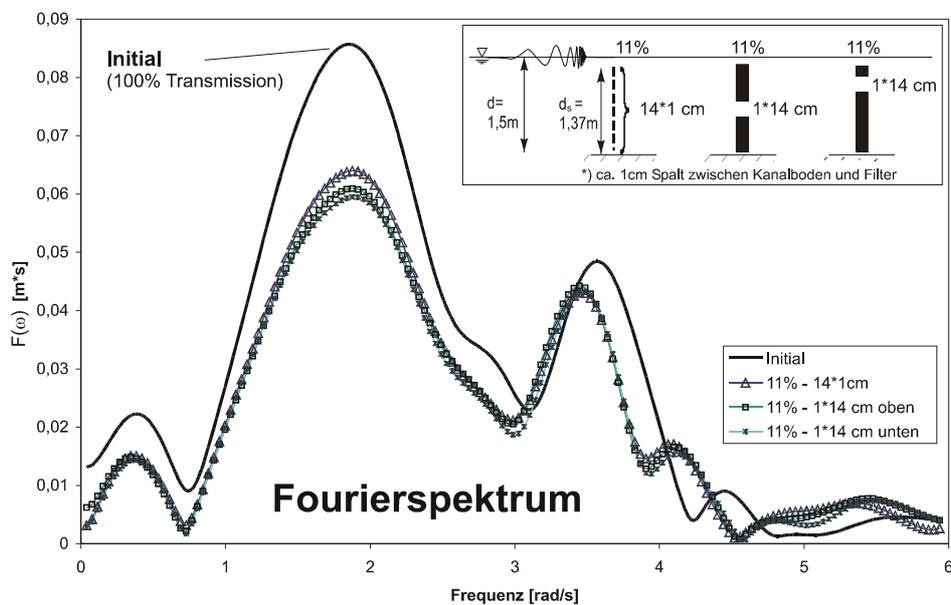


Abb. 4.10: Transmission – Porosität im Mittel 11%

Hinsichtlich der Standfestigkeit, der konstruktiven Gestaltung und der Sedimentbewegung am Bauwerk muss die Anordnung der Porosität allerdings berücksichtigt werden. Da sie beim Transmissionsverhalten keine bedeutende Rolle spielt, ist dieser Freiheitsgrad in der Gestaltung eines optimalen Künstlichen Riffs gegeben.

4.3 Semi-Empirisches Berechnungsverfahren

Die Wirkungsweise und Effizienz von Filtersystemen zur Wellendämpfung ist von verschiedenen Variablen abhängig, die in Wechselwirkung stehen. Für den anwendungsbezogenen Vorentwurf solcher Strukturen ist in der Praxis allerdings oft eine einfache analytische Systembeschreibung vorteilhaft, um unter Vernachlässigung der nichtlinearen Effekte das grundlegende hydrodynamische Verhalten von Filtern zur Wellendämpfung zu beschreiben. Im folgenden wird ein lineares semi-empirisches Berechnungsverfahren vorgeschlagen, das eine Verbesserung bestehender Verfahren darstellt und dazu dient, das Filtersystem für den spezifischen Einsatz und das vorgegebene Entwurfsziel zu optimieren.

Die Berechnung des Systems kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen (analytische Lösungen, numerische Simulation, empirische Gleichungen). Auf jeden Fall muss gewährleistet sein, dass alle interessierenden Eingangsvariablen in das Modell einfließen. Hier kommt folgende Kombination zum Einsatz: In dem semi-empirischen Modell werden zusätzlich zu den aus der linearen Wellentheorie hergeleiteten analytischen Gleichungen die Ergebnisse aus den Messwertanalysen berücksichtigt. Es wird eine Systembeschreibung verwirklicht, die für Einzelfilter und getauchte Filtersysteme Transmission und Reflexion berechnet, sodass aus der Energiebilanz indirekt die Dissipation ableitbar ist.

Modell für Einzelfilter:

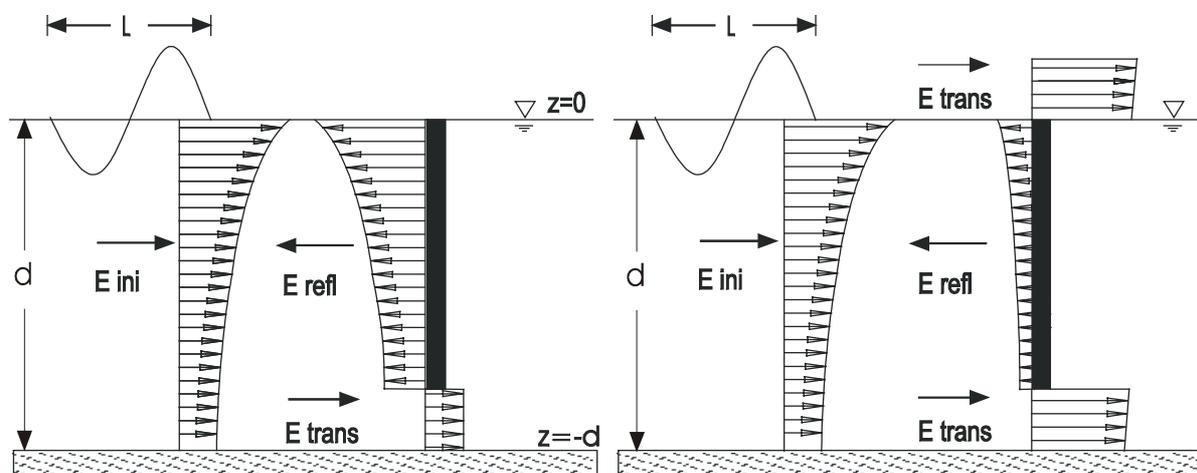


Abb. 4.11: Energietransfer an getauchten Strukturen
 (links: bisherige lineare Verfahren rechts: mit vertikalem Energietransfer)

Wie in Kapitel 2 erläutert sind die bisherigen linearen Berechnungsmodelle (Abb. 4.11, links) nicht dazu geeignet die Transmission durch Wellenüberlauf für getauchte Strukturen zufriedenstellend zu prognostizieren. Versuchsbeobachtungen und nichtlineare Simulationen (Kapitel 6) belegen, dass in Bauwerksnähe ein signifikanter vertikaler Energietransfer stattfindet, der insbesondere über dem Bauwerk zu einer erhöhten Transmission führt (Abb. 4.11, rechts).

Für die Optimierung der Filter ist die Bestimmung von Transmissions-, Dissipations- und Reflexionskoeffizienten erforderlich. Durch Einführung modifizierter Randbedingungen in die Formel von *Hartmann* (1969),

$$C_t = \sqrt{1 - W^2} = \sqrt{2P - P^2} \text{ mit Verbauung } W = 1 - P \quad (4.1)$$

entsteht das neue semi-empirische Modell für getauchte Strukturen. Im Gegensatz zur vereinfachten Annahme nach linearer Wellentheorie (Abb. 4.11, links) wird in dem neuen Ansatz berücksichtigt, dass die Welle das Bauwerk überspült (Abb. 4.11, rechts), selbst wenn die Bauhöhe bis zum Ruhewasserspiegel reicht. Mit dieser modifizierten Randbedingung ergibt sich eine neue Verbauung W^* bzw. Porosität P^* :

$$W^* = \frac{d_s}{d + \frac{H_l}{2}} \quad (4.2)$$

Für den Transmissionskoeffizienten gilt nun:

$$C_t = \sqrt{1 - W^{*2}} \text{ bzw. } C_t = \sqrt{2P^* \cdot P^{*2}} \quad (4.3)$$

Die Verbauung W^* wird durch die Porosität der Filter zusätzlich verringert. Für den zusätzlichen Einfluss der Filterporosität P gilt folgender Ansatz:

$$W^*_P = W^* (1 - 2P) \quad (4.4)$$

In Abb. 4.12 und Abb. 4.13 ist ein Vergleich der mit dieser semi-empirischen Methode berechneten Transmission mit eigenen Messwerten (Wellenkanäle in 3 Maßstäben) und in der Literatur angegebenen experimentellen Daten dargestellt, wobei in Abb. 4.12 der Parameter H_l/d zwischen 0,15 und 0,45 variiert wird. In Abb. 4.13 wird in dem Modell $H_l/d = 0,25$ gewählt und damit die Transmissionscharakteristik der Messwerte (Wand und Einzelfilter) mit H_l/d Werten zwischen 0,2 und 0,27 gut wiedergegeben.

Anhand des berechneten C_t Wertes und der aus der Energiebilanz $E_l = E_T + E_R + E_D$ hergeleiteten Beziehung:

$$C_t^2 + C_r^2 + C_d^2 = 1 \quad (4.5)$$

sowie der in Kapitel 2 angeführten Beziehung von *Kriebel* und *Bollmann* (1996)

$$C_r = 1 - C_t \quad , \text{ folgt für } C_d \quad (*) \text{ eigene Exp. ergeben } C_r = 1 - C_t \text{ im Bereich } d_s/d = 1 \quad (4.6)$$

$$C_d = \sqrt{1 - (C_t^2 + C_r^2)}$$

Die so Bestimmten Koeffizienten C_t , C_r und C_d sind in Abb. 4.15 für die getauchte Wand und poröse Einzelfilter aufgetragen.

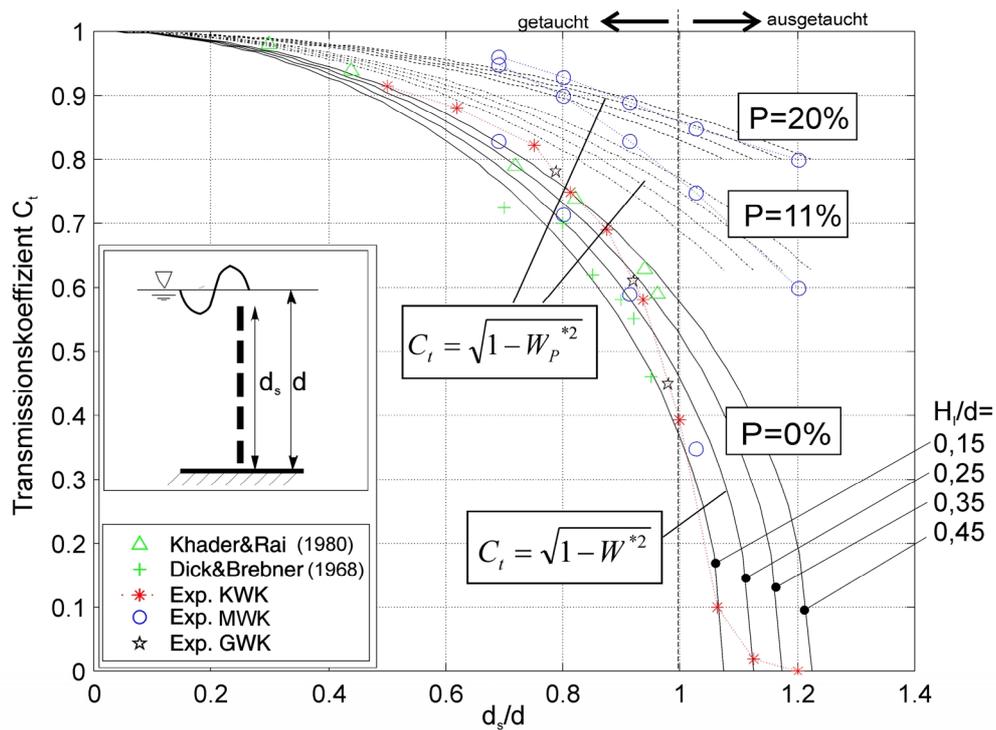


Abb. 4.12: Vergleich von Messserien mit dem neuen Ansatz ($H_l/d = 0,15$ bis $0,45$)

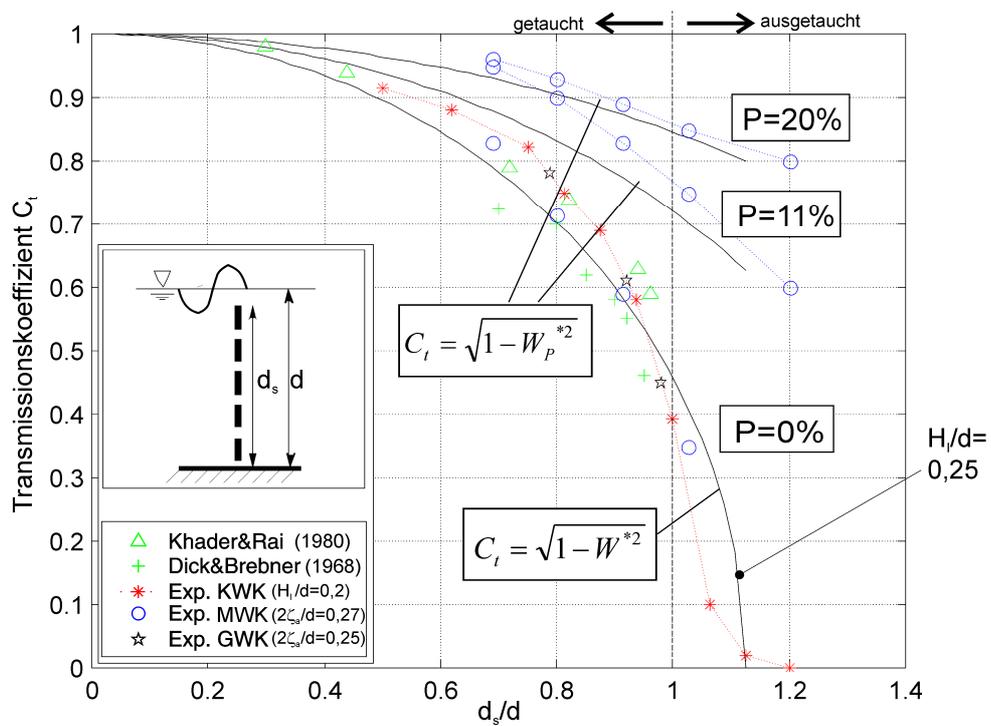


Abb. 4.13: Vergleich von Messserien mit dem neuen Ansatz ($H_l/d = 0,25$)

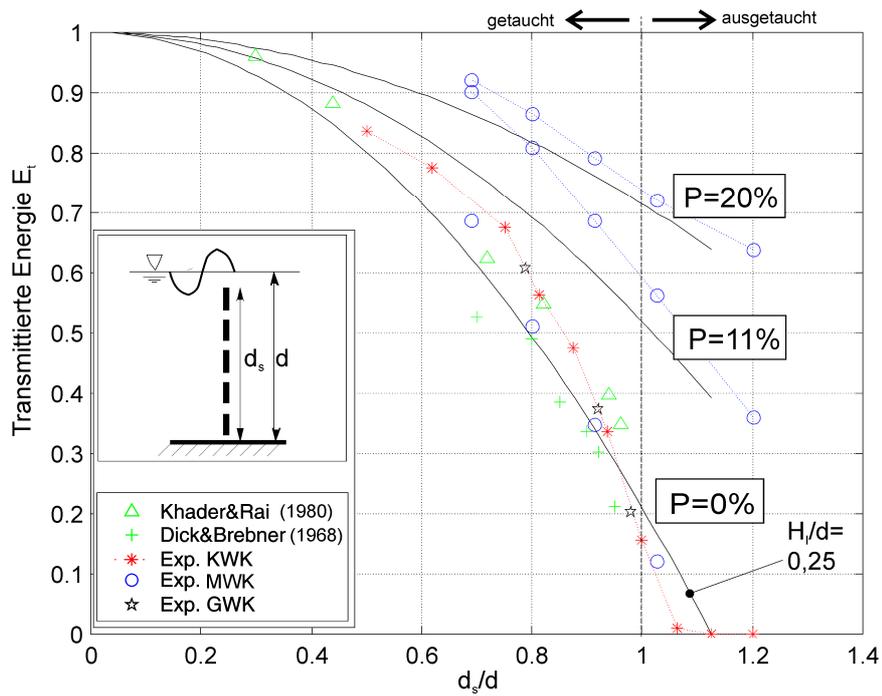


Abb. 4.14: Mit dem semi-empirischen Modell berechnete transmittierte Energie E_T

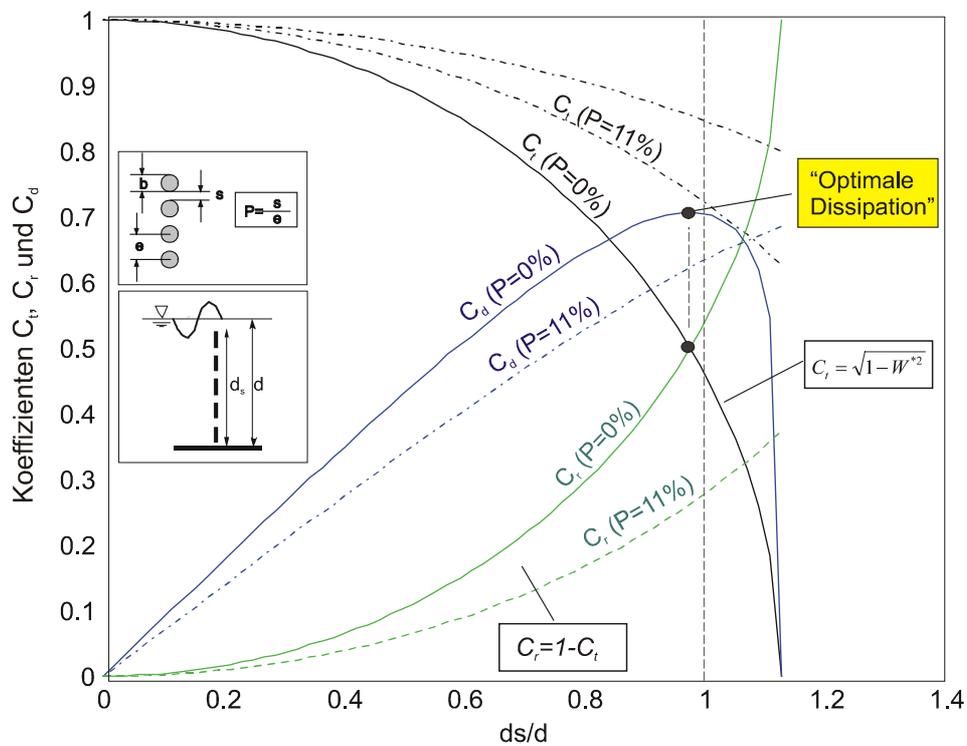


Abb. 4.15: Mit dem semi-empirischen Modell berechnete Koeffizienten C_t , C_r und C_d

Die für eine optimale Dissipation erforderliche Charakteristik eines Einzelfilters (Abb. 4.15) lässt sich mit dieser Vorgehensweise direkt bestimmen. Der durchgeführte Vergleich mit Messungen (Abb. 4.13) belegt die Aussagekraft der Vorhersage. Es bleibt anzumerken, dass mit dieser Methode die in Messungen und numerischen Simulationen festgestellten nichtlinearen Effekte nicht berücksichtigt werden. Für die abschließende Beurteilung eines Systems ist daher nach wie vor eine vollständige numerische Simulation (RANSE/VOF) bzw. der Modellversuch unverzichtbar. Für eine erste Auslegung des Systems ist dieses Modell jedoch vollkommen ausreichend. Durch lineare Überlagerung mehrerer Filter sind auch die Koeffizienten für ein optimales Filtersystem zu bestimmen. Dabei werden in einer vereinfachten Vorgehensweise die Re-Reflexionen zwischen den Filterelementen nur in einem Iterationsschritt berücksichtigt. Als Beispiel dient die Berechnung für ein Einkammersystem, bestehend aus einem 5% und 11% Filter, das in ergänzenden Versuchen am KWK der TU Berlin zum Einsatz kam. Die berechnete dissipative Energie dieses System beträgt 65,75% der initialen Wellenenergie (Transmissionsenergie 14%, Reflexionsenergie 20,25%). Die Versuche zeigen für dieses System eine vergleichbare Verteilung. Eine Berechnung mit dem linearen semi-empirischen Modell ergibt eine ähnlich gute Dissipation für ein System aus zwei 5% Filtern. Allerdings liegt hier der Anteil der Reflexion höher. Ein solches System ist daher für den praktischen Einsatz (Gefährdung des Seeverkehrs) nur eingeschränkt empfehlenswert.

Die (lineare) Berechnung lässt sich auch für ein gesamtes Spektrum durchführen. Abb. 4.16 zeigt einen Vergleich zwischen Messung (GWK) und Berechnung der Wellentransmission eines Einkammersystems.

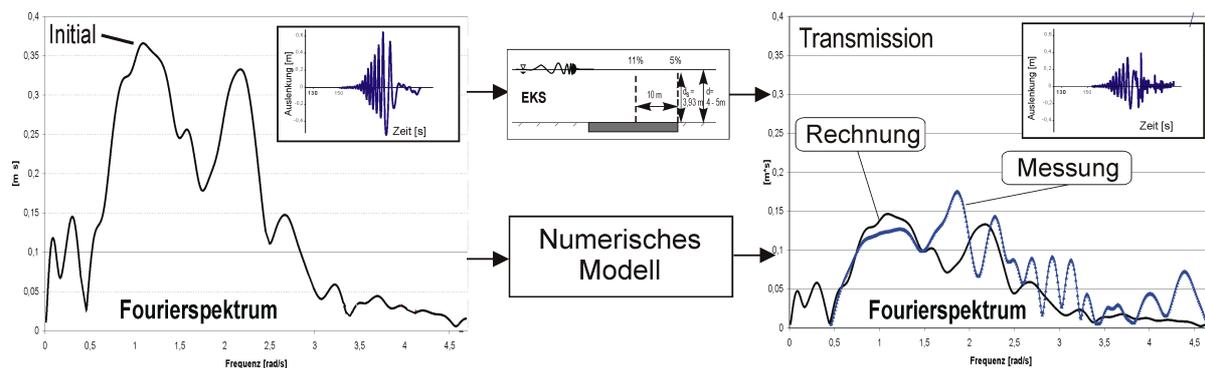


Abb. 4.16: Messung und Berechnung für Wellentransmission

Es wird deutlich, dass die Berechnung den quantitativen Verlauf der Wellentransmission zufriedenstellend wiedergibt. Allerdings kann dieses einfache Modell die nichtlineare Energieumwandlung von langen Wellen in kurze nicht wiedergeben. Daher überschätzt die Berechnung die Transmission bei langen Wellen und unterschätzt sie für kurze Wellen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das entwickelte semi-empirische Modell eine deutliche Verbesserung bisheriger Verfahren darstellt und sehr hilfreich für die Bauwerksauslegung ist. Aufbauend auf diesem Verfahren wäre an eine Weiterentwicklung zu denken, die weitere Parameter (Einfluss der initialen Wellenlänge etc.) z.B. durch Regressionsanalyse von Messdaten zusätzlich berücksichtigt. Das komplette nichtlineare Verhalten des Systems kann aber nur durch eine nichtlineare Berechnungsmethode (Kapitel 5) bzw. sehr aufwendige experimentelle Analysen zufriedenstellend beschrieben werden. Die Vernachlässigung der Reibung in dem linearen Verfahren verhindert eine direkte Bestimmung der Dissipation. Ein erster Schritt zur Klärung dieser dissipativen Vorgänge soll mit dem im folgenden vorgestellten nichtlinearen Berechnungsverfahren erfolgen.

5 Nichtlineares numerisches Verfahren

Das in dieser Arbeit angewandte numerische Verfahren verwendet eine Kopplung zwischen RANSE- und VOF-Methode. Dieses Verfahren wird aufgrund folgender Forderungen für die spezielle Anwendung auf Künstliche Riffe ausgewählt:

- Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Welle und Struktur
- Nichtlineare Beschreibung der freien Oberfläche
- Exakte Berechnung der Geschwindigkeiten, Kräfte und Wasserspiegelauslenkung
- Erfassung nichtlinearer Effekte, Wirbelbildung und Strömungsablösung

Durch die Kopplung mit der VOF-Methode ist es möglich, stark verformte Oberflächen und sogar brechende Wellen zu simulieren.

Im folgenden werden zunächst die Grundgleichungen für die RANSE-Berechnung und die VOF-Methode zur Berücksichtigung der freien Oberfläche erläutert, bevor auf Details der entwickelten Vorgehensweise zur Modellierung Künstlicher Riffe eingegangen wird.

5.1 Erhaltungsgleichungen

Mit dem Vektor V wird das Geschwindigkeitsfeld in der Strömung im Rechengebiet beschrieben:

$$V(x, y, z) = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Die Kontinuitätsgleichung drückt die Massenerhaltung der Strömung aus:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = u_x + v_y + w_z = 0 \quad (5.2)$$

Hierin ist u_x die partielle Ableitung der Geschwindigkeitskomponente u in x-Richtung. Zusammen mit den Navier-Stokes-Gleichungen, die den Impulserhalt in der Strömung beschreiben, lassen sich theoretisch alle Strömungsphänomene beschreiben:

$$\begin{aligned} \rho \cdot (u_t + uu_x + vv_x + ww_x) &= \rho \cdot f_1 - p_x + \mu \cdot (u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \\ \rho \cdot (v_t + uv_x + vv_y + wv_z) &= \rho \cdot f_2 - p_y + \mu \cdot (v_{xx} + v_{yy} + v_{zz}) \\ \rho \cdot (w_t + uw_x + vw_y + ww_z) &= \rho \cdot f_3 - p_z + \mu \cdot (w_{xx} + w_{yy} + w_{zz}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die auftretenden Größen in den Navier-Stokes-Gleichungen bedeuten dabei folgendes: Auf der linken Seite steht die substantielle Ableitung der Geschwindigkeit, die sich aus der lokalen Beschleunigung (dem Zeitableitungsterm) und der konvektiven Beschleunigung zusammensetzt. Auf der rechten Seite bedeuten die f_i eine Beschleunigung aus einer Volumenkraft, so wird die Erdbeschleunigung g als f_3 berücksichtigt. Danach folgen die partiellen Ableitungen des Druckes p . Die dynamische Viskosität μ und die Terme mit den zweifachen partiellen Ableitungen der Geschwindigkeit beschreiben die Diffusion. Die Navier-Stokes-Gleichungen bilden zusammen mit der Kontinuitätsgleichung ein System gekoppelter nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, deren analytische Lösung nur für Sonderfälle möglich ist. Die numerische Lösung erfordert eine immense Rechnerleistung, die für die meisten praktischen Anwendungen nicht aufgebracht werden kann. Um eine numerische Behandlung zu ermöglichen, werden die Zustandsgrößen Geschwindigkeit und Druck jeweils in einen zeitlichen Mittelwert und eine Schwankungsgröße aufgeteilt:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \bar{u} + u' \\ \bar{v} + v' \\ \bar{w} + w' \end{bmatrix} \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (5.4)$$

Hierbei ist zu beachten, dass der Mittelwert der Schwankungsgrößen am Beispiel der u -Geschwindigkeitskomponente $\bar{u}' = 0$ ist, aber $\overline{u'u'} \neq 0$. Dasselbe gilt analog für die anderen Zustandsgrößen.

Mit diesen Annahmen werden die Navier-Stokes-Gleichungen in die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations überführt, in denen die Größen u , v , w und p jetzt für die zeitlichen Mittelwerte stehen.

$$\begin{aligned} \rho \cdot (u_t + uu_x + vu_y + wu_z) &= \rho \cdot f_1 - p_x + \mu \cdot (u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) - \rho \cdot ((\overline{u'u'})_x + (\overline{u'v'})_y + (\overline{u'w'})_z) \\ \rho \cdot (v_t + uv_x + vv_y + wv_z) &= \rho \cdot f_2 - p_y + \mu \cdot (v_{xx} + v_{yy} + v_{zz}) - \rho \cdot ((\overline{u'v'})_x + (\overline{v'v'})_y + (\overline{v'w'})_z) \\ \rho \cdot (w_t + uw_x + vw_y + ww_z) &= \rho \cdot f_3 - p_z + \mu \cdot (w_{xx} + w_{yy} + w_{zz}) - \rho \cdot ((\overline{u'w'})_x + (\overline{v'w'})_y + (\overline{w'w'})_z) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Die RANS-Gleichungen unterscheiden sich von den NS-Gleichungen durch die zusätzlichen Terme der Ableitungen der Reynolds-Spannungen:

$$-\rho \cdot \overline{u'u'} \quad -\rho \cdot \overline{u'v'} \quad -\rho \cdot \overline{u'w'} \quad -\rho \cdot \overline{v'v'} \quad -\rho \cdot \overline{v'w'} \quad -\rho \cdot \overline{w'w'} \quad (5.6)$$

Es besteht generell die Möglichkeit, die Terme der Reynolds-Spannungen explizit zu lösen oder durch die Einführung eines Turbulenzmodells (Rodi, 1993) eine Lösung zu erzielen. Die Verwendung eines Turbulenzmodells erleichtert die Lösung der Gleichungen und führt zu deutlich kürzeren Rechenzeiten. Deshalb wird hier auf ein solches Modell zurückgegriffen.

5.2 Turbulenzmodell

Die meisten Strömungen in praktischen Ingenieur Anwendungen sind turbulent. Charakteristisch für diese Strömungen sind drehungsbehaftete Bewegungen zusammenhängender Fluidballen, die sich in einem breiten Schwankungsspektrum und unterschiedlich großen Wirbeln ausdrücken.

Für die Entstehung der kleineren Wirbel, die mit hochfrequenten Schwankungen auftreten, sind die viskosen Kräfte in einer Strömung verantwortlich. Die größeren Wirbel einer Strömung entstehen gekoppelt mit niederfrequenten Schwankungen, da infolge Wandreibung der Strömung zunehmend Energie entzogen wird. Kleine Störungen in Wandnähe breiten sich in Form von Schwankungsbewegungen aus und die Strömung wird instabil. Die größeren Wirbel, die vorwiegend für die Turbulenzbewegung verantwortlich sind, entziehen der Hauptströmung kinetische Energie und geben sie durch Zerfall an kleiner werdende Elemente weiter. Schließlich wird die kinetische Energie von den kleinsten Elementen durch viskose Effekte in Wärme dissipiert.

Zur Berücksichtigung der Turbulenz in CFD-Berechnungen gibt es verschiedene Ansätze (Abb. 5.1). Um die kleinskaligen Wirbel richtig wiederzugeben, muss mit DNS (Direkte Numerische Simulation) gearbeitet werden. Der Rechenaufwand hierfür ist allerdings beim Stand der Technik für praktische Ingenieur Anwendungen nicht vertretbar. Eine Möglichkeit, die großen Turbulenzwirbel direkt zu berechnen, besteht in der sogenannten LES (Large Eddy Simulation).

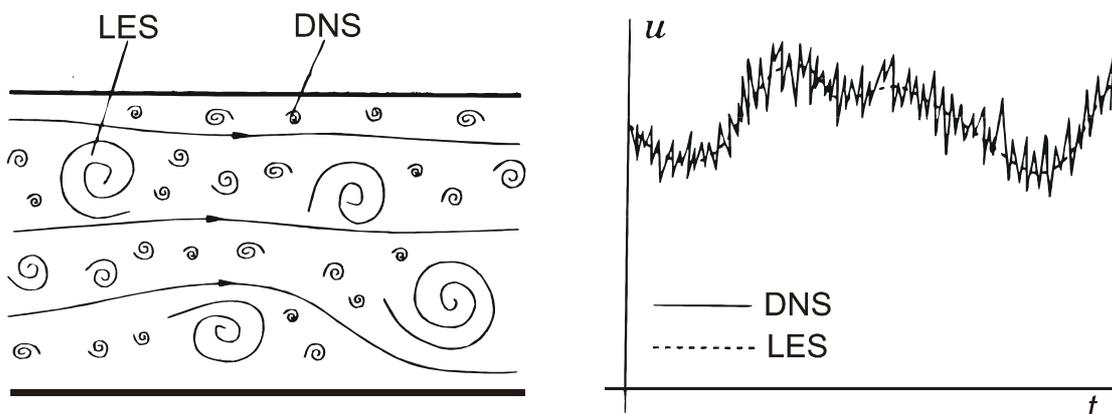


Abb. 5.1: Schematische Darstellung von Turbulenz nach *Ferziger* und *Perić* (1996)

Diese Methode taucht zur Zeit auch immer häufiger in praktischen Anwendungen auf, wobei der Rechenaufwand noch immer erheblich ist.

Am weitesten verbreitet ist allerdings immer noch die Verwendung von Turbulenzmodellen, die mit den Reynolds-Gleichungen gekoppelt werden. Um die Reynolds-Gleichungen berechnen zu können, muss mit Hilfe eines solchen Turbulenzmodells ein Zusammenhang zwischen den in den Reynolds-Spannungen enthaltenen Schwankungsgrößen und den mittleren Geschwindigkeiten hergestellt werden.

In der Praxis wird häufig die *Boussinesq*-Hypothese angewendet, die isotrope Turbulenz voraussetzt und die Reynolds-Spannungen über eine turbulente Scheinviskosität μ_t an den mittleren Geschwindigkeitsgradienten koppelt.

$$-\rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{v'u'} & \overline{w'u'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{w'v'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} = \mu_t \cdot \begin{bmatrix} 2u_x & u_y + v_x & u_z + w_x \\ u_y + v_x & 2v_y & v_z + w_y \\ u_z + w_x & v_z + w_y & 2w_z \end{bmatrix} - \frac{2}{3} \rho \cdot \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Darin ist k die mittlere turbulente kinetische Energie:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (5.8)$$

Mit dem Ansatz von Boussinesq werden die RANS-Gleichungen in folgende Form überführt:

$$\begin{aligned} \rho \cdot (u_t + uu_x + vu_y + wu_z) &= \rho \cdot f_1 - p_x - \frac{2}{3} \rho \cdot k_x + (\mu + \mu_t) \cdot (u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \\ &\quad + \mu_{t_x} 2u_x + \mu_{t_y} (u_y + v_x) + \mu_{t_z} (u_z + w_x) \\ \rho \cdot (v_t + uv_x + vv_y + wv_z) &= \rho \cdot f_2 - p_y - \frac{2}{3} \rho \cdot k_y + (\mu + \mu_t) \cdot (v_{xx} + v_{yy} + v_{zz}) \\ &\quad + \mu_{t_x} (u_y + v_x) + \mu_{t_y} 2v_y + \mu_{t_z} (v_z + w_y) \\ \rho \cdot (w_t + uw_x + vw_y + ww_z) &= \rho \cdot f_3 - p_z - \frac{2}{3} \rho \cdot k_z + (\mu + \mu_t) \cdot (w_{xx} + w_{yy} + w_{zz}) \\ &\quad + \mu_{t_x} (u_z + w_x) + \mu_{t_y} (v_z + w_y) + \mu_{t_z} 2w_z \end{aligned} \quad (5.9)$$

Ein weit verbreitetes Turbulenzmodell ist das Standard k - ε -Modell, in dem k die turbulente kinetische Energie ist und ε die Dissipationsrate von k . Also ist ε die pro Zeit- und Masseneinheit in Wärme überführte Energie der Turbulenzbewegung (Rodi, 1993). Die Scheinviskosität μ_t wird als Funktion von k und ε ermittelt:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.10)$$

Der Faktor $C_\mu = 0,09$ ist eine empirisch ermittelte Konstante, die standardmäßig verwendet wird.

Die Variablen k und ε werden durch zwei partielle Differentialgleichungen beschrieben - man spricht daher von einem Zwei-Gleichungsmodell. Diese Differentialgleichungen enthalten weitere empirische Konstanten. In der Veränderung der Konstanten, die eine Abweichung vom Standard- k - ε -Modell bedeuten, liegt eine Möglichkeit, das Turbulenzmodell für spezielle Anwendungen anzupassen. Für Sonderfälle existieren eine Reihe weiterer Turbulenzmodelle, die je nach Anwendungsfall eine höhere Genauigkeit der Turbulenzmodellierung erwarten

lassen. Zu erwähnen sind hier beispielsweise das RNG k - ε -Modell oder das kubische k - ε -Modell. Für die folgenden Untersuchungen wird fast immer das „Standard k - ε -Modell“ verwendet, da es sich in den Voruntersuchungen für die 2D-Berechnungen bewährt hat und den besten Kompromiss zwischen dem numerischen Aufwand und der Genauigkeit der Ergebnisse darstellt.

In Wandnähe verliert das „Standard- k - ε -Modell“ seine Gültigkeit. Daher wird in der Nähe von reibungsbehafteten Wänden eine Wandfunktion eingeführt. Diese Vorgehensweise ist insbesondere deshalb als unkritisch zu bewerten, da die Wandreibung in dem speziellen Anwendungsfall für getauchte Wände erwartungsgemäß einen sehr geringen Anteil am Gesamtwiderstand des Bauwerkes hat. Die Grundgleichungen der Wandfunktion werden kurz erläutert:

Wandfunktion

Bei der Wandfunktion wird die Strömungsgeschwindigkeit in der Strömungsgrenzschicht mit dem logarithmischen Wandgesetz berechnet. Hierbei wird ein logarithmischer Zuwachs der Geschwindigkeit nach außen angenommen:

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{0,42} \cdot \ln(E \cdot y^+) \quad (5.11)$$

Mit: u : Geschwindigkeit in x-Richtung
 u_τ : Wandschubspannungs-Geschwindigkeit
 E : Empirische Konstante, für glatte Wände $E = 9,0$
 y^+ : Dimensionsloser Wandabstand

Das logarithmische Wandgesetz wird in den Berechnungen nur in Wandnähe angewendet. Außerhalb dieses Bereichs wird mit dem oben beschriebenen Turbulenzmodell gerechnet.

5.3 VOF Methode zur Berücksichtigung der freien Oberfläche

Mit den im vorigen Abschnitt aufgeführten Gleichungen werden die Zustandsgrößen Geschwindigkeit und Druck in einem Strömungsgebiet ohne freie Oberfläche ermittelt. Um zusätzlich die Berechnung der Verformung der freien Oberfläche und deren Einfluss auf die übrigen Zustandsgrößen in einem turbulent viskosen Lösungsverfahren zu ermöglichen, gibt es, wie bereits erwähnt, unterschiedliche Lösungsansätze. Der hier verwendete Ansatz basiert auf der VOF-Methode, wie sie von *Ubink* (1997) weiterentwickelt wurde. Diese Methode kann in dem an der TU Berlin zur Verfügung stehenden 3D-Strömungslöser (STAR-CD) aktiviert und mit dem RANSE Löser gekoppelt werden.

Zur Vereinfachung werden die theoretischen Grundlagen der VOF-Methode für den zweidimensionalen Fall beschrieben. Die Methode ist aber ebenso dreidimensional anwendbar. Die Gleichungen und Darstellungen werden in einem ortsfesten, kartesischen Koordinatensystem angegeben. Bei der VOF-Methode wird eine zusätzliche abhängige Variable F eingeführt, die durch ihren Wert den Flüssigkeitszustand - und damit die Größen für Dichte und Viskosität - in einer Zelle angibt. Die im vorigen Abschnitt beschriebenen zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen sowie die Kontinuitätsgleichung haben nach wie vor Gültigkeit.

Bei der numerischen Berechnung werden die Geschwindigkeitskomponenten üblicherweise an den Zellrändern, der Druck sowie die neu eingeführte Variable F im Zellmittelpunkt ausgewertet. Abb. 5.2 veranschaulicht diesen Zusammenhang am Beispiel der Zelle i,j .

F kann Werte von Null bis Eins annehmen, der Wert von F in einer Zelle gibt Auskunft über den Anteil des Volumens einer Zelle, der mit Flüssigkeit gefüllt ist:

- $F = 1$ Zelle voll Flüssigkeit (z.B. Wasser)
- $F = 0$ Zelle leer (bzw. mit Luft gefüllt)
- $0 < F < 1$ Zelle teilweise gefüllt, Transitionsbereich

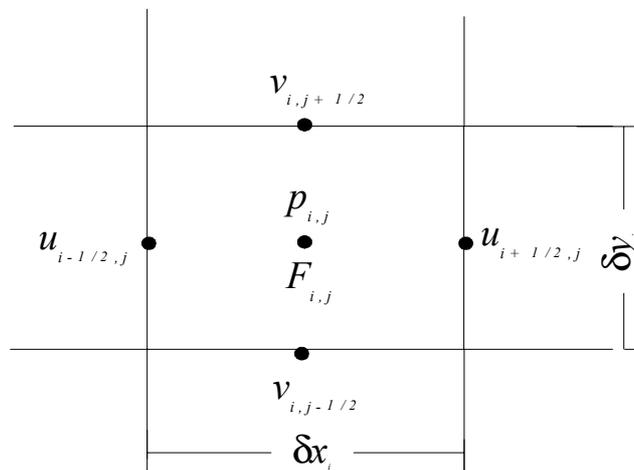


Abb. 5.2: Lage der Variablen in einer Berechnungsgitterzelle

Eine Zelle, die teilweise gefüllt ist, muss eine freie Oberfläche enthalten. Als zusätzliches Kriterium wird angegeben, dass sie mindestens eine Nachbarzelle besitzen muss, die leer ist, d. h. das Verfahren soll eine scharfe Trennschicht für die freie Oberfläche ermitteln. Weiterhin wird die Lage der freien Oberfläche innerhalb dieser Zellen ermittelt und bestimmt, auf welcher Seite der Fläche sich die Flüssigkeit befindet. Dazu wird über die Gradienten von F ermittelt, in welcher Richtung der Wert von F sich am stärksten ändert. In dieser Richtung liegt die Oberflächennormale. Über die Vorzeichen der Gradienten ergibt sich die Information, auf welcher Seite sich die Flüssigkeit befindet. Aus den aufgeführten Charakteristika wird deutlich, dass die VOF-Methode in der Lage ist, beliebig stark verformte Oberflächen zu behandeln, so auch übereinandergewölbte und ineinander zusammenfallende Flächen, wie sie z.B. beim Wellenbrechen auftreten.

Da F eine stückweise Funktion mit jeweils einem konstanten skalaren Wert für eine Zelle ist, müssen die Ableitungen mit einem speziellen numerischen Verfahren bestimmt werden. Ist die Steigung der Fläche (bei 2-D-Betrachtungen ist dies nur eine Linie) ermittelt, wird diese in der Zelle so angesetzt, dass die Zelle entsprechend des zuvor ermittelten Flüssigkeitsvolumens geteilt wird. So wird die Lage der freien Oberfläche angegeben. Das Verfahren nähert die Oberfläche durch stückweise lineare Verläufe in den einzelnen Oberflächenzellen an. An der ermittelten Oberflächenkontur werden für weitere Berechnungsschritte die gültigen Oberflächenrandbedingungen angesetzt. Hier werden auch zeitlich veränderliche Randbedingun-

gen aufgrund instationärer Strömungen berücksichtigt. Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Lösung für einen Zeitschritt vollzieht sich in drei Abschnitten:

- (1) Lösung der RANS-Gleichungen mit den Werten aus dem vorangegangenen Zeitschritt als Eingangsgrößen zur ersten Annäherung der Geschwindigkeitsverteilung im neuen Zeitschritt.
- (2) Iterative Druck-Geschwindigkeitskopplung zur Erfüllung der Kontinuitätsgleichung.
- (3) Aktualisieren der Funktion F und damit der Gestalt des Flüssigkeitsgebiets.

Einige Besonderheiten sind in der numerischen Behandlung dieser Vorgehensweise zu beachten:

Für die numerische Berechnung der konvektiven und lokalen Terme in den Navier-Stokes-Gleichungen - Schritt (1) - wird ein gemischtes „upwind“ und „central differencing scheme“ vorgeschlagen, das mit einem Wichtungsfaktor α den Einfluß der Terme der stromaufwärts und stromabwärts gelegenen Zelle berücksichtigt. Die stromaufwärts gelegenen Terme werden mit dem Faktor $1 + \alpha$ und die stromabwärts gelegenen mit dem Faktor $1 - \alpha$ gewichtet.

Eine weitere Besonderheit besteht bei der Ermittlung des Drucks in Zellen mit freier Oberfläche, der in Schritt (2) benötigt wird. Bei Zellen, die sich vollständig im Flüssigkeitsgebiet befinden, wird zur Erfüllung der Kontinuitätsgleichung der Druck derart verändert, dass entweder Flüssigkeit in die Zelle eingesogen oder herausgedrückt wird, um die Kontinuitätsgleichung zu erfüllen. Bei Zellen mit freier Oberfläche wird der Druck hingegen als lineare Interpolation aus dem Umgebungsdruck p_N und dem Druck innerhalb des Fluids p_S ermittelt. Diese Bedingung wird mit folgender Gleichung erfüllt:

$$p = (1 - \eta) \cdot p_N + \eta \cdot p_S \quad (5.12)$$

Hierin ist $\eta = \frac{d_c}{d}$ das Verhältnis der Zellmittelpunkts-Abstände zum Abstand der freien Oberfläche und zum Mittelpunkt der Nachbarzelle. Zur Veranschaulichung dient Abb. 5.3 :

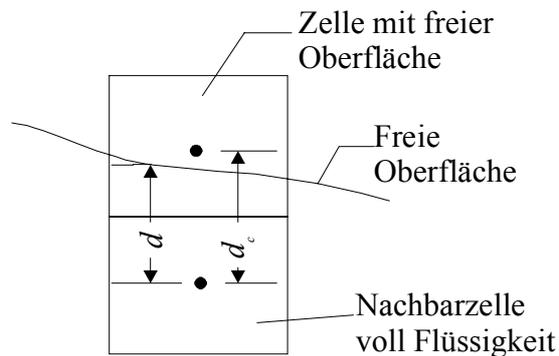


Abb. 5.3: Größen für Druckermittlung an freier Oberfläche

Die Berechnung der Funktion F in Schritt (3) wird mit Hilfe spezieller Differenzen-Verfahren durchgeführt. Ein verbreitetes Verfahren, das ausführlich bei *Hirt* und *Nichols* (1981) beschrieben wird, ist das „Donor-Acceptor-Verfahren“. Bei dieser Methode werden die neuen Werte für F in einer Zelle je nach Ausbildung der freien Oberfläche zur Strömungsrichtung

nur aus dem stromauf- oder aus dem stromabwärts gelegenen Wert ermittelt. Hierbei können sich Werte für F ergeben, die etwas größer als eins oder etwas kleiner als null sind. Diese werden dann jeweils auf die zulässigen Grenzwerte korrigiert. Ebenso erreichen die Werte - wie in numerischen Verfahren allgemein üblich - selten exakt die Werte null oder eins. Da die Werte $F = 0$ bzw. $F = 1$ für die Definition einer Zelle als leer bzw. voll erforderlich sind, wird deshalb eine Fehlerschranke von üblicherweise 10^{-6} eingefügt, um Zellen mit Abweichungen in dieser Größenordnung wiederum die exakten Werte zuzuordnen. Diese aufgeführten Korrekturen führen nach mehreren Berechnungsschritten zu einem akkumulierenden Fehler im Gesamtvolumen der Flüssigkeit, der jedoch nach *Hirt* und *Nichols* nur im Bereich einiger Promille liegt.

Aufbauend auf diesem Verfahren ist in STAR-CD ein neueres Differenzen-Verfahren implementiert, das sogenannte CICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) Verfahren (*Ubink*, 1997). Dieses liefert in Zusammenhang mit der VOF-Methode schärfere Trennschichten zwischen zwei Fluiden als alternative Verfahren (z.B. Hyper-C) und ist besser für mehrdimensionale Strömungen geeignet. Zur Demonstration dieser Möglichkeit berechnet *Ubink* die Kontur eines Rechtecks in einem ideal rotierenden Strömungsfeld zu verschiedenen Zeitpunkten mit (a) dem Hyper-C und (b) dem CICSAM-Verfahren (Abb. 5.4).

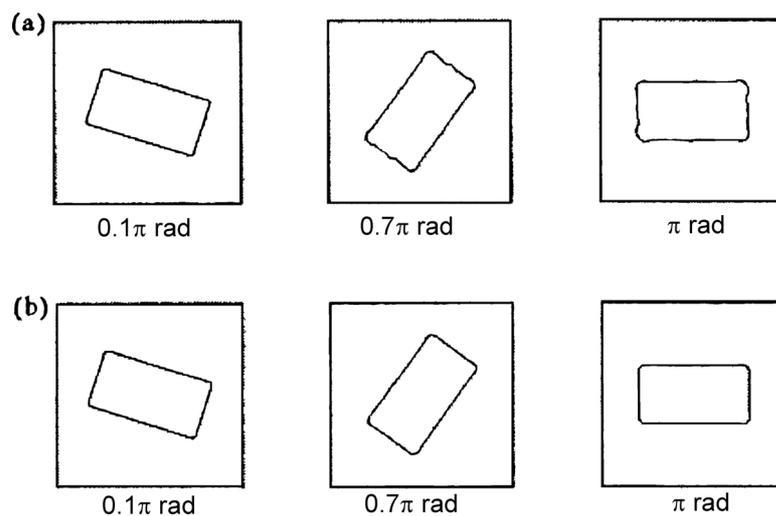


Abb. 5.4: Rotierendes Rechteck mit (a) HYPER-C und (b) CICSAM Verfahren

Mit dem CICSAM-Verfahren können numerische „Beulen“, die beim Hyper-C Verfahren nach einer 180° Drehung auftreten, vermieden werden.

Bei *Ubink* wird, wie in anderen Verfahren, in Schritt (3) neben der Bestimmung des Betrags von F die Bestimmung der Steigung respektive der Lage der freien Oberfläche durchgeführt. Dies beinhaltet auch die Ermittlung der Oberflächenseite, auf der sich das Fluid befindet.

Für die numerische Stabilität der Berechnungen ist die Abstimmung des Zeitschritts Δt auf die gewählten Zellgrößen des Berechnungsgitters Δx_i und Δz_j und die Wahl des Wichtungsfaktors α von Bedeutung. Die Bewegung der Flüssigkeit darf in einem Zeitschritt nicht über eine Zelle hinweg stattfinden, da in den Differenzenschemata nur Größen auf benachbarte Zellen übertragen werden können. Der Zeitschritt Δt muss aus diesem Grunde kleiner als die kleinste im Berechnungsraum vorhandene Zelldurchflusszeit gewählt werden. Als Kriterium dafür wird die sog. „Courant-Zahl“ verwendet:

$$Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \text{ bzw. } Co = \frac{w\Delta t}{\Delta z} \quad (5.13)$$

Gängige Werte für die sog. „Courant-Zahl“ (Co) sind ein Viertel bis ein Drittel der Zelldurchflusszeit. Für die in der Arbeit durchgeführten Berechnungen wird die Courant-Zahl konstant auf $Co = 0.3$ gehalten, indem die Wahl des jeweiligen Zeitschrittes während der Berechnung automatisch angepasst wird.

5.4 Lösungsalgorithmen

Durch die Diskretisierung des Rechengebiets liegt das gekoppelte nichtlineare Gleichungssystem zur Lösung der Strömungszustandsgrößen in Form von algebraischen Finite-Volumen-Gleichungen vor. Dieses Gleichungssystem besteht im allgemeinen aus einer großen, dünn besetzten Matrix. Zur Lösung derartiger Gleichungssysteme sind verschiedene Lösungsalgorithmen entwickelt worden. Diese arbeiten meist mit sogenannten Prediktor-Korrektor-Verfahren, in denen die Strömungsgleichungen durch Aufspaltung der Operatoren vorübergehend voneinander entkoppelt werden, so dass sie einzeln gelöst werden können. Im Prediktor-Schritt wird zuerst durch Lösung der Impulserhaltungs-Gleichungen ein provisorisches Geschwindigkeitsfeld ermittelt, und in einem oder mehreren Korrekturschritten wird eine Kopplung von Druck und Geschwindigkeit vorgenommen, um die Kontinuitätsgleichung zu erfüllen. Gängige Verfahren stellen die PISO-Methode (Pressure Implicit with Splitting of Operands) sowie die SIMPLE-Methode (Semi Implicit Pressure Linked Equations) dar (*CD User Manual*, 1997). Die PISO-Methode führt mehrere Korrekturschritte durch, ist numerisch stabiler und besser für instationäre Berechnungen geeignet als die SIMPLE-Methode. Die SIMPLE-Methode verzichtet von vornherein auf die Zeitableitungen und ist daher besonders für stationäre Berechnungen geeignet, obwohl auch instationäre Berechnungen durch mehrere Iterationen in einem Zeitschritt vorgenommen werden können. Mit nur einem ausgeführten Korrekturschritt ist die SIMPLE-Methode deutlich schneller, aber auch empfindlich bei ungünstig gewählten Netzen.

In dieser Arbeit wird aufgrund der instationären Strömungsverhältnisse die PISO-Methode verwendet.

Ermittlung der Zustandsgrößen der Strömung

Die Zerlegung des Berechnungsgebiets in Finite Volumen setzt voraus, die Strömungszustandsgrößen aus Finiten Differenzen zu ermitteln. Als Interpolationsverfahren zur Ermittlung der Zustandsgrößen in einer Zelle werden unterschiedliche „differencing schemes“ angewendet. Die am weitesten verbreiteten sind das „upwind differencing scheme“ (UD) sowie das „central differencing scheme“ (CD). Beim UD-Verfahren wird die Zustandsgröße aus dem Wert in der stromauf gelegenen Zelle bestimmt. Der Abbruchfehler ist 1. Ordnung. Dieses Interpolationsverfahren ist numerisch sehr stabil, kann jedoch zu einem „Verschmieren“ der Ableitungen – der sogenannten numerischen Diffusion - führen und somit einen großen kumulativen Fehler stromabwärts mit sich bringen. Dieses Verfahren wird meist für die konvektiven Terme benutzt. Das CD-Verfahren bildet den Differenzenquotienten aus der stromauf- und der stromabwärts gelegenen Zelle. Sein Abbruchfehler ist 2. Ordnung, wodurch das Verfahren zwar genauer, jedoch numerisch instabiler ist. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer Interpolationsverfahren, die hier nicht weiter vertieft werden sollen. Bei zeitabhängigen partiellen Ableitungen, die bei instationären Strömungen auftreten, werden vorwiegend implizite

Verfahren verwendet. Die Unbekannten eines neuen Zeitschritts sind sowohl an die Nachbar-Raumpunkte als auch an den vorangegangenen Zeitschritt gekoppelt. Sie werden über ein Gleichungssystem implizit bestimmt, wobei die Zeitableitungen für den letzten Zeitschritt aus dem Differenzenquotienten bestimmt werden.

5.5 Spezielle Modellbildung für „Künstliche Riffe“

Zur Durchführung der transienten viskosen Strömungsberechnung um getauchte Filter ist es notwendig, zunächst die Geometrie der Struktur und des Wellenkanals zu modellieren und anschließend zu diskretisieren. Die Art und Weise der Modellierung und Gittergenerierung entscheidet über den Erfolg der Simulation. Die entwickelte und im folgenden vorgestellte Vorgehensweise stellt sich bei der Anwendung auf Künstliche Riffe als erfolgreich und effektiv heraus.

Bei der Simulation durchlässiger Wände werden besondere Anforderungen an die Modellierung gestellt, die sich aus den unterschiedlichen Dimensionen des Wellenkanals im Vergleich zu Details der Struktur ergeben. So beträgt beispielsweise die Länge des zu modellierenden „Großen Wellenkanals“ in Hannover (GWK) 324m. Ein Spalt in einer dort installierten Filterwand mit 5% Porosität ist nur 0,01m dick. Das Rechengitter muss beide Geometrien richtig abbilden. Aus diesen unterschiedlichen Dimensionen lassen sich die Probleme bei der Gittergenerierung ableiten, die mit den zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten - bei transienter Berechnung - nur durch eine unstrukturierte Vernetzungsmethode zu bewältigen sind. Weiter müssen passende Randbedingungen und nicht zuletzt eine geeignete Wellengenerierung implementiert werden.

5.5.1 Geometrie

Die Geometrie des „Numerischen Wellenkanals“ wird gemäß der in den Experimenten verwendeten Wellenkanäle erstellt.

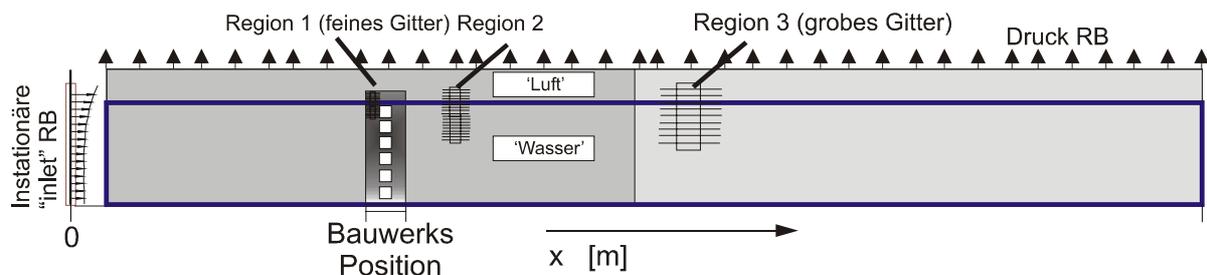


Abb. 5.5: Geometrie, Gitter und Randbedingungen für die numerische Analyse

Ist die aus mehreren Teilschritten bestehende Modellierung für einen Wellenkanal fertiggestellt, kann durch Verwendung eines Skalierungsfaktors eine erneute Berechnung für Kanäle anderer Größenordnung durchgeführt werden. In Abb. 5.5 sind Geometrie, Gitter und Randbedingungen (RB) für die numerische Analyse dargestellt. Da eine instationäre RANSE/VOF-Berechnung für ein solches Modell eine große Rechnerleistung und hohe Rechenzeiten benötigt, müssen einige Beschränkungen beachtet werden. So sollte beispielsweise die Anzahl der verwendeten Gitterzellen so klein wie möglich und so hoch wie nötig (hier ~30.000 – 50.000) gehalten werden.

Dies erfordert eine Beschränkung der Kanallänge und die Verwendung unstrukturierter Gitter, was eine Gitterverfeinerung im Nahfeld der Struktur bedeutet. Selbst bei der Simulation sehr kurzer Wellenzüge bzw. einzelner Wellen muss mindestens eine Kanallänge von 2-3 Wellenlängen vor und 4-6 Wellenlängen hinter der Struktur modelliert werden, um mit dem erstellten Modell die Interaktion von Wellen mit getauchten Strukturen richtig wiederzugeben. Für Berechnungen zur Validation von Experimenten wird annähernd die gesamte Kanallänge modelliert, um zum einen die Wellenüberlagerung vor dem Bauwerk richtig zu berücksichtigen und zum anderen Reflexionen vom Kanalende (Böschung) innerhalb des Auswertzeitraumes zu vermeiden.

5.5.2 Generierung des Rechnetzes

Da die Fluid-Bewegungen in zwei Richtungen gelöst werden, wird ein 2D-Gitter implementiert. Die Zellen zur Modellierung des Wellenkanals können hierbei vollkommen orthogonal zueinander angeordnet werden, da bei der Verwendung der VOF-Methode keine verformten oder bewegten Gitter benötigt werden. Der Vorteil bezüglich Rechengenauigkeit und –geschwindigkeit von orthogonalen Hexaederzellen gegenüber verformten Hexaeder- oder Tetraederzellen wird von *Brandt* und *Habel* (1998) bei der Simulation der Strömung um Schiff und Propeller festgestellt. Für derartige Simulationen wird von ihnen daher eine blockstrukturierte Vernetzungsmethode verwendet (*Brandt* und *Habel*, 1997). Durch die in der vorliegenden Arbeit verwendete unstrukturierte Gittervernetzung wird eine hohe Auflösung in der Nähe des Filters erzielt und gleichzeitig die Gesamtanzahl der Zellen auf einem akzeptablen Niveau gehalten. Der „Numerische Kanal“ wird in mindestens 3 Regionen mit unterschiedlicher Gitterintensität aufgeteilt (Abb. 5.5). Die durchgeführten Testrechnungen des Autors und vergleichbare Berechnungen im Rahmen einer vom Verfasser betreuten Diplomarbeit (*Pákozdi*, 1999) zur Abschätzung der Gittersensitivität lassen darauf schließen, dass schon bei der Berechnung ohne Bauwerk mindestens 50 Zellen pro Wellenlänge benötigt werden, um exakte Ergebnisse zu erzielen und numerische Diffusion (Abb. 5.6) zu vermeiden.

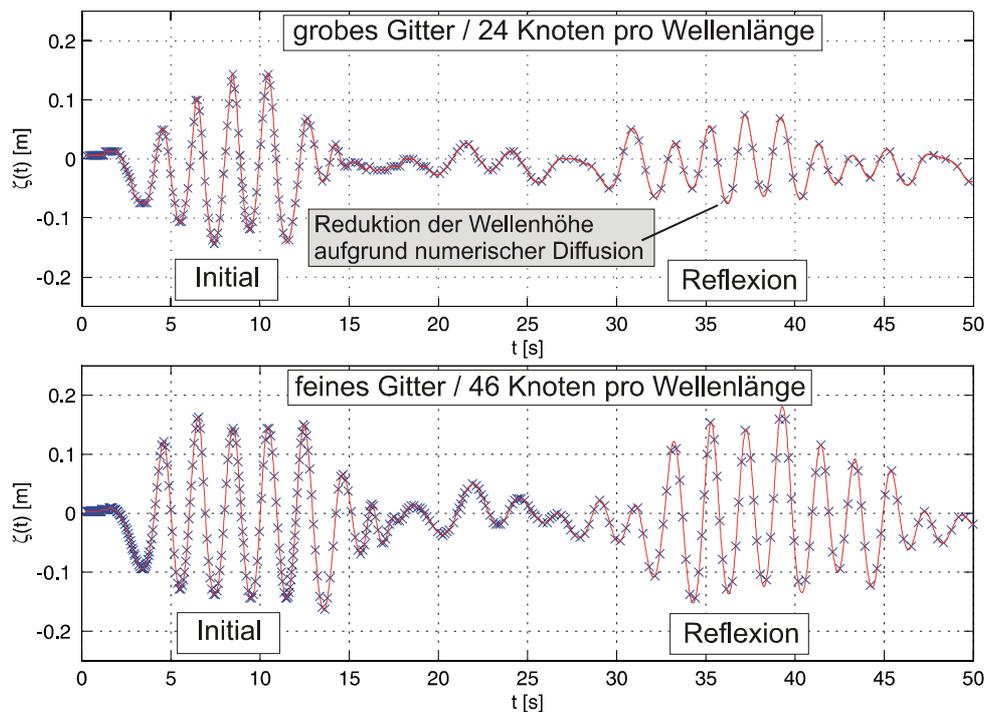


Abb. 5.6: Numerische Diffusion bei „groben“ Rechengittern

Für die Berechnungen mit Struktur werden daher folgende Anhaltswerte für die Gitterdichte definiert:

- 50 – 100 Zellen pro Wellenlänge in der Region 3 (grobes Gitter)
- 100 – 200 Zellen pro Wellenlänge in der Region 2
- 500 Zellen pro Wellenlänge in der Region 1

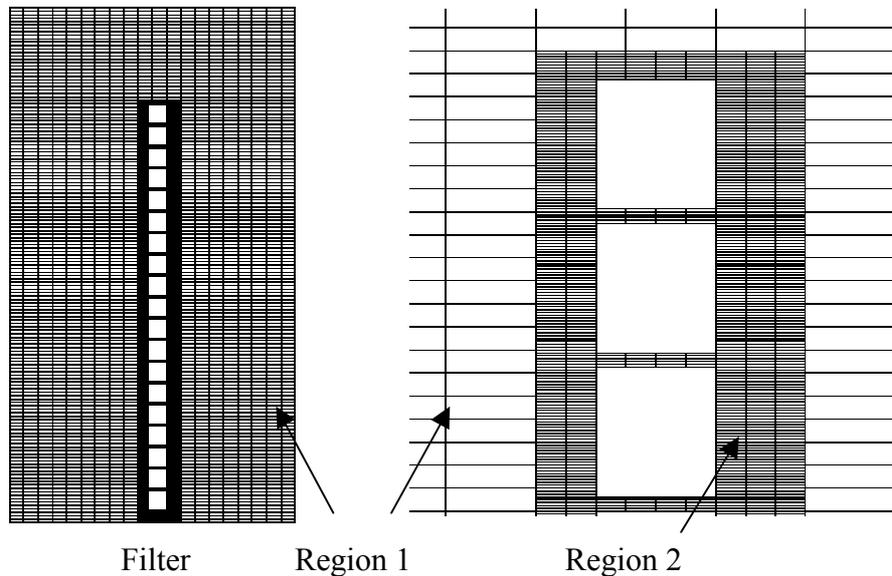


Abb. 5.7 Gitterstruktur im Nahfeld des Filters

An den Schnittstellen der verschiedenen Gitter-Regionen werden „coupled interfaces“ benutzt, damit die Strömungsgrößen von einer Zelle in Region 2 in mehrere Zellen von Region 1 übergeben werden. Hierbei wird das sogenannte „integral matching“ verwendet, bei dem die Information einer Zelle aus Region 2 immer an eine feste Anzahl von Zellen in Region 1 übergeben wird.

In Abb. 5.7 ist das unstrukturierte Gitter (Region 1 und 2) im Nahbereich des Unterwasser-Filters zu sehen. Die einzelnen Filter-Komponenten sind durch Aussparung von Zellen modelliert, in deren Randflächen reibungsbehaftete Wände („no slip walls“) als Randbedingung vorgegeben werden.

5.5.3 Wellenerzeugung, Randbedingungen und Materialeigenschaften

Bei der Berechnung werden verschiedene Randbedingungen eingeführt. Der Boden und das Ende des Wellenkanals werden als Wand mit Reibung deklariert. Die Seitenwände als Wand ohne Reibung. Die von Luft bedeckte Oberseite des Kanals wird als Druckrandbedingung mit einem konstanten Wert, dem atmosphärischen Normaldruck, definiert.

Bei Pákozdi (1999) werden für das Ende des Kanals alternative Randbedingungen zur festen Wand untersucht, um Reflexionen von dieser zu verhindern. Die Idee ist, dass der numerische Kanal verkürzt werden kann, wenn durch eine Druckrandbedingung die Transmission der Wellen aus dem Berechnungsgebiet ohne Reflexionen erreicht wird. Es wird daher diese Randbedingung unter Berücksichtigung der quasistatischen Druckänderung unter der Welle angegeben. Der Pegelschrieb einer Simulation mit dieser Druckrandbedingung ist in Abb. 5.8 dargestellt.

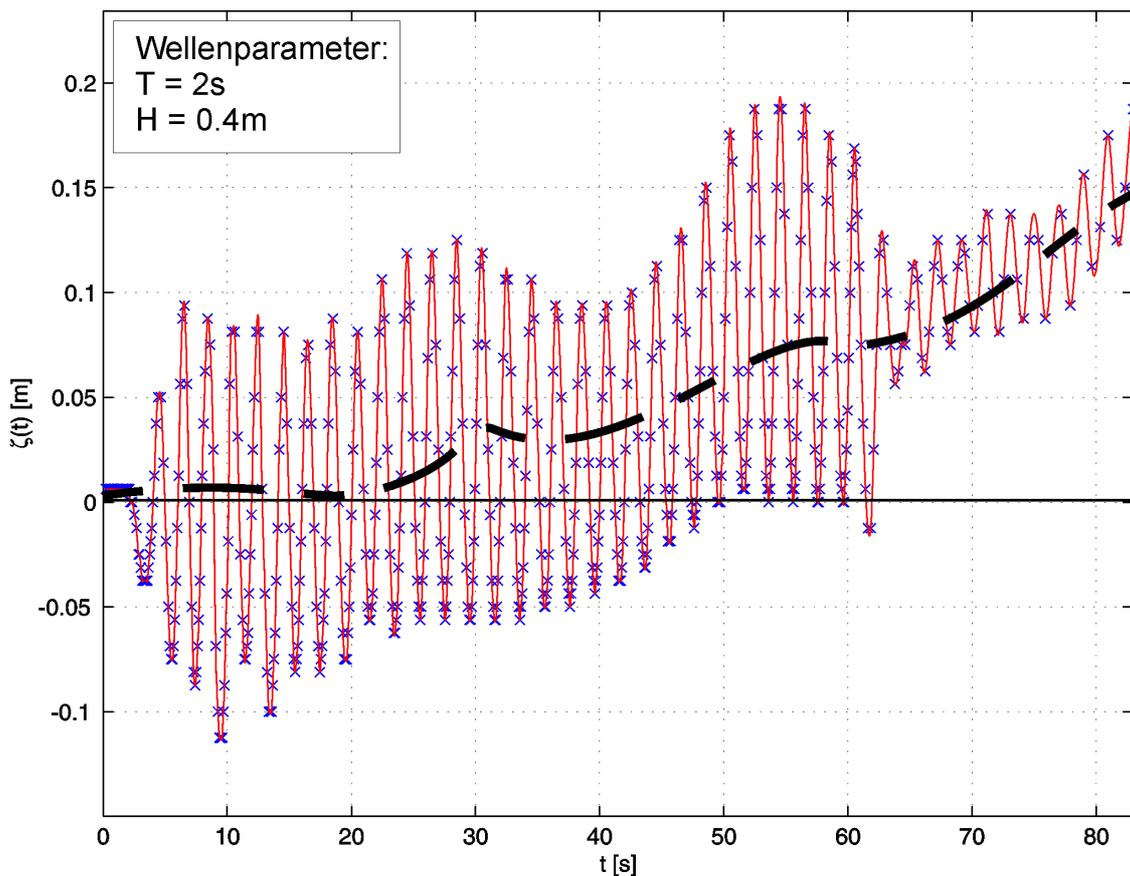


Abb. 5.8 Pegelanstieg bei ungünstiger Druckrandbedingung am „Auslass“

Der numerische Kanal wurde gemäß den Abmessungen des Wellenkanals (MWK) der TU Berlin modelliert und regulärer Seegang mit einer Periode $T = 2\text{s}$ und einer Wellenhöhe $H = 0,4\text{m}$ erzeugt. Ergebnis der Simulation ist, dass die Wellen wie gewünscht nahezu ohne Reflexionen das Berechnungsgebiet verlassen. Der Wasserstand im Berechnungsgebiet bleibt jedoch nur für einen begrenzten Zeitraum konstant. Bereits nach einigen Wellenlängen steigt er erheblich an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit der Einführung der Druckrandbedingung (für Luft und Wasser!) bei der Druckkopplung innerhalb der numerischen Simulationsumgebung am Ende des Kanals ein neuer Freiheitsgrad entstanden ist. Kleine Fehler in der Berechnung können sich dort aufsummieren und sich im Strömungsgebiet fortpflanzen. Dadurch können physikalisch falsche Lösungen entstehen. Aus diesem Grund wird in den folgenden Berechnungen weiterhin die Randbedingung „Wand mit Reibung“ am Kanalende eingesetzt. Diese muss weit genug von der zu untersuchenden Struktur entfernt sein, um Reflexionen von dort innerhalb des Auswertezeitraumes zu verhindern. Des Weiteren wird in einigen Berechnungen die Eigenschaft der numerischen Diffusion bei groben Gittern ausgenutzt, um die Wellenhöhe am Ende des Wellenkanals zu reduzieren und gleichzeitig Gitterpunkte einzusparen.

Um die Generierung von Wellen zu ermöglichen, wird am Strömungseinlass („Inlet“) eine instationäre Randbedingung eingeführt. Dazu wird ein FORTRAN-Unterprogramm entwickelt, in dem während der Simulation die aktuellen Strömungsparameter abgerufen werden und eine definierte zeitabhängige Geschwindigkeitsverteilung vorgegeben wird. Für die Ermittlung dieser Geschwindigkeitsverteilung sind verschiedene Lösungen möglich. Sie kann beispielsweise aus linearer bzw. höherer Wellentheorie vorausberechnet werden. Eine Möglich-

keit ist auch, die Geschwindigkeitsverteilung aus der Klappenbewegung des Wellenblattes zu ermitteln. Diese Vorgehensweise hat sich insbesondere in Zusammenhang mit Validationsrechnungen bewährt und wird vorwiegend angewendet. Zusätzlich müssen im gesamten Lösungsgebiet zum Zeitpunkt $t=0$ alle Anfangsbedingungen (Geschwindigkeiten, Druck, etc.) vorgegeben werden. Im Normalfall sind die Anfangsgeschwindigkeiten Null und der Druck im gesamten Berechnungsgebiet kann aus Überlagerung des Atmosphärendrucks der Luft und des statischen Drucks im Wasser berechnet werden. Eine weitere Alternative zur Erzeugung der Wellen wäre, die Bewegung des Wellenblattes zu simulieren. Dies würde allerdings eine erneute Gittergenerierung zu jedem Zeitschritt erfordern und zu deformierten Zellen in der Nähe des Blattes führen.

Da bei der VOF-Methode auch die freie Oberfläche berechnet wird, müssen die Materialeigenschaften sowohl für Wasser als auch für Luft vorgegeben werden. Hierfür werden die Werte der Standardatmosphäre gewählt.

5.6 Validierung des Numerischen Verfahrens

Die numerische Berechnung erfordert zunächst eine exakte Validierung, bevor weitere Analysen erfolgen. Eine Auswahl (Pegel, Kräfte, Geschwindigkeiten) des Vergleichs mit Messwerten wird im folgendem dargestellt. Um den Einsatz der Methode auch für Modifikationsrechnungen mit unterschiedlichen Filtersystemen zu ermöglichen sowie die Ergebnisauswertung zu vereinfachen und zu automatisieren, ist eine parametergestützte Wellen- und Gittergenerierung hilfreich. Diese Aufgabe wurde von Pákozdi (1999) erfolgreich bewerkstelligt. Die erstellten „Makros“ dieser Arbeit ermöglichen zugleich eine Darstellung der Berechnungsergebnisse im Zeitbereich, die den Vergleich mit Messwerten erleichtert.

5.6.1 Versuchsanordnung

In Abb. 5.9 ist die gewählte Versuchsanordnung für Numerik und Experiment mit identischen Filter- und Sondenpositionen dargestellt. Sie entspricht der zuvor beschriebenen Anordnung für die Untersuchung von getauchten Einzelfiltern.

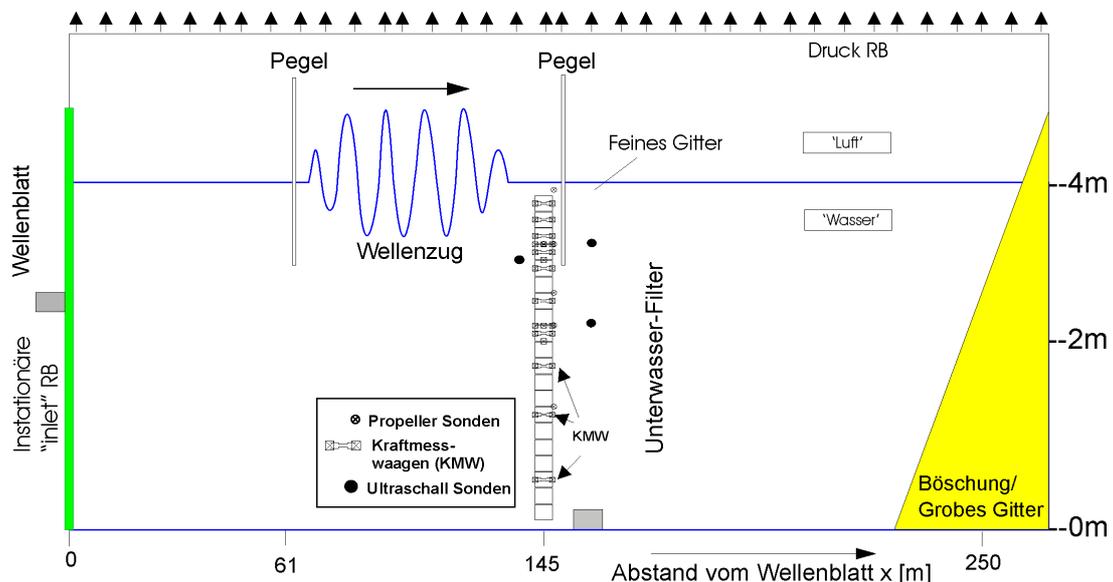


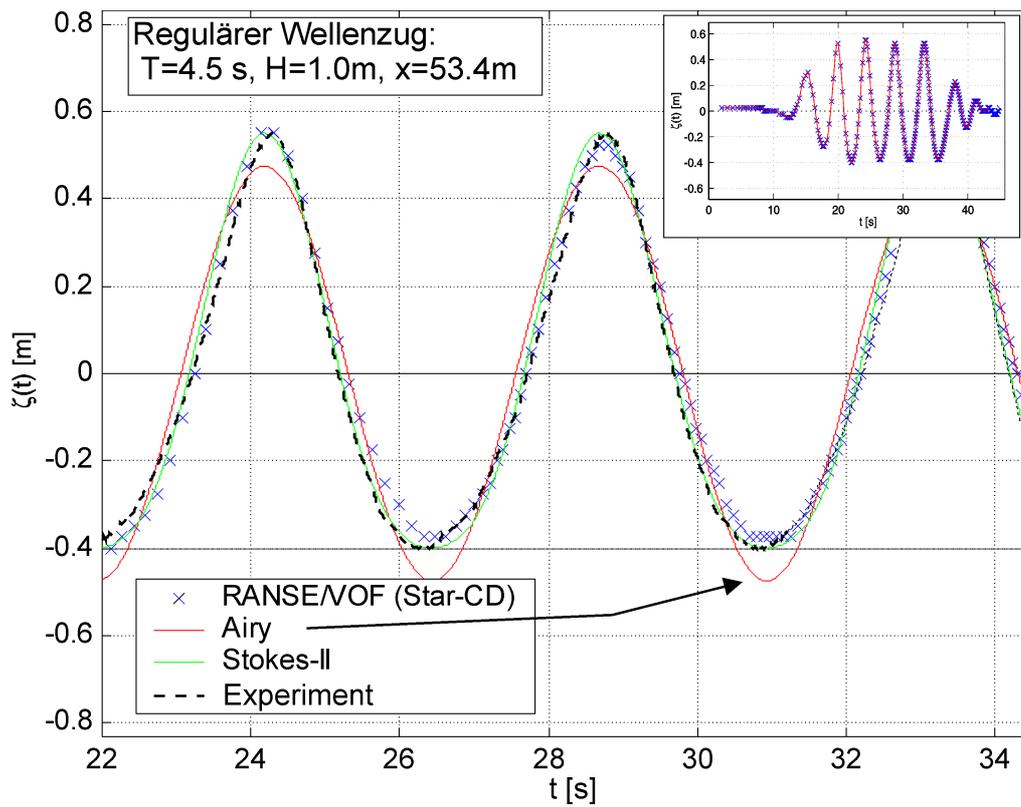
Abb. 5.9: Versuchsanordnung für die Validierung

Für die Validation mit numerischen Ergebnissen wird ein zeitlich begrenzter Wellenzug ausgewählt. Bei diesem Wellenzug wird auf die Generierung eines breiten Spektrums verzichtet, da zum einem die numerische Generierung eines Wellenzuges mit nur einer Wellenperiode leichter zu realisieren ist, und zum anderem auf diese Weise eine konstante Gruppengeschwindigkeit des Wellenzugs erreicht wird. Dies erlaubt das (begrenzte) Verschieben des Signals im Ortsbereich und ermöglicht den Vergleich mit Validationsrechnungen in numerischen Kanälen unterschiedlicher Länge.

5.6.2 Validation für Pegel, Geschwindigkeiten und Kräfte

Als Validierungsbeispiel wird der im GWK untersuchte Einzelfilter mit 5% Porosität (Wasserstand $d=4,0$ m) ausgewählt, der in den Experimenten mit unterschiedlichen Wellenparametern untersucht wurde. Für die Validierung wird ein zeitlich begrenzter Wellenzug verwendet, der aus Einzelwellen gleicher Periode ($T=4,5$ s) besteht.

Initialer Wellenzug:



Transmittierter Wellenzug:

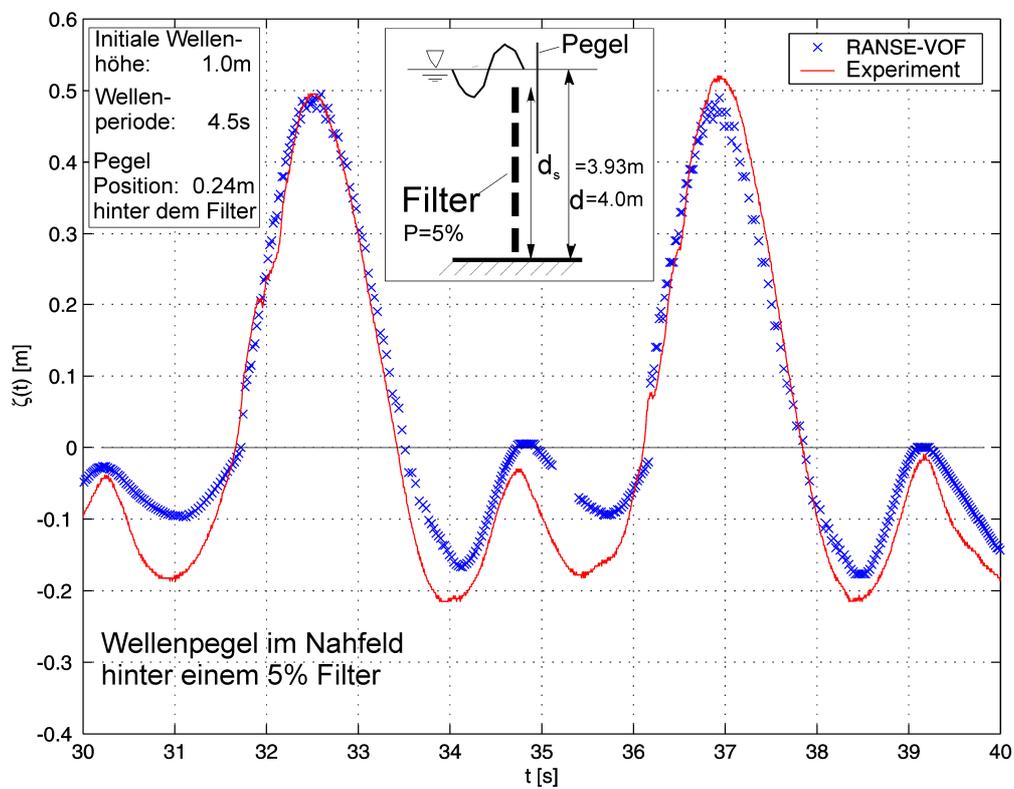


Abb. 5.10: Wellenauslenkung: Initial und hinter einem Filter ($P=5\%$)

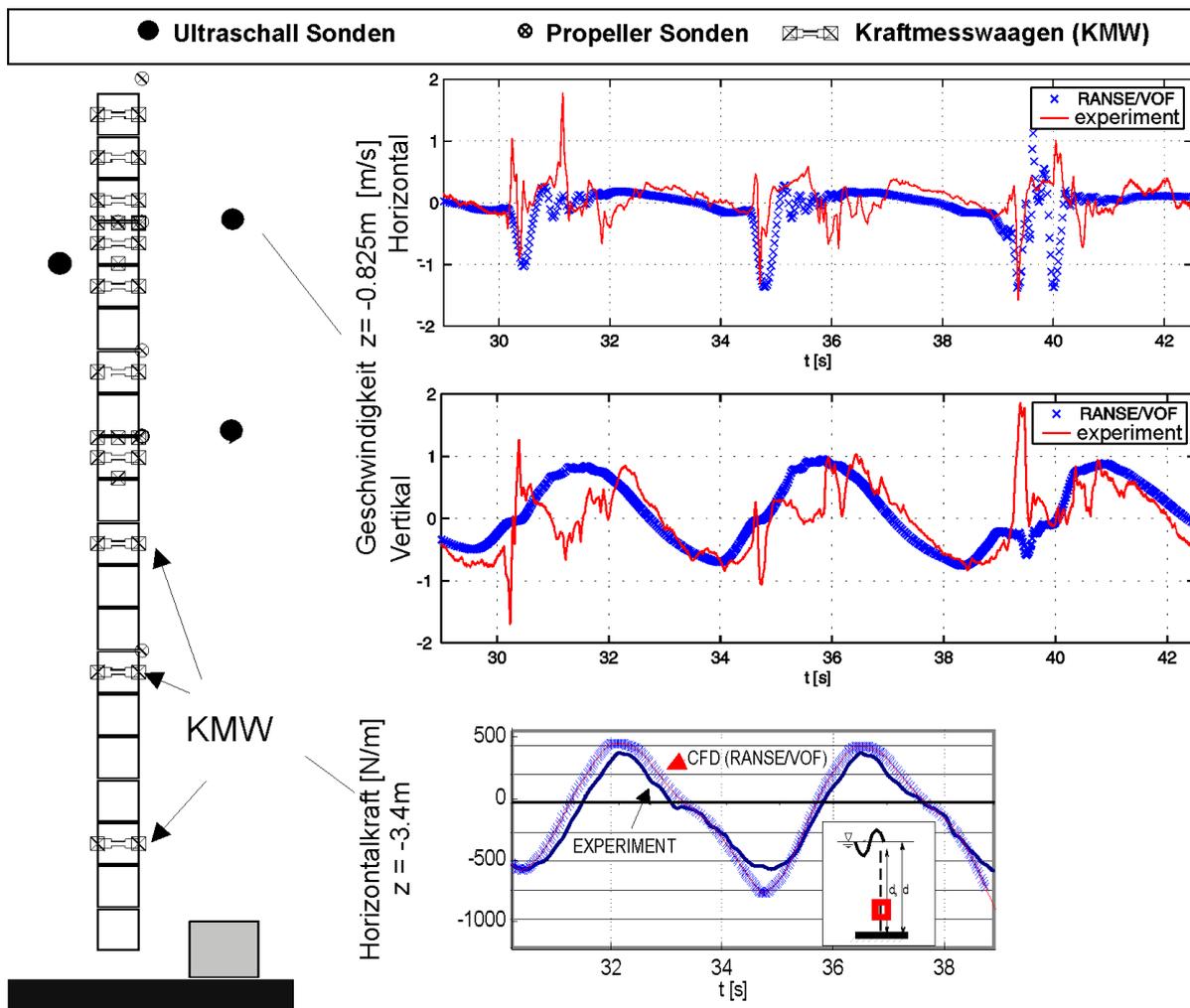


Abb. 5.11: Messung und Berechnung für Geschwindigkeiten und Kräfte im Nahfeld

Der in den Abbildungen dargestellte Vergleich der Pegelstände, Kräfte und Geschwindigkeiten mit Messwerten zeigt eine hervorragende Übereinstimmung. In Abb. 5.10 (oben) ist zu erkennen, dass die verwendete Numerik im Gegensatz zur linearen Wellentheorie in der Lage ist, die nichtlineare Wellenform (Wellenberg/Wellental) der ungestörten Wellen abzubilden. Ebenso kann die nichtlineare Transformation langer Wellen in kurze wiedergegeben werden (Abb. 5.10). Auch der Vergleich von Kräften und Geschwindigkeiten (Abb. 5.11) zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Die numerisch ermittelten instationären Geschwindigkeitsverläufe bieten zudem den Vorteil, dass sie ohne die bei der Ultraschallmessung auftretenden „peaks“ auskommen, die auf „Störkörper“ in der Strömung zurückzuführen sind. Die Übereinstimmung aller gemessenen Größen belegt die hohe Qualität der nichtlinearen numerischen Methode. Dabei ist hervorzuheben, dass im Gegensatz zu potentialtheoretischen Verfahren keine empirischen Beiwerte für das Bauwerk benötigt werden. Abgesehen von der exakten Geometrie des Versuchsaufbaus sind daher keine spezifischen Daten der Wand oder eine gesonderte Kalibrierung der Numerik notwendig. Wie im Abschnitt „Gittergenerierung“ erwähnt, ist allerdings ein besonderes Augenmerk auf die Mindestanzahl der verwendeten Zellen zu lenken. Ansonsten kann die sogenannte „Numerische Diffusion“ die Ergebnisse verfälschen. Eine Initialrechnung (Abb. 5.10) ist daher – ähnlich wie in der Versuchstechnik – vor jeder neuen Untersuchung zu empfehlen.

6 Lokale nichtlineare Strömungsphänomene

Die durchgeführte Validierung verdeutlicht die Qualität der numerischen Methode. Auf dieser Grundlage lässt sich das Verfahren für vielfältige Analysezwecke einsetzen.

Die Auswirkungen eines Filtersystems auf das Fernfeld und damit die Ermittlung globaler Kennwerte wie Transmission und Reflexion können mit der numerischen Methode ebenso ermittelt werden wie lokale nichtlineare Strömungsphänomene. Aus Gründen der hohen Rechenzeit wurden in dieser Arbeit die globalen Kennwerte, für die eine Vielzahl von Versuchen notwendig ist, noch vorwiegend experimentell ermittelt. Nimmt man jedoch hohe Rechenzeiten in Kauf, ist das vorgestellte vollständig nichtlineare numerische Modell in der Lage, einen Wellenzug auf seinem gesamten Weg durch den Wellenkanal zu berechnen und auf diese Weise einen vertieften Einblick in das Systemverhalten zu geben.

In Abb. 6.1 ist eine solche Berechnung für einen Wellenzug in Interaktion mit einem getauchten Filter anhand des berechneten Geschwindigkeitsfeldes zu verschiedenen Zeitpunkten zu sehen. Oben im Bild hat der Wellenzug den Unterwasser-Filter noch nicht erreicht, die blauen (dunklen) Farben belegen, dass dort die resultierende Geschwindigkeit gleich Null ist. Im nächsten dargestellten Zeitpunkt erreicht der Wellenzug den Filter und wird teils reflektiert, teils transmittiert. Dadurch entsteht vor dem Filter eine Überlagerung von einlaufender und reflektierter Welle. Die hohen Geschwindigkeiten (rot, gelb/hell) über der Struktur weisen auf Dissipation am Filter hin. Nach der Interaktion bewegen sich die in der Wellenhöhe deutlich reduzierten Anteile des transmittierten und reflektierten Wellenzugs vom Filter weg.

Aus bereits erläuterten Gründen wird die Numerik dazu benutzt, einen vertieften Einblick in das Systemverhalten zu geben. Das Verfahren eignet sich hervorragend zur detaillierten Analyse von Strömungsvorgängen im Nahfeld der Filter. Neben der Ermittlung von instationären Felddaten für Geschwindigkeit und Druck in der Umgebung des Filters ist es auch möglich, den Übergang des gestörten Nahfeldes in das ungestörte Fernfeld zu analysieren. Da in dem nichtlinearen numerischen Verfahren die Viskosität des Mediums berücksichtigt wird, können die Reibungsverluste im System berechnet werden. Dies ermöglicht erstmalig, Dissipationsprozesse an getauchten Strukturen im Detail zu untersuchen. Als erster Schritt in diese Richtung werden daher am Ende dieses Kapitels die Energieverluste am getauchten Einzelfilter abgeschätzt, die sich unter Vernachlässigung von Schallentwicklung und Sedimenttransport aus dem Druckverlust am Bauwerk, dem Reibungsverlust am Bauwerk, dem Reibungsverlust durch großskalige Wirbelbildung und dem Energieverlust durch Turbulenz zusammensetzen.

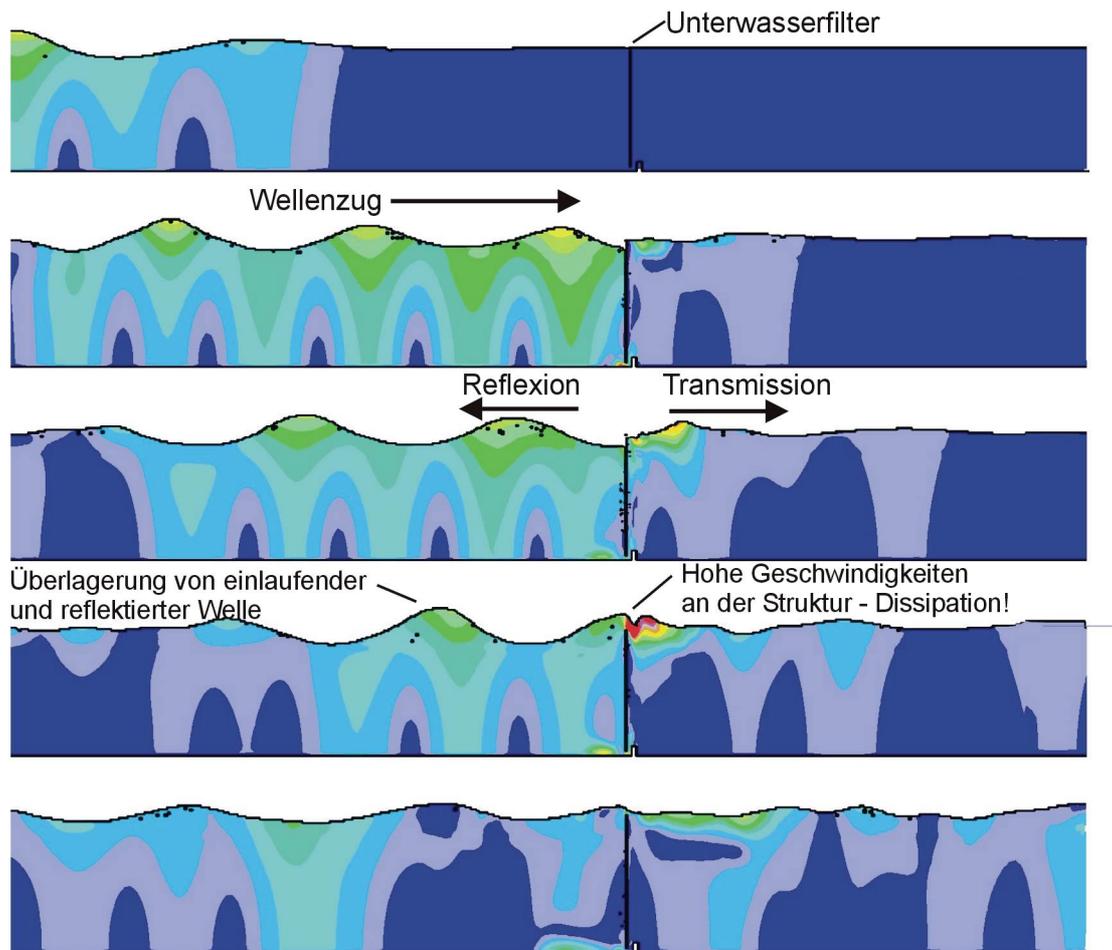


Abb. 6.1: Numerische Simulation: Transmission und Reflexion eines Wellenzuges

Die numerische Berechnung erlaubt, neben den durch die Messung erfassten Größen (Pegel, Einzelkräfte, lokale Geschwindigkeiten) auch instationäre Geschwindigkeitsfelder in Strukturnähe zu bestimmen. Darstellung und Analyse dieser Geschwindigkeitsfelder erfolgt am Beispiel einer getauchten Wand (Abb. 6.2) und im Nahfeld eines 11% Einzelfilters (Abb. 6.3 und Abb. 6.4). Einen Einblick in die Strömungsverhältnisse in Spaltnähe und den Vergleich mit Messwerten gibt Abb. 6.5. Die numerische Methode ermöglicht des weiteren eine Abschätzung der dissipativen Energieanteile durch Wirbelbildung und Turbulenz, die anschließend erläutert wird.

6.1 Übergang vom gestörten Nahfeld zum Fernfeld

Für Analysen im Fernfeld (auch messtechnisch) ist von Bedeutung, ab welchem Punkt das durch die Struktur gestörte Nahfeld mit Wirbelbildung und Turbulenzerscheinungen wieder in eine „geordnete“ Welle ohne diese Phänomene übergeht. Abb. 6.2 zeigt die Entstehung eines Wirbels in Wandnähe, der sich mit der Welle von der Struktur entfernt und schließlich auflöst. Die Simulation macht deutlich, dass dieser Prozess innerhalb des Weges von ca. einer viertel Wellenlänge abgeschlossen ist. Unter Berücksichtigung der Turbulenzbewegungen an der Wellenoberfläche, die noch etwas weiter reichen ist insgesamt festzustellen, dass für alle untersuchten Strukturen das gestörte Nahfeld spätestens nach einer halben Wellenlänge – bezogen auf die initiale ungestörte Welle – abgeklungen ist und in eine „geordnete“ Welle ohne Verwirbelungen und Turbulenzen übergegangen ist.

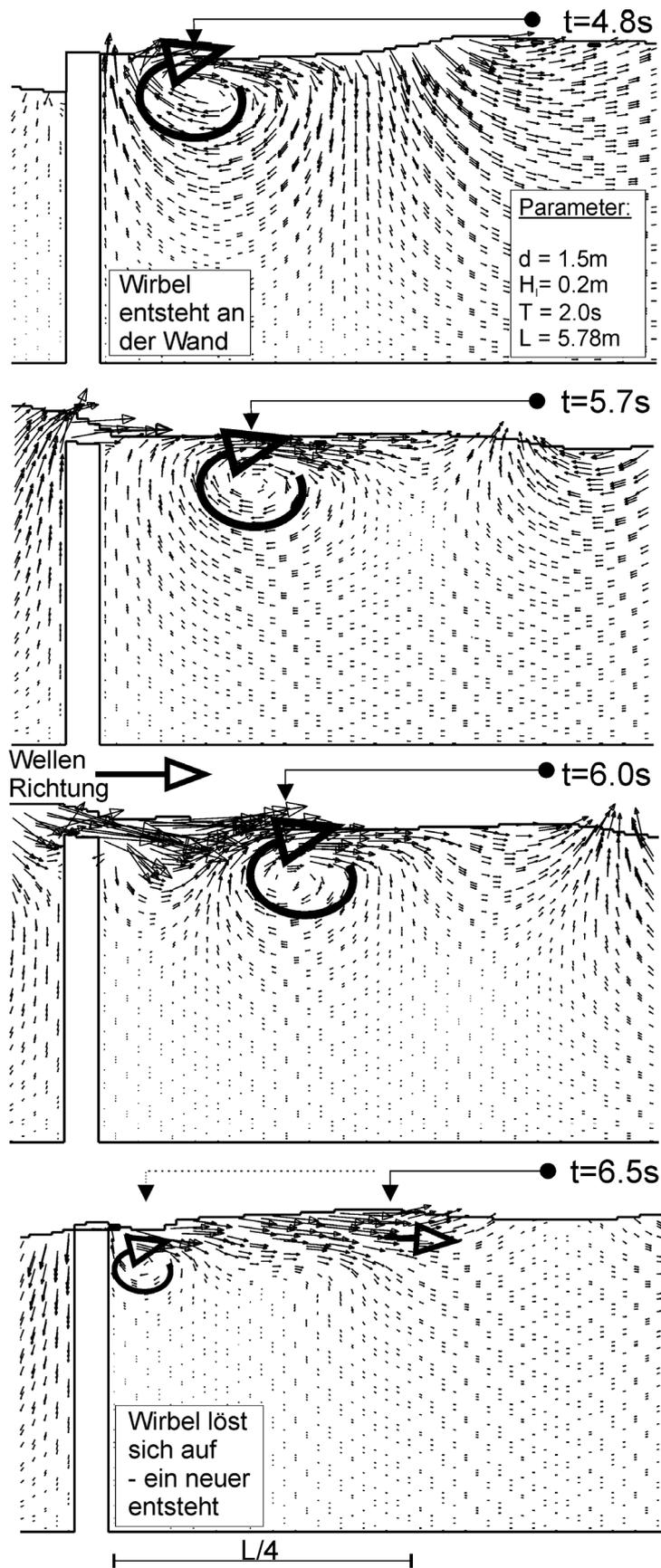


Abb. 6.2: Wirbelbildung im Nahfeld hinter einer getauchten Wand

6.2 Nahfeld: Strömung um einen durchlässigen Filter

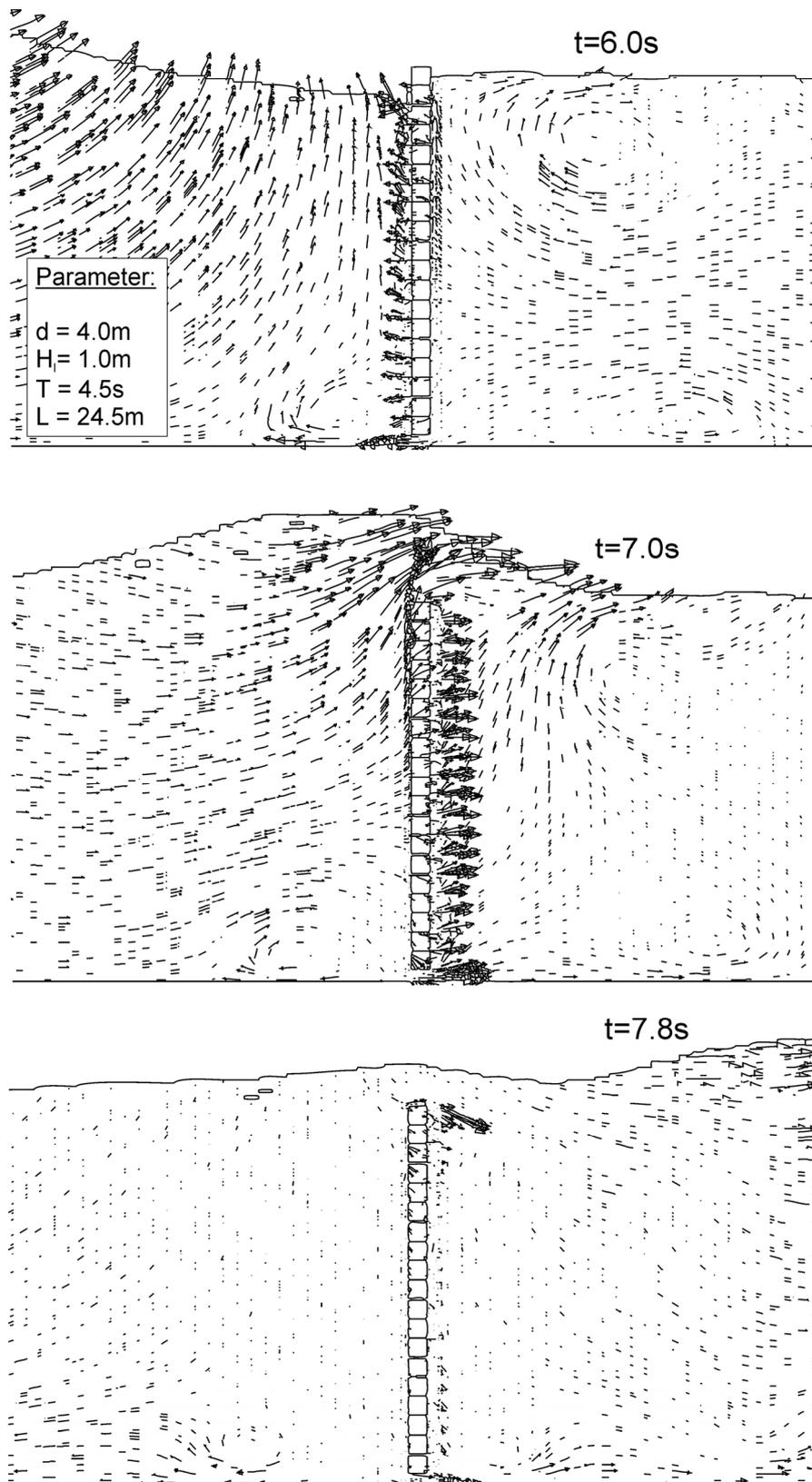


Abb. 6.3: Filter ($P=11\%$): Geschwindigkeitsvektoren zu drei Zeitpunkten

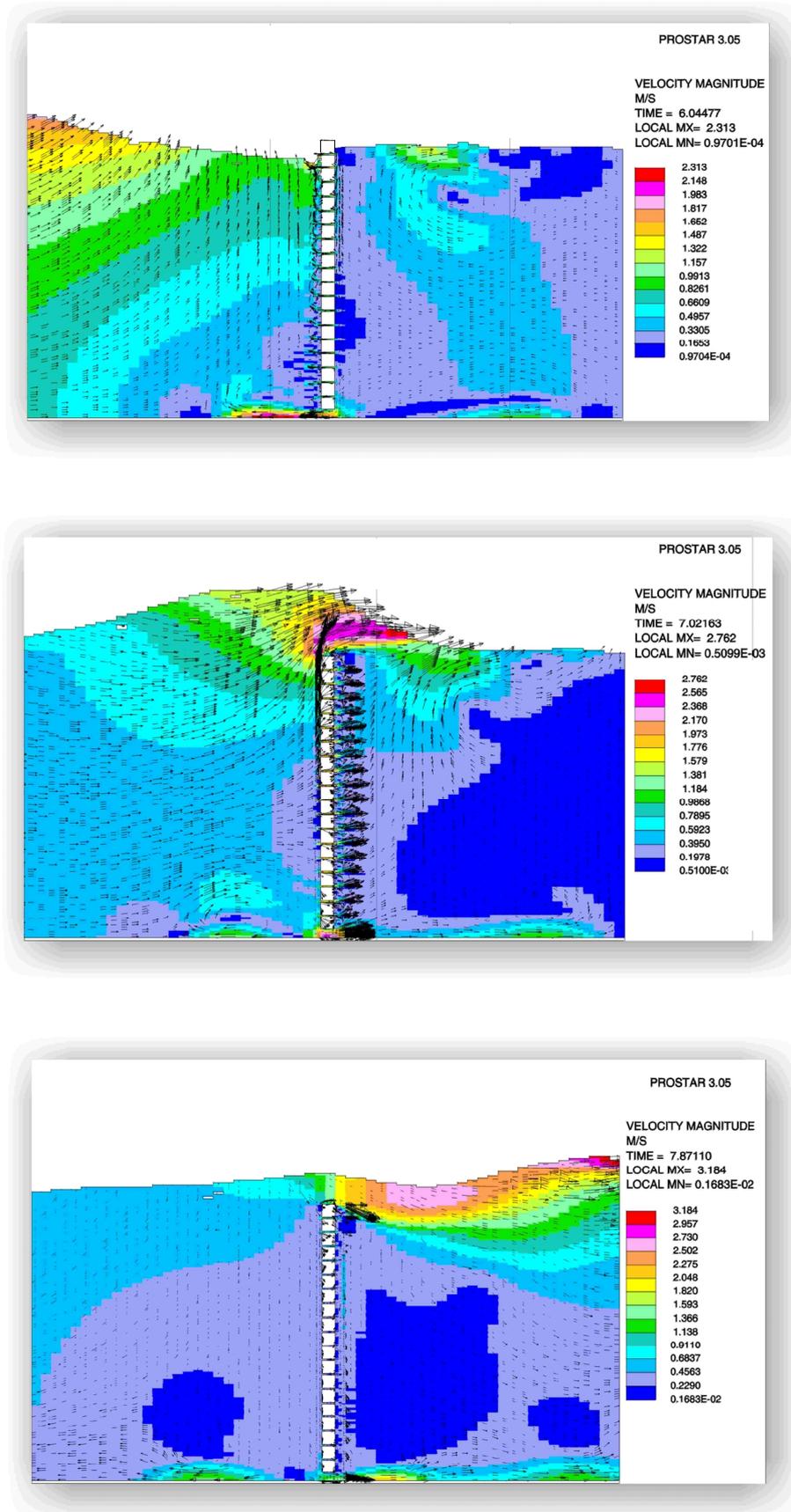


Abb. 6.4: Filter (P=11%): Geschwindigkeitsbetrag und –vektoren zu drei Zeitpunkten

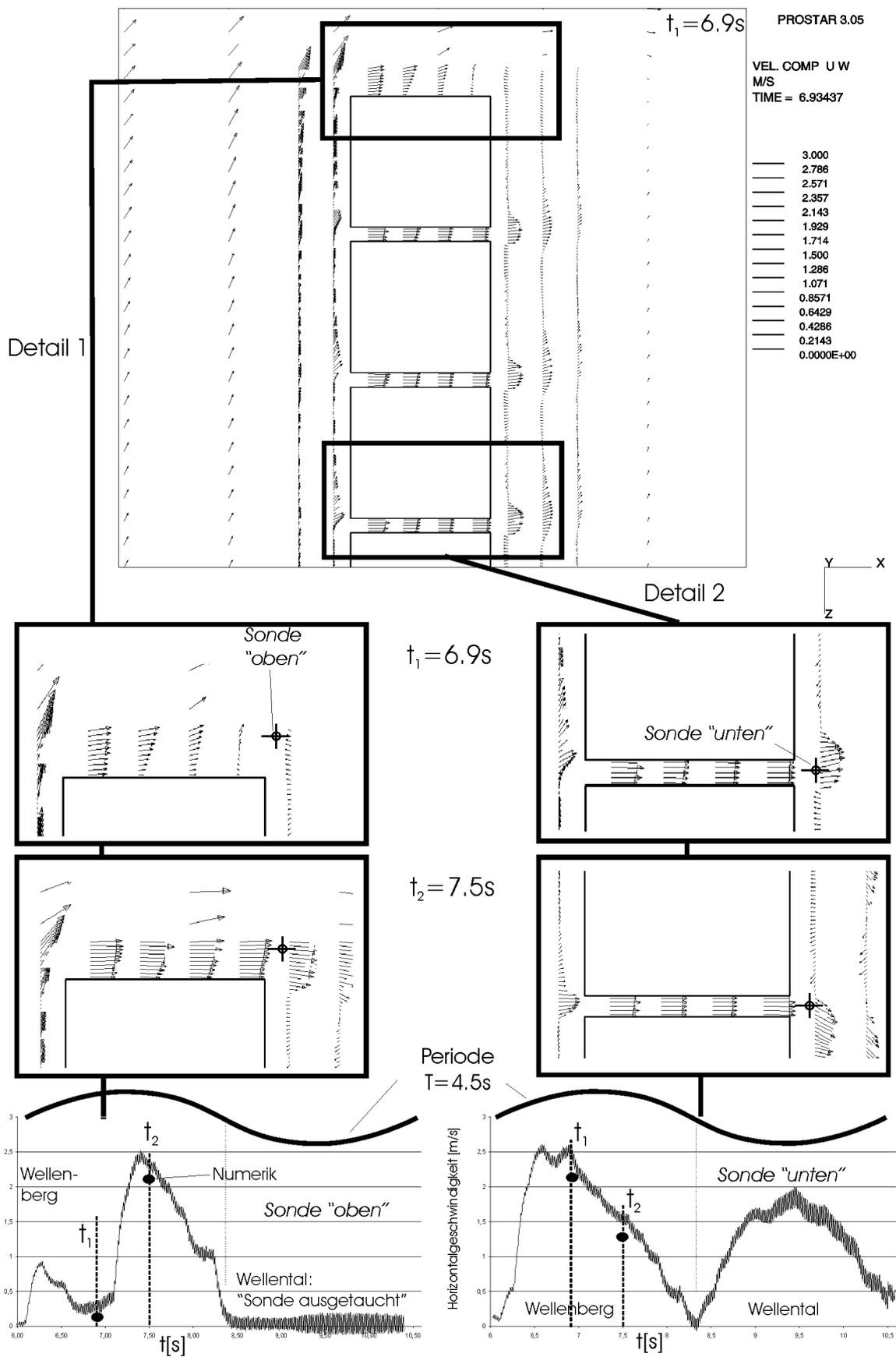


Abb. 6.5: Messung und Berechnung der Geschwindigkeiten im Nahfeld des 11% Filters

Die Bilder in Abb. 6.3 und Abb. 6.4 zeigen die berechnete Interaktion eines regulären Wellenzugs ($H_f=1.25\text{m}$, $T=4.5\text{s}$, $d=4\text{m}$) mit einem 11% Einzelfilter. Zum Zeitpunkt $t=6.0\text{s}$ befindet sich das Wellental an der Struktur, wobei ein Teil des Filters die freie Wasseroberfläche durchstößt. Hinter dem Filter kann eine Rück-Zirkulation des Wassers beobachtet werden, da der Rückfluss durch den Filter aufgrund seiner geringen Porosität eingeschränkt ist. Zum Zeitpunkt $t=7.0\text{s}$ hat der Wellenberg den Filter erreicht. Ein Teil des Fluids strömt durch den Filter, andere Teile überströmen ihn. Bemerkenswert ist, dass am Boden in einem 0.09m großen Spalt zwischen Filter und Kanal sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Zum Zeitpunkt $t=7.8\text{s}$ hat der Wellenberg bereits den Filter passiert: Die transmittierte Welle ist eindeutig niedriger und nichtlineare Effekte, wie z.B. die Überlagerung der Fundamentalwelle durch hochfrequente Anteile, können beobachtet werden.

Aufgrund der unstrukturierten Gittergenerierung ist eine noch detailliertere Ansicht der Strömungsprozesse an den einzelnen Filterkomponenten und ein Vergleich mit Geschwindigkeitsmessungen möglich. Abb. 6.5 zeigt das Strömungsfeld zum Zeitpunkt $t=6.9\text{s}$ und $t=7.5\text{s}$ im Vergleich mit Messdaten. Dabei ist zu beachten, dass die hierfür eingesetzten Geschwindigkeitssonden nur den Betrag der Horizontalgeschwindigkeit anzeigen, d.h. auch eine Rückströmung wird positiv angezeigt.

- Die untere Geschwindigkeitssonde zwischen zwei Filterkomponenten (Abb. 6.5– rechte Seite unten) registriert ansteigende Geschwindigkeiten, sobald Wellenberg und -tal den Filter erreichen.
- Die Geschwindigkeitssonde kurz über der obersten Filterkomponente (Abb. 6.5– linke Seite unten) registriert einen leichten Anstieg der Geschwindigkeit, während der Wellenberg ankommt. Aufgrund von Rückströmung und Strömungsabriss fällt die Geschwindigkeit allerdings stark ab. Kurz nach diesem Rückgang steigt die Horizontalkomponente der Geschwindigkeit wieder an und erreicht ihre Spitzenwerte während der Wellenberg den Filter passiert: In dieser Phase verläuft die Strömung horizontal entlang der obersten Filterkomponente und erreicht ihre höchsten Werte. Sobald das Wellental den Filter erreicht, befindet sich das oberste Element außerhalb des Wassers - es werden keine Geschwindigkeiten mehr registriert.

Die durchgeführten Berechnungen liefern neben dem kompletten Strömungsfeld auch Erkenntnisse über die instationären Vorgänge am Einzelfilter. Diese Erkenntnisse (z.B. hohe Geschwindigkeiten am Boden, Strömungsabriss am obersten Element) helfen beim Entwurf optimaler Filtersysteme.

6.3 Dissipative Prozesse am Filter

Bei der Interaktion zwischen Welle und Struktur teilt sich die Wellenenergie in Transmission, Reflexion und Dissipation. Die meisten messtechnischen Analysen beschränken sich auf die Bestimmung dieser Anteile durch die Erfassung der einlaufenden, der reflektierten sowie der transmittierten Wellenhöhe vor und nach dem Bauwerk. Die Energieanteile werden dann proportional zum Quadrat der Wellenhöhe bestimmt. Diese Vorgehensweise besitzt auch für die Bestimmung der globalen Parameter ihre Gültigkeit und wird in dieser Arbeit bei der experimentellen Analyse angewandt.

Die numerische Simulation erlaubt einen Einblick in die Wechselwirkung zwischen Welle und Struktur, insbesondere die Energiedissipation am Bauwerk. Der Energieanteil, der dissipiert, wandelt sich in Wärme, Schall, Sedimenttransport und Turbulenz.

Durch eine gezielte Analyse lassen sich unter Vernachlässigung von Schall und Sedimenttransport Aussagen über die einzelnen dissipativen Anteile der Wellenenergie treffen.

Diese setzen sich vorwiegend zusammen aus

- Druckverlust am Bauwerk,
- Reibungsverlust am Bauwerk,
- Reibungsverlust durch Wirbelbildung und
- Energieverlust durch Turbulenzbildung

Am Beispiel eines getauchten Filters wird die Abschätzung von Verlustanteilen demonstriert, die messtechnisch nur mit größtem Aufwand oder lediglich indirekt bestimmt werden können. Der größte Verlust der transmittierten Wellenenergie entsteht durch den Widerstand direkt am Bauwerk, der sich aus dem geschwindigkeitsabhängigen Druckverlust und der beschleunigungsabhängigen virtuellen Massenkraft zusammensetzt. Diese Widerstandskraft kann numerisch durch Druckintegration am Bauwerk bestimmt werden. Sie ist auch mit messtechnischen Methoden durch direkte Kraftmessung erfassbar. Im folgenden werden die Verlustanteile für Reibung am Bauwerk, Reibung durch Wirbelbildung und Turbulenzbildung abgeschätzt, die in vielen Analysen vernachlässigt werden.

Für die Reibungsverluste, die am Bauwerk entstehen, ergeben die numerischen Analysen einen Wert im Promille-Bereich. Dies rechtfertigt eine Vernachlässigung dieser Anteile. In Bauwerksnähe entstehen zusätzliche *Reibungsverluste durch großskalige Wirbelbildung* (Abb. 6.6).

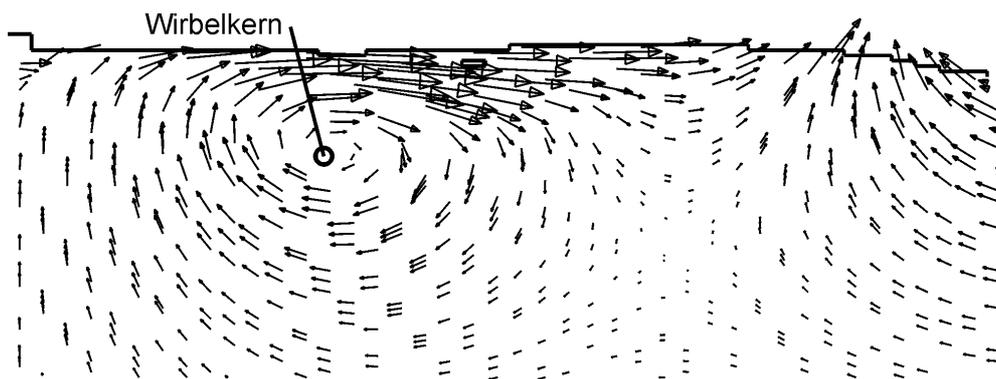


Abb. 6.6: Wirbel hinter der Struktur

Der Wirbel entsteht durch die Interaktion der Welle mit der Struktur, trennt sich vom Bauwerk und löst sich auf (Abb. 6.2). Die Wirbelstärke Ω lässt sich zu einem Zeitpunkt t aus der Rotation der durch die numerische Simulation bekannten Strömungsgeschwindigkeit ($\text{rot } \underline{v}$) bestimmen.

$$\Omega = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6.1)$$

Ist die Wirbelstärke bekannt, schlagen *Hino* und *Yamazaki* (1971) folgende Formel zur Abschätzung des Energieverlustes durch Wirbelbildung vor:

$$E_v = \frac{1}{16} \pi \rho \Omega^2 r_k^4 \left(1 + 4 \ln \frac{\zeta_a}{r_k} \right) \quad \text{mit Energieverlust } E_v \text{ und Wirbelkernradius } r_k \quad (6.2)$$

Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass sich der Wirbel wie ein idealer *Hamel-Oseen*-Wirbel verhält. Mit diesem Verfahren schätzt *Pereira* (1996) mit einem optischen Messverfahren den Energieverlust durch Wirbelbildung hinter einer Stufe ab und erhält Verlustwerte für die kleinmaßstäblichen Versuche ($H_{\max}=4,3\text{cm}$) in der Größenordnung von 3 – 6% der initialen Wellenenergie. In dem hier verwendeten Beispielfall des getauchten Filters (MWK, $H_f=0,2\text{m}$, $T=2\text{s}$) erweist sich die Anwendung dieses Verfahrens jedoch als kritisch. Die Wirbelstärke Ω lässt sich numerisch exakt bestimmen. Der Wirbelkernradius r_k geht in die Formel mit der 4. Potenz ein. Aufgrund der elliptischen Form des entstandenen Wirbels lässt sich dessen Kernradius selbst bei sorgfältiger Vorgehensweise nur ungenau bestimmen, weshalb sich hohe Abweichungen in der Auswertung ergeben. Die Werte für den Energieverlust liegen je nach gewähltem Radius r_k in einem Bereich von ca. 1% bis 15% der initialen Wellenenergie. Daher wird der Energieverlust in einem ausgewählten Kontrollvolumen um den Wirbel bestimmt, der sich aus der Differenz zwischen der kinetischen Energie des Wirbels und der verbleibenden kinetischen Energie nach Auflösung des Wirbels ergibt. Für den ausgewählten Beispielfall (MWK, $H_f=0,2\text{m}$, $T=2\text{s}$) ergibt sich ein Energieverlust von ca. 3% der initialen Wellenenergie durch Reibung in einem Wirbel hinter dem Bauwerk

Da der Energieverlust überproportional mit dem Wirbelkernradius ansteigt, ist für höhere Wellen mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten, auch ein höherer Verlustanteil zu erwarten. Dies ist eventuell eine Erklärung für die experimentelle Beobachtung, dass im MWK 0,4m hohe Wellen durch getauchte Filter stärker gedämpft werden als 0,2m hohe. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nicht nur durch Wechselwirkung mit dem Wellenberg, sondern auch beim Wellental ein Wirbel an der Struktur entsteht, kann der gesamte Reibungsverlust durch Wirbelbildung auch bei nichtbrechenden Wellen in einer Größenordnung von bis zu 10% abgeschätzt werden.

Obwohl es sich bei den untersuchten Wellen um nichtbrechende Wellen handelt, wird der *Energieverlust durch Turbulenzbildung* abgeschätzt, da bei Experimenten kurz vor und im Nachlauf hinter dem Bauwerk turbulente Wasserbewegungen beobachtet wurden. Die Energieverluste entstehen infolge Geschwindigkeitsschwankungen und der daraus resultierenden Reibung zwischen den Fluidteilchen. Die numerische Simulation wird unter Verwendung eines Turbulenzmodells durchgeführt, das die Darstellung der turbulenten kinetischen Energie zu jedem Zeitpunkt t erlaubt. In Abb. 6.7 ist die Verteilung (Isolinien) dieser Energie nach dem Übergang des Wellenberges über die Struktur dargestellt.

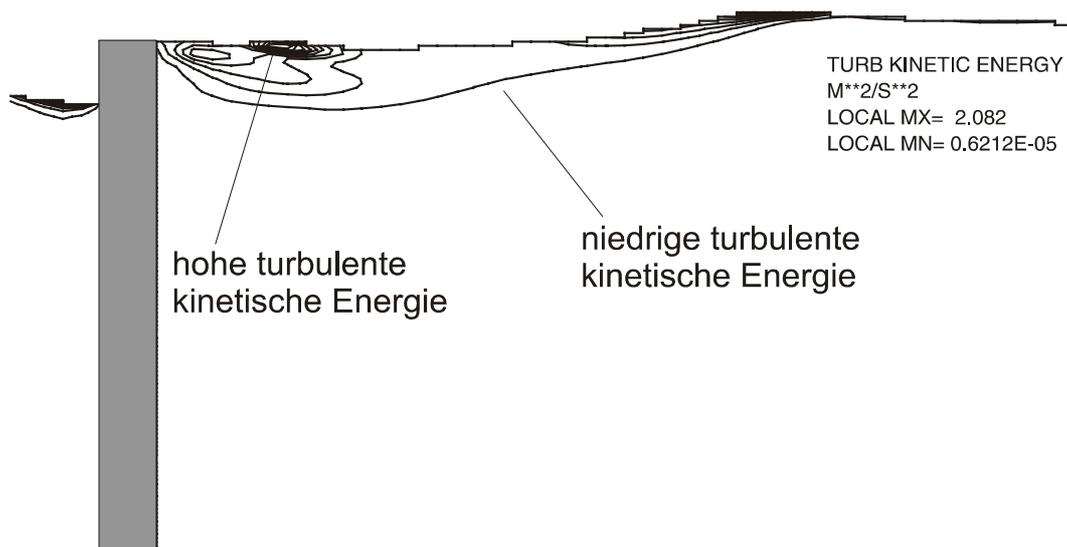


Abb. 6.7: Turbulente kinetische Energie an einer getauchten Wand (MWK)

Es wird deutlich, dass der größte Anteil der turbulenten Energie sich im oberflächennahen Bereich befindet, in dem auch die größten Geschwindigkeiten verzeichnet werden. Gerade in diesem Bereich sind messtechnische Erfassung der Turbulenz und Auswertung sehr schwierig, da eingebrachte Sonden sich während des Messvorganges teilweise in einem Luft/Wasser-Gemisch befinden und zudem aufgrund der Wasserspiegelbewegung zeitweise ganz austauschen. Die Felddarstellung der numerischen Analyse ermöglicht eine Abschätzung der durch Turbulenz auftretenden Energieverluste. Der in Turbulenz umgesetzte Teil der initialen Gesamtenergie der Welle beträgt zum dargestellten Zeitpunkt 0,3%. Berücksichtigt man, dass die Turbulenz wiederum im Wellenberg und Wellental auftritt und mit Wellenhöhe und Maßstab des Wellenkanals zunimmt, kann man den Anteil an der Gesamtenergie für nichtbrechende Wellen mit ca. 2% abschätzen.

Für das gezeigte Beispiel ergeben Wirbelbildung und Turbulenz zusammen einen Anteil von 6,6% an der initialen Wellenenergie, für getauchte Einzelfilter kann daraus ein Anteil von bis zu 12% abgeleitet werden. Setzt man diese Zahl ins Verhältnis zu dem für das obige Beispiel ermittelten Dissipationsanteil von ca. 36%, so ist zu erkennen, dass diese Phänomene einen entscheidenden Anteil am Dissipationsprozess haben. Dominiert wird dieser Prozess allerdings durch den aus dem *Druckwiderstand am Bauwerk* resultierenden Restanteil von fast 30% der initialen Wellenenergie. Dieser ist numerisch nur schwierig direkt aus der lokalen Nahfeldströmung zu bestimmen, da der Gesamtverlust pro Wellenperiode über den gesamten Zeitbereich integriert werden muss. Auch die ermittelte Kraft am Filterelement kann nicht in direkten Zusammenhang mit dem Druckverlust gesetzt werden, da neben den geschwindigkeitsabhängigen Zähigkeitskräften die virtuellen Massenkräfte einen erheblichen Anteil der Kraft am Filter ausmachen. Daher wird der Druckverlust hier nur indirekt über den Gesamtverlust bestimmt.

Die durchgeführte Abschätzung anhand eines Beispielfilters ersetzt natürlich nicht eine systematische Untersuchung zur Beschreibung der Wirkprinzipien in Abhängigkeit verschiedener Wellenparameter. Sie gibt allerdings einen ersten Einblick und verdeutlicht die Chancen, die durch die Verwendung der numerischen Berechnungsmethode zur Verfügung stehen.

7 Auslegung eines Künstlichen Riffs

Die numerischen und experimentellen Analysen geben einen sehr guten Einblick in die Charakteristik von getauchten Filtern zur Wellendämpfung. Insbesondere die Numerik liefert fundamentale Daten für die lokalen Transportprozesse und nichtlinearen Effekte. So lassen sich neue Erkenntnisse bezüglich des Übergangs vom Nahfeld ins Fernfeld und der Energieverluste am Filter gewinnen. Ausgehend von experimentellen Analysen stehen globale Kennwerte und ein semi-empirisches Modell zur Bauwerksauslegung zur Verfügung.

Anhand der erzielten Kenntnisse lässt sich der Entwurf eines optimalen Künstlichen Riffs für ein vorgegebenes Ziel und gegebene Randbedingungen durchführen

Ziel:

Eine für den Küstenschutz relevante Zieldefinition für Künstliche Riffe könnte lauten:

„Größtmögliche Dissipation bei Reduktion der Transmission auf ein vorgegebenes, für den Strand unschädliches, Minimum“

Zusätzlich können Nebenziele definiert werden. So könnte beispielsweise die Verwendung einer hohen Anzahl von Einzelfiltern bzw. zu große Baulängen unerwünscht sein, da dadurch die Baukosten stark ansteigen. Diese Nebenziele können durch Definition geeigneter Randbedingungen realisiert werden.

Randbedingungen:

Die Randbedingungen berücksichtigen von außen vorgegebene Beschränkungen, die nicht überschritten werden dürfen. Dies sind z.B.:

- die maximale Bauhöhe des Filtersystems ($d_s/d < 1$, um vom Strand unsichtbar zu bleiben)
- die maximale Baulänge des Gesamtsystems
- die maximale Anzahl von Einzelfilterelementen
- die minimale Porosität für Einzelfilterelemente

Variablen:

Folgende Variablen beeinflussen die Transmissions- und Reflexionscharakteristik:

- Wassertiefe d
- Anzahl der Filterelemente n
- Relative Bauhöhe der Einzelfilter $d_s(n)/d$
- Porosität der Einzelfilter P
- Abstand zwischen zwei Filterelementen b_K [m]
- (Signifikante) Wellenhöhe des einlaufenden Seegangs H
- (Peak) Periode T_P des einlaufenden Seegangs. Die Wellenlänge L ergibt sich mit bekannter Wassertiefe aus der Dispersionsgleichung

7.1 Entwurfskriterien

Aufgabe des Entwurfs ist es, ein optimales Bauwerk bezüglich verschiedener, teilweise konträrer Forderungen und Zielvorstellungen zu entwickeln. Die gestellten Anforderungen lassen sich aus verschiedenen Bereichen definieren.

- Küstenschutz: Erosion und Schädigung des Strands muss verhindert werden.
- Tourismus: Die Sicht auf das offene Meer und die Wellen sollen erhalten bleiben.
- Seeverkehr: Das Bauwerk darf vorbeifahrende Schiffe, Segler, Surfer etc. nicht gefährden.
- Ökologie: Das Ökosystem „Strand“ darf nicht zerstört werden.
- Ökonomie: Bauwerkskosten müssen in einem akzeptablen Verhältnis zum Nutzen stehen.

Der Einsatz von getauchten Filtersystemen bietet die Chance, diese Kriterien zu erfüllen. Aufbauend auf den vorangegangenen Analysen lassen sich die wichtigsten Entwurfskriterien für das Bauwerk charakterisieren. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf Einzelfilter sind die Porosität P des Bauwerks und die relative Bauwerkshöhe d_s/d . Die Untersuchungen belegen, dass getauchte Einzelfilter mit einer Porosität größer 30% aufgrund ihrer geringen Dämpfungseigenschaften für den Küstenschutz nicht zu empfehlen sind. Aus mehreren Filtern zusammengesetzte Unterwasser-Filtersysteme weisen gegenüber Einzelfiltern eine bessere Reduktion der Transmission und insbesondere der Reflexion auf. Dies führt bei optimierten Systemen mit geeignetem Kammerabstand ($b/L = 1/4$) zu Dissipationsanteilen von über 80%. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Forderungen an das Künstliche Riff ergeben sich folgende Kriterien für die einzelnen Bauwerksparameter:

- *Bauhöhe des Filtersystems* :
Die relative Bauhöhe d_s/d bei Ruhewasserspiegel sollte < 1 sein, um vom Strand aus unsichtbar zu bleiben und > 0.9 um eine effektive Wellendämpfung – auch bei Sturm und etwas erhöhtem Wasserstand - zu gewährleisten.
- *Porosität der Unterwasser-Filter*:
Die Analysen belegen, dass mit Porositäten zwischen 0% und 20% zufriedenstellende Dämpfungseigenschaften erzielt werden. Um den Wasseraustausch und eventuell Sedimenttransport zu ermöglichen, ist in der Praxis eine Mindestporosität von 5% zu empfehlen, die möglichst auf eine bzw. wenige Öffnungen verteilt ist. Damit wird die Gefahr von Verschmutzung und Verstopfung minimiert.
- *Abstand zwischen zwei Filterelementen b_K [m]* :
Der Abstand zwischen den Filterelementen sollte insbesondere beim Einkammersystem zu $b_K = 1/4 L$ gewählt werden, um geringe Reflexions- und hohe Dissipationswerte zu erzielen.
- *Anzahl von Einzelfilterelementen*:
Aus hydrodynamischen Gesichtspunkten ist theoretisch eine nahezu beliebige Anzahl von Filtern möglich, die mit einem Abstand von ca. $1/4 L$ angeordnet werden können. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist jedoch ein Filtersystem aus zwei bis maximal vier Einzelfiltern zu bevorzugen. Schon mit einem System, das aus zwei Einzelfiltern besteht (EF 5% und EF 11%), konnten zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.
- *Baulänge des Gesamtsystems, Einsatzwassertiefe, Auslegungswellenhöhe und Länge*
Diese Parameter, insbesondere die Wassertiefe, ergeben sich direkt aus den örtlichen Gegebenheiten. Aus dem Seegangsspektrum vor Ort werden die signifikante Wellenhöhe und die Peak-Wellenperiode ermittelt. Mit diesen Angaben und $b/L = 1/4$ ist auch die Bauwerkslänge bzw. der Abstand der Filterelemente zueinander bestimmt.

Auf der Basis der vorgestellten Entwurfskriterien lässt sich eine konstruktive Gestaltung vornehmen. Bevor auf mögliche Details einer möglichen Konstruktion eingegangen wird, werden Ergebnisse bezüglich der nichtlinearen Transformation von Energieanteilen aus langen Wellen in hochfrequenten Komponenten und der Seegangbelastung getauchter Strukturen vorgestellt, die beim Entwurf zusätzlich berücksichtigt werden müssen.

7.2 Wellentransformation am Riff

Ein Phänomen, das zusätzlich zur Wellendämpfung auftritt ist die Transformation von Energie aus den langen (niederfrequenten) Wellen, die auf das Bauwerk treffen, in kurze (hochfrequente) Wellen. Diese Charakteristik kann in Versuchen und numerischen Berechnungen beobachtet werden. Eine Möglichkeit zur Darstellung dieses Effekts ist die auf Messungen mit Wellenpaketen basierende Fourieranalyse (Kapitel 4). Dort wird die Verschiebung von niederfrequenten Anteilen des Spektrums in den hochfrequenten Bereich sichtbar, aber es bleibt die Frage offen, ob es sich bei den neu entstandenen kurzen Wellen um „gebundene“ oder „freie“ Wellen handelt.

Hierzu ist eine Analyse im Zeitbereich notwendig. Anhand der im vorigen Kapitel erläuterten CFD-Berechnungen für einen Pegel im Nahfeld des getauchten Filters kann der Transmissionsvorgang im Zeitbereich betrachtet werden. Die Analyse ergibt, dass die produzierten kurzen Wellen sich mit geringerer Geschwindigkeit ausbreiten als die ursprünglichen langen Wellen. Es handelt sich eindeutig um sogenannte „freie“ Wellen.

Der Vorgang kann auch experimentell im Zeitbereich betrachtet werden. In Abb. 7.1 sind Zeitschriebe eines regulären Wellenzugs dargestellt, die in Versuchsreihen (KWK) vor und nach getauchten bzw. ausgetauchten Filtern registriert werden. Auf der linken Seite sind die initialen Wellen (ohne Bauwerksinteraktion) dargestellt, auf der rechten Seite die über das jeweilige Bauwerk transmittierten Wellenzüge.

Zunächst ist festzustellen, dass durch den Bauwerkseinfluss bei allen Strukturvarianten die Wellenhöhe deutlich reduziert wird. Bei den getauchten Filtern ist zusätzlich eine Überlagerung des ursprünglichen Wellenzuges mit hochfrequenten Wellen sichtbar. Als Gegenbeispiel wird ein ausgetauchter Filter gezeigt, der nur im unteren Bauwerksdrittel eine einzelne Öffnung besitzt. Hier ist keine signifikante Überlagerung von hochfrequenten Anteilen zu verzeichnen.

Dieses Experiment hilft, den nichtlinearen Entstehungsprozess der kurzen Wellen zu verstehen. Bei getauchten Filtern ändert sich der Transmissionskoeffizient des Bauwerks stark für Wellental und Wellenberg, denn im Wellenberg wird der Filter überspült und die relative Porosität ändert sich entscheidend. Im Gegensatz dazu ist der Koeffizient bei dem hier gezeigten Beispiel eines ausgetauchten Filters quasi konstant, da die Filteröffnung sich unterhalb des Wellentales befindet und dadurch die relative Porosität konstant bleibt.

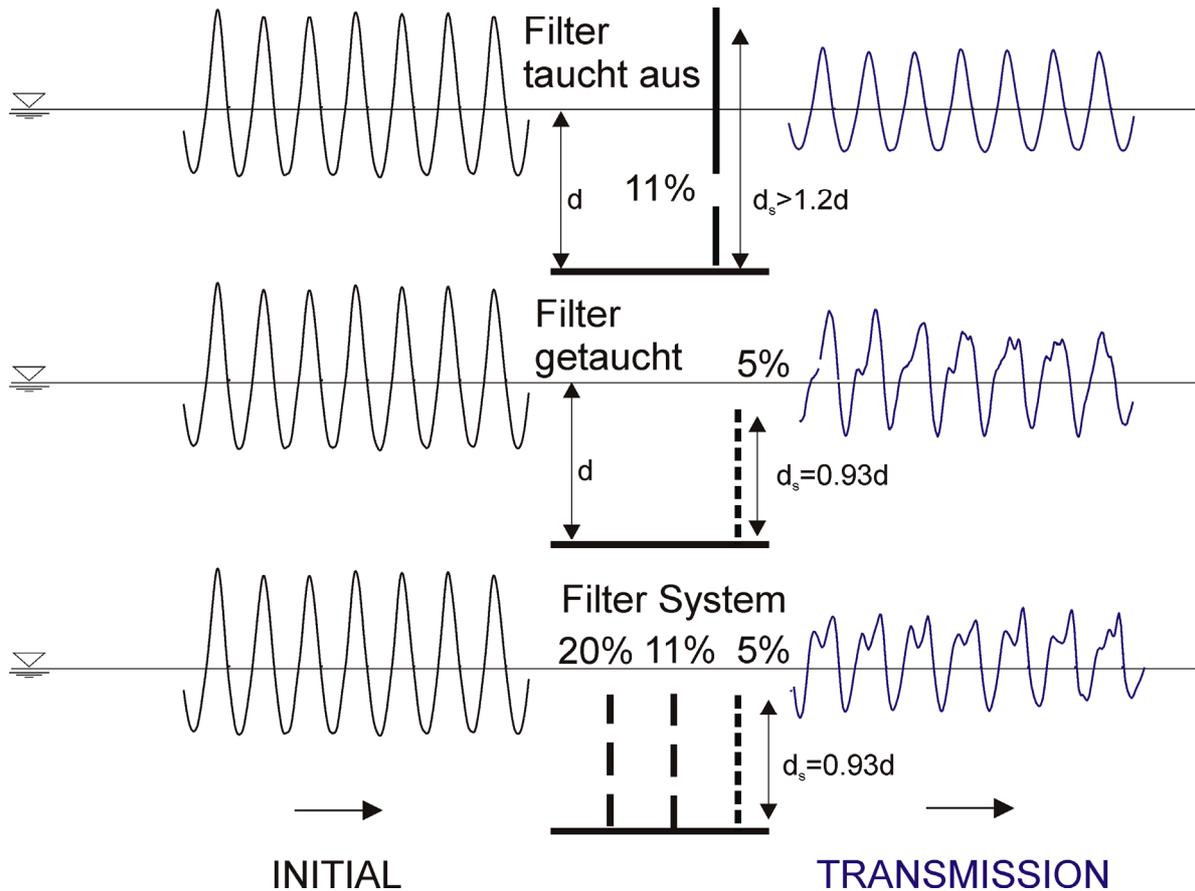


Abb. 7.1: Transformation von Energieanteilen aus „langen“ Wellen in hochfrequente Komponenten an getauchten Strukturen

Diese Eigenschaft zur Transformation von Wellenenergie in den hochfrequenten Bereich ist ein entscheidender Vorteil von getauchten Filtern als Künstliche Riffe im Küstenschutz. Denn diese kurzen Wellen sind vom Strand aus sichtbar (Tourismus) und besitzen eine geringere Zerstörungswirkung als lange Wellen, deren Geschwindigkeitsprofil bis an den Boden reicht und dort zu Sedimenttransport führt.

7.3 Seegangsbelastung des Bauwerks

Ein wirtschaftlicher Entwurf eines „Künstlichen Riffs“ zur Wellendämpfung lässt sich durch optimale Verknüpfung von hydraulischen Eigenschaften und konstruktiver Gestaltung konzipieren. Dazu ist es erforderlich, die Belastung des Systems im Seegang zu kennen. Mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Messprinzip lassen sich die Belastungen der einzelnen Filter an mehreren über die Tiefe verteilten Kraftmesswaagen registrieren.

In Abb. 7.2 ist eine solche Zeitregistrierung (GWK) der Kraft für eine einzelne Filterkomponente in Interaktion mit einem transienten Wellenpaket ($K_p=230\text{m}$, $\zeta_a=1\text{m}$) dargestellt. Dabei werden im Wellenberg Kräfte auf die Komponente positiv und im Wellental negativ aufgetragen. Die auf eine 5m breite Rohrkomponente wirkenden Kräfte erreichen in diesem Beispiel Maximalwerte von ca. 7500N im Wellenberg bzw. -tal.

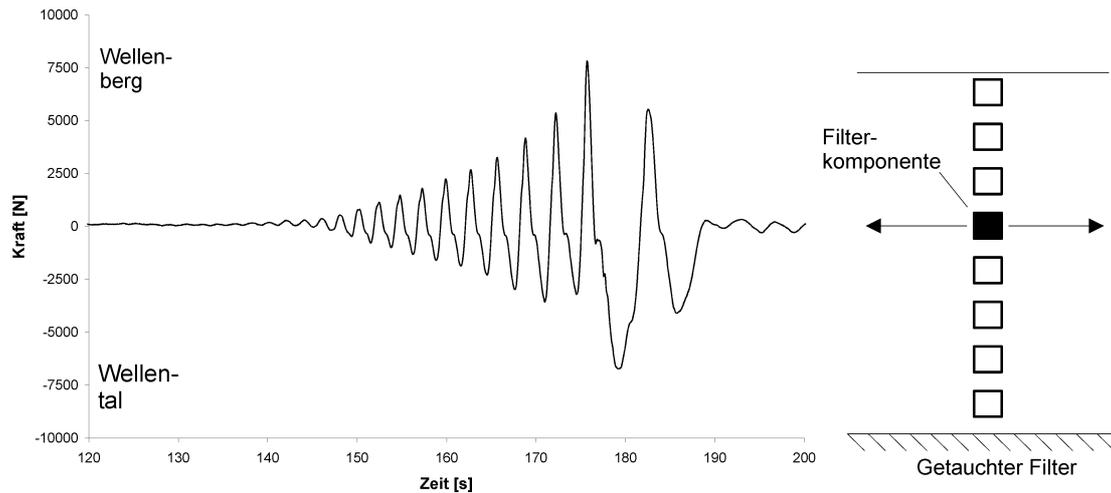


Abb. 7.2: Kraftregistrierung einer einzelnen Filterkomponente für ein Wellenpaket

Um die Kraftverteilung für definierte Zustände zu analysieren, werden zu zwei Zeitpunkten (Wellenberg und -tal) die Kräfte aller Kraftsonden über die Wassertiefe aufgetragen. Aus dieser Kraftverteilung kann dann die resultierende Bauwerkskraft und das wirkende Moment berechnet werden. Der prinzipielle Kraftverlauf ist in Abb. 7.3 für getauchte im Vergleich zu ausgetauchten Strukturen dargestellt. Für beide Systeme nimmt die Belastung des Bauwerks mit zunehmender Wassertiefe ab, wobei die Gesamtbelastung getauchter Strukturen ca. 50 % reduziert gegenüber vergleichbaren ausgetauchten Strukturen ist.

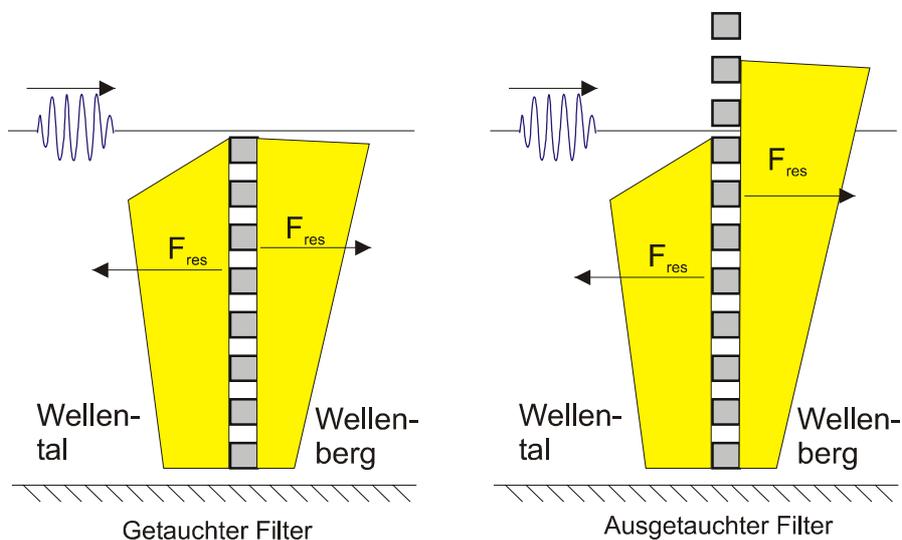


Abb. 7.3: Prinzip des Kraftverlaufs an getauchten und ausgetauchten Filtern

Die größte Belastung tritt selbstverständlich in der Nähe der freien Oberfläche auf. Für getauchte Strukturen wandert der Kraftangriffspunkt der resultierenden Kraft für Wellenberg und -tal nur minimal im Vergleich zu ausgetauchten Strukturen. Dies liegt daran, dass bei ausgetauchten Filtern insbesondere im Wellenberg hohe Belastungen auftreten, die über die Filterkomponenten oberhalb des Ruhewasserspiegels aufgenommen werden. Somit wird bei getauchten Strukturen eine gleichmäßigere Verteilung der Momente im Bauwerksfuß erzielt, die sich günstig auf das dynamische Belastungsverhalten auswirkt. Im folgendem werden Kraftverläufe ausgewählter Filter für die Kanäle MWK und GWK dargestellt.

In Abb. 7.5 sind Ergebnisse der Messungen für einen Einzelfilter ($P=11\%$, MWK) für verschiedene Wellenparameter aufgetragen. Dargestellt sind die maximalen Belastungen im Wellenberg (positive Kräfte) und Wellental (negative Kräfte). Die separaten Kurven stellen die Ergebnisse für verschiedene Bauhöhen d_s der Struktur dar. In beiden Fällen ist zu beobachten, dass sowohl die resultierende Gesamtkraft als auch die Einzelkräfte mit sinkender Bauwerkshöhe abnehmen. Generell nehmen die Einzelkräfte in Richtung Kanalboden ab. Für Bauwerke, die bis nahe an die Wasserlinie ragen, ist ein abweichendes Phänomen zu verzeichnen. Insbesondere im Wellental werden an der Wasseroberfläche geringere Einzelkräfte registriert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Komponenten im Wellental völlig bzw. zum Teil ausgetaucht sind und daher deren Belastungen zurückgehen.

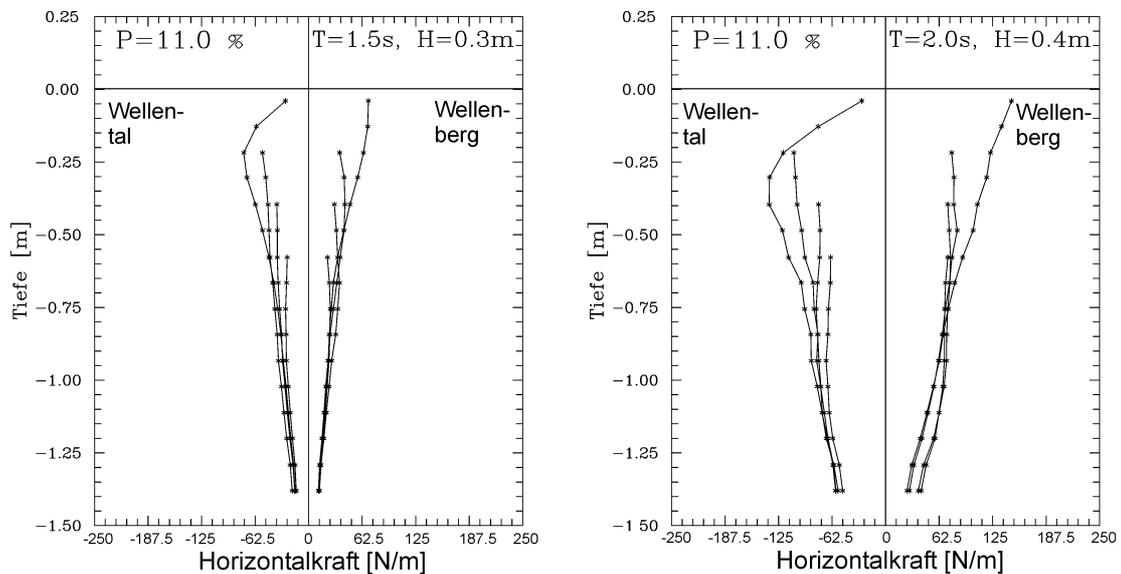


Abb. 7.5: Kräfte auf einen Filter, $P=11\%$ (MWK)

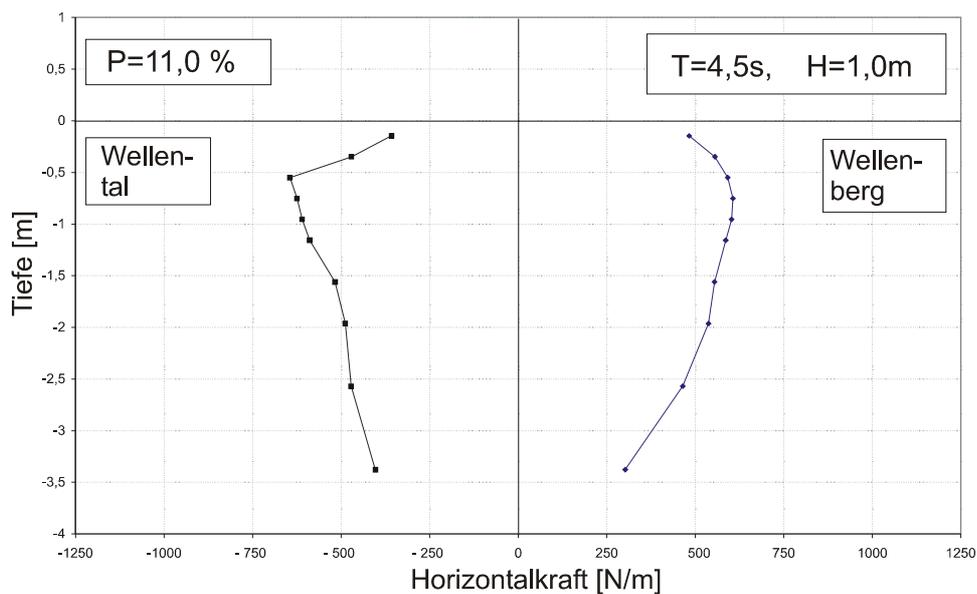


Abb. 7.4: Kräfte auf einen Filter, $P=11\%$ (GWK)

Zum Vergleich ist in Abb. 7.4 der Kraftverlauf für einen vergleichbaren, bis nahe an die Wasserlinie ragenden Einzelfilter ($P=11\%$) im GWK aufgetragen. Der qualitative Verlauf der Kurven ist sehr ähnlich, allerdings werden wesentlich höhere Kräfte registriert.

Für die Auslegung der Struktur ist es von entscheidender Bedeutung, wie groß die maximale Gesamtkraft ist und von welchen Seegangparametern sie abhängt. Um diese Frage zu klären, werden Versuche in Wellenkanälen mit drei unterschiedlichen Maßstäben (KWK, MWK, GWK) in regulärem Seegang durchgeführt und für einen Einzelfilter mit 11% Porosität analysiert. Die Wellenparameter werden für die jeweiligen Kanäle so festgelegt, dass zu verschiedenen Wellenperioden bzw. -längen ($0,1 < d/L < 0,3$) mehrere Wellenhöhen ($0,1 < H/d < 0,33$) untersucht werden. Die maximalen Einzelkräfte auf einen Filter mit 11% Porosität entstehen im Wellental (Abb. 7.4) und werden für die jeweiligen Seegangparameter summiert und auf die Kanalbreite normiert. In Abb. 7.6 sind die maximalen resultierenden Gesamtkräfte über der einlaufenden Wellenhöhe aufgetragen, wobei innerhalb einer Versuchsreihe die Wellenperiode konstant gehalten wird.

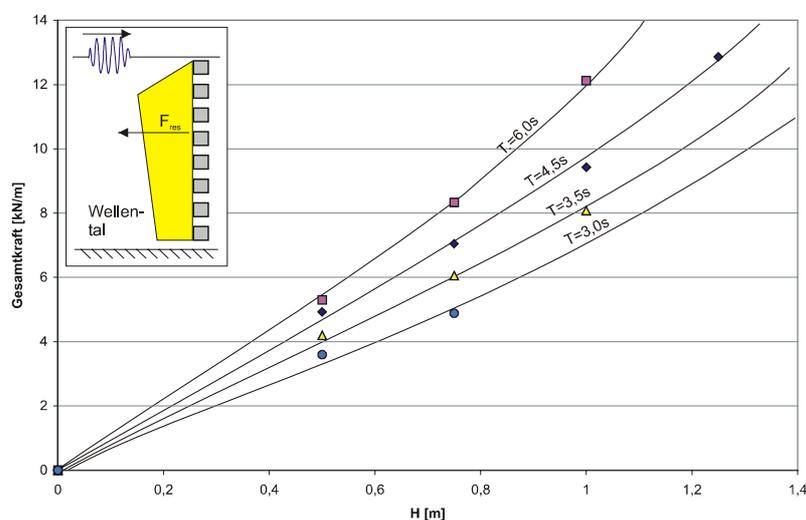


Abb. 7.6: Gesamtkraft als Funktion der Wellenhöhe: Filter, $P=11\%$ (GWK)

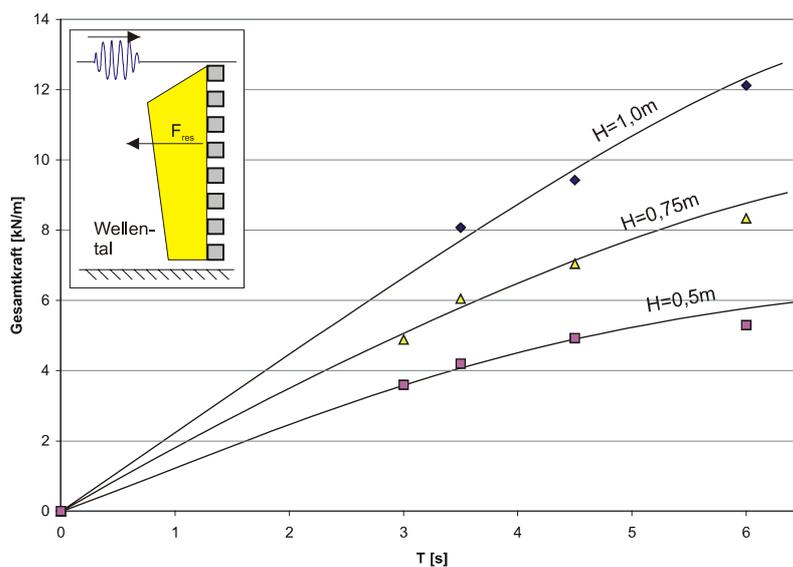


Abb. 7.7: Gesamtkraft als Funktion der Wellenperiode: Filter, $P=11\%$ (GWK)

In Abb. 7.7 ist die Gesamtkraft über der Wellenperiode aufgetragen. Es wird deutlich, dass sowohl Wellenhöhe als auch Wellenperiode einen entscheidenden Einfluss auf die Bauwerksbelastung haben, wobei der Einfluss der Wellenhöhe stärker in Erscheinung tritt.

Bei vorgegebener Wassertiefe kann die Wellenlänge L mittels der Dispersionsgleichung (siehe Kapitel 2) direkt aus der Wellenperiode T berechnet werden. Die Wellenlänge L und die Wellenauslenkung ζ_a ($= \frac{1}{2} H$) sind maßgebend für die Wellenenergie E_{Well} .

$$E_{Well} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 L b_w \text{ [Nm]} \quad \text{mit Breite der Welle } b_w = 1\text{m} \quad (7.1)$$

Im folgenden wird die Abhängigkeit der maximalen Bauwerksbelastung von der Wellenenergie geprüft. Trägt man die gemessenen maximalen Gesamtkräfte der verschiedenen Wellenkanäle über der Wellenenergie auf so ergibt sich der in Abb. 7.8 gezeigte Verlauf. Die Beziehung zwischen der maximalen Bauwerksbelastung F_{res} auf Einzelfilter und der einlaufenden Wellenenergie E_{Well} kann durch folgende Funktion beschrieben werden:

$$F_{res}(E_{Well}) = c_{Filter} \sqrt{E_{Well}}$$

$c_{Filter} = 1,2$ – für Filter mit einer Porosität von 20%
 $c_{Filter} = 1,83$ – für Filter mit einer Porosität von 11%
 $c_{Filter} = 2,5$ – für Filter mit einer Porosität von 5%

(7.2)

Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Messdaten aus den kleineren Wellenkanälen KWK und MWK rechts unten in der Grafik (Abb. 7.8) nochmals vergrößert dargestellt.

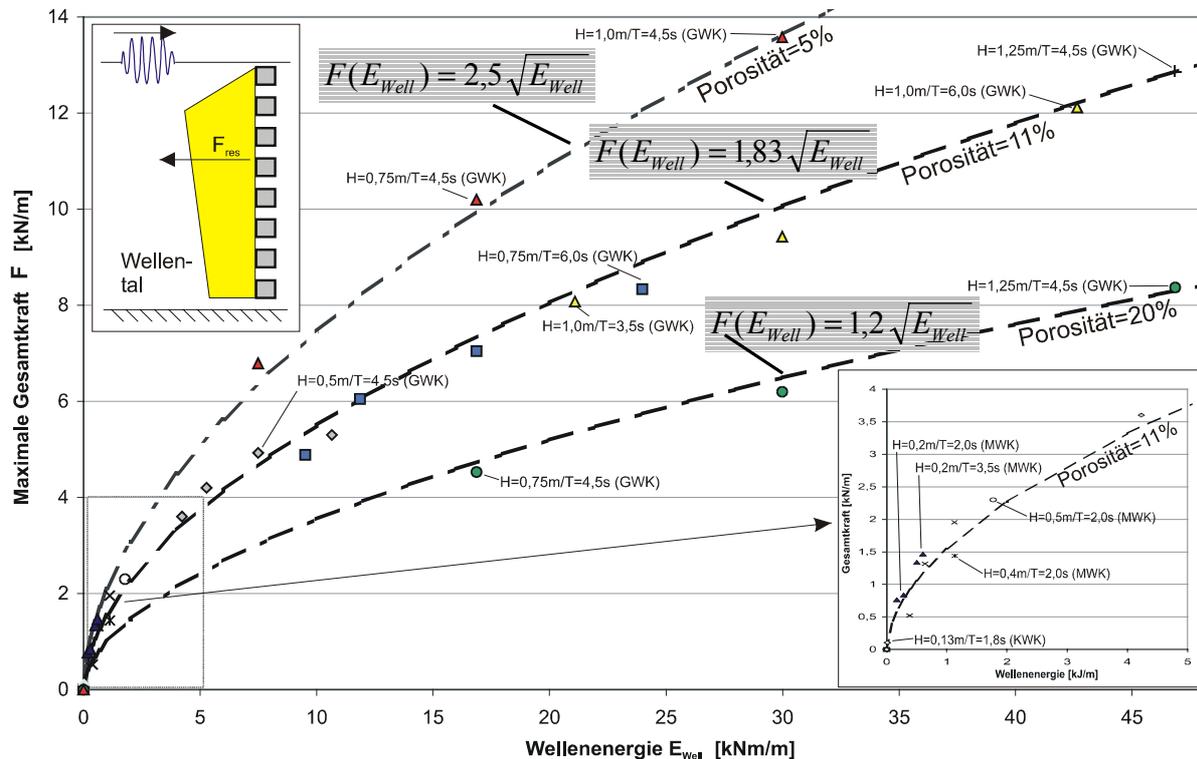


Abb. 7.8: Maximale Gesamtkraft als Funktion der einlaufenden Wellenenergie

Mit Kenntnis der dargestellten Abhängigkeit können die Gesamtkräfte der Filter für den Einsatz im Originalmaßstab, z.B. an der Ostsee abgeschätzt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass sich in diesem Fall aufgrund von viskosen Effekten Abweichungen von der ermittelten Trend-Linie ergeben können.

7.4 Empfehlung eines effektiven Künstlichen Riffs

Die konstruktive und bauliche Auslegung des Riffs muss unter Berücksichtigung der ermittelten Seegangsbelastungen erfolgen. Die in den Versuchsserien angewandte Konstruktions-technik aus Stahl- bzw. Edelstahlelementen ist für die reale Ausführung aus Kostenaspekten undenkbar. Alternativ ist eine Realisierung durch poröse Spuntwände, vorgefertigte Betonelemente oder auch spezielle Kunststoffe denkbar. Die Detailausführung hängt von den örtlichen Gegebenheiten und den Möglichkeiten der ausführenden Baufirma ab. Im Anhang wird ein beispielhafter Entwurf für den Ostseeraum gegeben. In Abb. 7.9 wird eine konstruktive Gestaltung vorgeschlagen, die aus zwei Filtern besteht, welche über eine Bodenplatte verbunden sind.

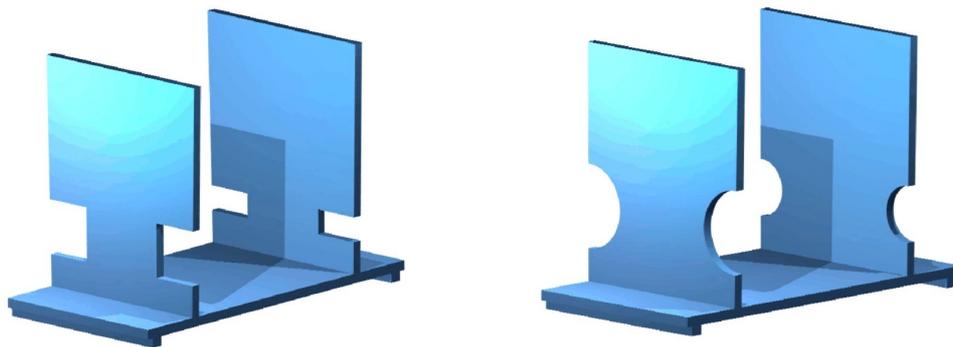


Abb. 7.9: Einkammersystem mit rechteckigen und runden Aussparungen

Die runden bzw. eckigen Aussparungen entsprechen dabei jeweils einer Porosität von 11% (seeseitig) und 5% (strandseitig) und bieten dadurch bezüglich der Transmission und Reflexion äquivalente hydrodynamische Eigenschaften.

Abschließend werden zwei Beispiele (Versuch und Numerik) für die Möglichkeit der Strömungsvisualisierung um das optimierte System vorgestellt. Abb. 7.10 zeigt die Versuchsanordnung (KWK) des Systems mit rechteckigen Aussparungen.

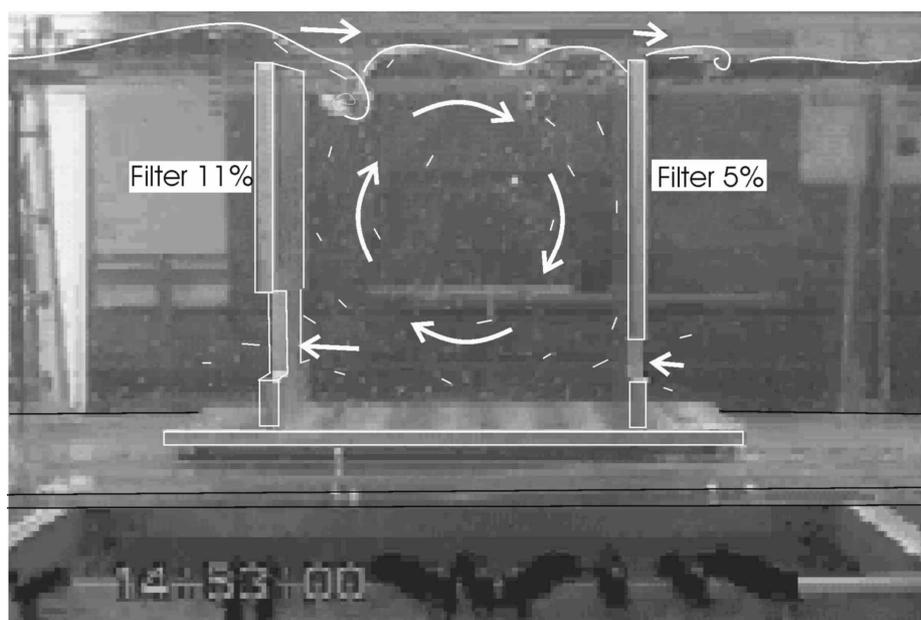


Abb. 7.10: Strömungsvorgänge am „Künstlichen Riff“

Die Versuche belegen einen Massentransport über das Bauwerk in Richtung „Strand“ und durch die Öffnungen im unteren Drittel des Bauwerks in Richtung „offenes Meer“. Zwischen den beiden Filtern entsteht eine Rotationsströmung im Uhrzeigersinn. In Abb. 7.11 wird anhand einer numerischen Simulation die Umströmung eines Filters mit nur einer Öffnung erläutert.

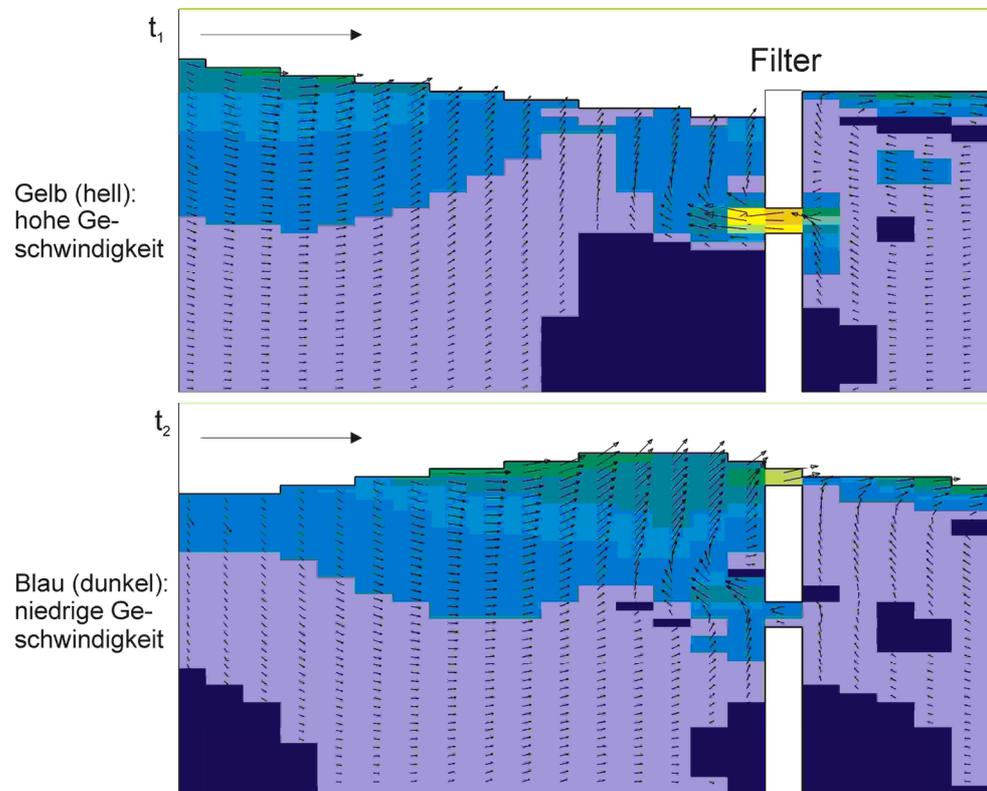


Abb. 7.11: Strömungsvorgänge am Filter mit einer einzelnen Öffnung

Es wird deutlich, dass die Strömungsrichtung über dem Filter und in der einzelnen Öffnung teilweise entgegengesetzt ist. Hinsichtlich der Beurteilung des Wasseraustauschs und des Sedimenttransports bieten die vorgestellten Visualisierungstechniken eine gute Grundlage für zukünftige Untersuchungen.

Zusammenfassend stellt die Empfehlung für ein Künstliches Riff eine gelungene Optimierung zwischen hydrodynamischen Eigenschaften und gegebenen Randbedingungen dar, und bietet z.B. für den Ostseeraum eine attraktive und effiziente Alternative zu konventionellen Bauwerksformen.

Im Rahmen des BMBF Forschungsvorhabens „Unterwasser-Filterssysteme zur Wellendämpfung“ wurde unter Federführung der TU Braunschweig in Langzeitexperimenten am GWK, Hannover ein ähnlich optimiertes 2-Filterssystem ($P=5\%$ und 11%) zusammen mit einem Strandprofil bei starkem Seegang untersucht. Als Ergebnis wird bei einem Entwurfswasserstand im Wellenkanal von $d = 4\text{m}$ (Relative Bauwerkshöhe $d_s/d=0.98$) die Stranderosion quasi völlig gestoppt. Selbst bei höherem Wasserstand (Bauwerk wird überspült) - wie er beispielsweise in Verbindung mit Starkwindereignissen vorkommt - kann die Erosion entscheidend verringert und eine spürbare Zerstörung des Strands verhindert werden.

8 Zusammenfassung

Die Dissertation beschäftigt sich mit der numerischen und experimentellen Analyse von „Künstlichen Riffen“ zur Wellendämpfung. Zum Schutz erosionsgefährdeter Küstenabschnitte, an denen die einlaufende Seegangsenergie auf ein tolerierbares Maß reduziert werden soll, stellen die vorgestellten Unterwasser-Filtersysteme als Künstliche Riffe ein innovatives und vorteilhaftes System gegenüber konventionellen Lösungen dar. Sie behindern nicht den Blick auf die offene See und erlauben den freien Wasseraustausch zwischen ungeschützten und geschützten Bereichen sowie dem offenen Meer. Sie eignen sich somit auch für touristisch genutzte Strandabschnitte wie zum Beispiel der Ostsee oder des Mittelmeers. Die hier vorgestellten Unterwasser-Filtersysteme bestehen aus getauchten, hintereinander gestaffelten Einzelfiltern unterschiedlicher Porosität, die den einlaufenden Seegang teils transmittieren, teils reflektieren und dissipieren.

Die Arbeit beginnt mit der Ermittlung *globaler Kennwerte* anhand systematischer Modellversuche. Bei den Experimenten in Wellenkanälen verschiedener Größe – beispielsweise dem GWK Hannover mit einer Länge von 324 m - wird vorwiegend eine spezielle Versuchstechnik mit transienten Wellenzügen eingesetzt, die eine zeitsparende Analyse über ein breites Frequenzspektrum erlaubt. Das empfohlene *lineare semi-empirische Berechnungsmodell* mit modifizierten Randbedingungen verbessert die bisherige Transmissionsprognose.

Zur detaillierten Analyse der Künstlichen Riffe wird in der Arbeit eine neue, nichtlineare numerische Berechnungsmethode zur instationären viskosen Berechnung von getauchten Strukturen im Seegang unter Berücksichtigung der freien Oberfläche vorgestellt. Sie basiert auf einer Kopplung der Reynolds Averaged Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) mit der Volume of Fluid (VOF) Methode. Mit diesem Verfahren können nichtlineare Strömungsprozesse im Detail untersucht werden, die durch die Wechselwirkung zwischen Welle und Struktur entstehen. Die Grundlagen der Numerik und die im Rahmen der Arbeit entwickelte Vorgehensweise bei der numerischen Modellierung, Gittergenerierung und Simulation von getauchten Filtern im Wellenfeld werden ausführlich dargestellt. Die erforderlichen Randbedingungen und Gittereigenschaften, die für eine fehlerfreie Berechnung notwendig sind, werden systematisch untersucht. Daraus ergibt sich eine Gitterdichte von mindestens 50 Zellen pro Wellenlänge, um eine ungestörte Welle zu berechnen. Der Vergleich der Berechnungen mit experimentellen Versuchsergebnissen beweist die hohe Genauigkeit des Verfahrens bezüglich der ermittelten Wellenauslenkungen, Geschwindigkeiten im Nahfeld der Filter und der auftretenden Strukturkräfte. Das entwickelte Verfahren ist prinzipiell für Berechnungen von Strukturen beliebiger Art anwendbar. Voraussetzung dafür sind der Einsatz geeigneter Gitter und eine ausreichende Rechnerleistung. Die anschließende *Analyse lokaler und nichtlinearer Strömungsphänomene* getauchter Strukturen unterstützt die Entwicklung optimierter Künstlicher Riffe. Insgesamt setzen sich die ermittelten Ergebnisse aus lokalen Strömungsphänomenen und globalen Größen zusammen und können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- *Transmission, Reflexion, Dissipation:*

Die Transmissions- und Reflexionscharakteristik für Einzelfilter und Filtersysteme wird anhand systematischer Untersuchungen ermittelt. Die Analysen ergeben, dass die Haupteinflussparameter die relative Bauwerkshöhe d_s/d , die Filterporosität P und die Filteran-

zahl n sind. Mit getauchten Filtern zwischen 0% und 20% Porosität lassen sich zufriedenstellende Dämpfungseigenschaften erzielen. Bei optimierten Künstlichen Riffen ergeben sich Dissipationsanteile von über 80%.

- *Porositätsverteilung innerhalb des Filters:*
Die Anordnung der Porosität (z.B. „viele kleine“ oder „eine große“ Öffnung) innerhalb eines Filters hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Transmissionscharakteristik. Daher kann die Anordnung der Porosität hinsichtlich der gewünschte Bauausführung und der konstruktiven Festigkeit sowie in Bezug auf den Sedimenttransport optimiert werden.
- *Semi-empirisches Berechnungsverfahren:*
Zur Bestimmung von Transmission, Reflexion und indirekt der Dissipation für Entwurfszwecke wird ein neuer Ansatz entwickelt, der - unter Vernachlässigung nichtlinearer Effekte - eine gute Vorhersage dieser Werte in Übereinstimmung mit Versuchsdaten gibt.
- *Übergang vom gestörten Nahfeld zum Fernfeld:*
Mit der numerischen Methode können die instationären Geschwindigkeitsfelder im Nahfeld und Fernfeld des Filters erfasst werden. Die Analyse dieser Daten ergibt, dass die durch das Bauwerk hervorgerufene „Störung“ (Wirbel, Turbulenzen) der Welle in der Regel nach einer viertel bzw. spätestens nach einer halben Wellenlänge abgeklungen ist.
- *Abschätzung der Energieverluste:*
Die Abschätzung der Energieverluste an getauchten Filtern auf der Basis der numerischen Ergebnisse ergibt, dass der Reibungsverlust durch Wirbelbildung für die untersuchten Strukturen zwischen 3 und 10% sowie der Reibungsverlust durch Turbulenzen zwischen 0,3 und 2% der initialen Wellenenergie beträgt.
- *Transformation „langer“ Wellen in „kurze“:*
Anhand der numerischen und experimentellen Ergebnisse wird deutlich, dass durch nicht-lineare Energietransformation an getauchten Einzelfiltern und Filtersystemen ein Teil der „langen“ Wellen, die den Strand gefährden, in „kurze“ Wellen umgesetzt wird.
- *Seegangsbelastung:*
Durch die Verwendung von Kraftmesswaagen in den einzelnen Filterkomponenten kann die Seegangsbelastung für die untersuchten Filter in Tiefenrichtung ermittelt werden. Die maximalen resultierenden Gesamtkräfte werden in Abhängigkeit der einlaufenden Wellenenergie bestimmt und liegen beispielsweise für einen getauchten Filter mit 11% Porosität (GWK) in der Größenordnung von 6 bis 9 kN/m, und damit ca. 50% niedriger als bei vergleichbaren ausgetauchten Strukturen.
- *Folgerungen für den Entwurf Künstlicher Riffe:*
Aus den erzielten Ergebnissen ergeben sich schließlich Folgerungen und Kriterien für den Entwurf optimaler Unterwasser-Filterssysteme.

Auf der Basis der numerischen und experimentellen Analyse sowie der dargestellten Entwurfskriterien lässt sich der Entwurf eines optimierten Künstlichen Riffs für Gebiete wie die Ostsee oder das Mittelmeer durchführen. Beispielsweise kann mit einem System, das aus zwei getauchten Filtern (5% strandseitig, 11% seeseitig) besteht, eine Reduktion der transmittierten Energie auf 14% der initialen Wellenenergie erzielt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird aufgezeigt, dass sich die neue numerische Methode und die systematischen Modellversuche mit transienten Wellenpaketen für die nichtlineare Analyse komplexer Systeme optimal ergänzen. Die am Beispiel der Künstlichen Riffe vorgeführte Analysetechnik ist auch auf andere Bereiche des Ingenieurwesens übertragbar und leistet somit einen wertvollen Beitrag für weiterführende Arbeiten und zukünftige Problemlösungen in verschiedenen Anwendungsbereichen.

9 Literatur

- Abul-Azm, A.G. (1993), *Wave diffraction through submerged breakwaters*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119 No. 6, S. 587 – 605
- Bergmann, H. und Oumeraci, H. (1998), *Wave pressure distribution on permeable vertical walls*. Proceedings of the 26th Int. Conference on Coastal Engineering (ICCE), Kopenhagen, Dänemark, ASCE
- Bergmann, H., Kortenhaus, A. und Muttray, M. (1999), *Wellenschutzbauwerke - Aktueller Stand und Entwicklungen*, HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen, 136. Jahrgang, Nr. 1, S. 60-66
- Bergmann, J. (1985), *Gaußsche Wellenpakete – Ein Verfahren zur Analyse des Seegangsverhaltens meerestechnischer Konstruktionen*, Dissertation, TU Berlin (D83)
- Brandt, H. und Habel R. (1997), *Simulation der 3D-Strömung eines Schiffspropellers unter Verwendung blockstrukturierter Gitter*, Nationales STAR-CD User Meeting Stuttgart-Fellbach '97, ISM Bericht Nr. 97/5, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin
Download: http://hydmech.fb12.tu-berlin.de/~rolf/Vortrag/5-2_97-5abstract.html
- Brandt, H. und Habel, R. (1998), *Numerische Berechnung der turbulenten Strömung am Propeller im Nachstromfeld einer schiffsähnlichen Heckform*, DFG Abschlußbericht, ISM Bericht Nr. 98/7, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin
Download: http://hydmech.fb12.tu-berlin.de/~rolf/DFG_Endbericht_br/DFG_Endbericht_abstract.html
- Clauss, G. F. und Chen, Y. (1990), *Reduction of tank wall effects by vertical side wall wave absorbers*, Proceedings of the 19th International Towing Tank Conference (ITTC), Vol. 2, Madrid, Spanien
- Clauss, G. F. und Habel, R. (1999), *Hydrodynamic Characteristics of Underwater Filter Systems for Coastal Protection*, Proceedings of the Canadian Coastal Conference (CCC), Vol. 1, S. 139-154, Victoria, Canada
- Clauss, G. F. und Habel, R. (2000), *Artificial Reefs – Computation and Validation with Free Water Surface*, STAR CD User Meeting Berlin 2000, ISM Bericht Nr. 2000/5, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin
Download: <http://www.ism.tu-berlin.de/MT/Forschung/FP12.html>

- Clauss, G. F. und Habel, R. (2000), *Artificial Reefs for Coastal Protection – Transient Viscous Computation and Experimental Evaluation*, Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Sydney, Australia, ASCE
Download: <http://www.ism.tu-berlin.de/MT/Forschung/FP12.html>
- Clauss, G. F. und Kuhlmann G. H. (1995), *Design aspects of vertical wave absorbers*, Proceedings of the 14th International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Kopenhagen, Dänemark
- Clauss, G. F. und Kühnlein, W. L. (1997), *A new tool for seakeeping tests - nonlinear transient wave packets*, Proceedings of the 8th International Conference on the Behaviour of Offshore Structures (BOSS), Vol. 2, Delft
- Clauss, G. F. und Vannahme, M. (1999), *An Experimental Study of the Nonlinear Dynamics of Floating Cranes*, Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, Brest, France, Paper No. 99-JSC-343, Vol. 3, S. 511-518
- Clauss, G., Lehmann, E. und Östergaard C. (1992), *Offshore Structures – Conceptual Design and Hydrodynamics*, Volume 1, Springer-Verlag, London
- Computational Dynamics (1997), *Star-CD V3.05 User's Manual und Tutorials*, CD London
- Davies, M.C. und Zarnick, E.E. (1964), Testing ship models in transient waves, In 5th Symposium on Naval Hydrodynamics
- Dean (1945), *On the reflexion of surface waves by a submerged plume barrier*. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 41 part 3, S. 231 – 238
- Dick, T. M. und Brebner, A. (1968), *Solid and permeable submerged breakwaters*. Proceedings of 11.th conference on Coastal Engineering, ASCE, New York, II S. 1141 – 1158
- Ferziger, J. H. und Perić, M. (1996), *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer Verlag, Berlin
- Harlow, F. H. und Welch, J. E. (1965), *Numerical Calculation of time dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface*, Phys. Fluids, Vol. 8, S. 2182-2189
- Hartmann (1969), *Das Stabgitter in instationärer Strömungsbewegung*, Technischer Bericht, Heft 69, Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin
- Heerten, G., Jackson, A., Restall, S. und Saathoff, F. (2000), *New developments with mega sand containers of non-woven needle-punched geotextiles for the construction of coastal structures*, Proceedings of the 27th Int. Conference on Coastal Engineering (ICCE), Sydney, Australia, ASCE

- Hino, M. und Yamazaki, T. (1971), *Vortex formation from the edge of a vertical plate by wave actions and the associated energy dissipation*, Proceedings of the 18th Japanese Conference on Coastal Engineering, JSCE S. 61-65
- Hirt, C. W. und Nichols, B. D. (1981), *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*, Journal of Computational Physics, Vol. 39, S. 201-225
- Hyun, B.-S. und Shin, Y. H. (1997), *On some characteristics of breaking waves generated by a submerged circular cylinder*, 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu
- Iwata, K., Kawasaki, K. und Kim, D.-S. (1996) *Breaking limit, breaking and postbreaking wave deformation due to submerged structures*, Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Orlando
- Jarlan, G. E. (1961), *A perforated vertical wall breakwater - an examination of mass-transport effects in gravitational waves*, The Dock & Harbour Authority
- Johnson, J. W., Fuchs, R. A. und Morison, J. R. (1951), *The damping action of submerged breakwaters*. Transaction American Geophysical Union, 32(5), S. 704 –718
- Khader, M. H. A., Rai, S. P. (1980), *A study of submerged breakwaters*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 18(2), S. 113-121
- Kriebel, D. L. und Bollmann, A. C. (1996), *Wave Transmission past Vertical Wave Barriers*, Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Orlando, Florida
- Kuhlmann G. H. (1998), *Analyse und Optimierung vertikaler Wellenabsorber*, Dissertation, TU Berlin (D83)
- Kühnlein, W. L. (1997), *Seegangversuchstechnik mit transientser Systemanregung*, Dissertation, TU Berlin (D83)
- Larson L., Regnström, B., Broberg, L., Li, D-Q., Janson, C-E. (1998), *Failures, Fantasies and Feats in the Theoretical/Numerical Prediction of Ship Performance*, Keynote Lecture, 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington DC
- Mansard, E. P. D., Funke, E. R. (1987), *Experimental and analytical techniques in wave dynamics*. Proceedings Congress of the International Association Hydraulic Research, Seminar on wave analysis and Generation in Laboratory bassins, IAHR, S. 91 – 117
- Muzaferja, S., Perić, M. und Seung-Deog, Y. (1995), *Numerische Berechnung um einen Tragflügel unter freier Oberfläche*, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft

- Oumeraci, H. (1994), *Review and analysis of vertical breakwater failures—lessons learned*, Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Kobe, Japan, ASCE
- Pákozdi, C. (1999), *Parameterunterstützte Wellen- und Gittergenerierung für die numerische Analyse (RANSE/VOF) getauchter Unterwasserfilter*, Diplomarbeit, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin
- Pereira, I. M. (1996), *Wirbelablösungen, die Oberflächenwellen beim Passieren einer Stufe erzeugen*, Mitteilung Nr. 132 des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin
- Sayao, O. S. F. J. (1995), *Model study of submerged breakwaters for beach protection*, International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Rio de Janeiro
- Shore protection manual (1984), Dept. of the Army, Coastal Engineering Research Center, Washington, USA
- Stückrath, T., Hering, W. und Schlie, S. (1998), *Uferschutz vor Koserow durch Wellenbrecher*, HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen, 135. Jahrgang, Nr. 9, S. 236-248
- Takezawa, S. und Hirayama, T. (1976), *Advanced experiment technique for testing ship models in transient water waves*, In 11th Symposium on Naval Hydrodynamics
- Takikawa, K., Yamada, F. und Matsumoto, K. (1997), *Internal characteristics of breaking waves over submerged breakwaters*, In 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu
- Tanimoto, K. und Takahashi, S. (1994), *Japanese experiences on composite breakwaters*. In Proceedings of International Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, Port and Harbour Research Institute Yokosuka.
- Ubink, O. (1997), *Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces*, PhD thesis at the Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, England
- Urashima, S. und Kondo, H. (2000), *Wave Force on Detached Breakwaters with Slotted Wall*, Book of abstracts - 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Vol. 2, Sydney, Australia, ASCE
- Wiegel, R. L. (1960), *Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier*. Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE Vol. 86, No. WW1, S. 1 – 12

10 Nomenklatur

a	[m]	Wellenamplitude
$a(k)$	[m]	Gaußverteilte Wellenamplituden als Funktion der Wellenzahl
α	[-]	Wichtungsfaktor zwischen Upwind und Central Differencing
b_E	[m]	Elementbreite
b_K	[m]	Kammerlänge
b_W	[m]	Breite der Wellenfront
c	[m/s]	Phasengeschwindigkeit der Welle
c_{gr}	[m/s]	Gruppengeschwindigkeit der Wellengruppe
Co	[-]	Courant Zahl
C_r	[-]	Reflexionskoeffizient
C_t	[-]	Transmissionskoeffizient
d	[m]	Wassertiefe
d_s	[m]	Bauwerkshöhe
d_s/d	[-]	relative Bauwerkshöhe
e	[m]	Elementachsabstand zweier benachbarter Elemente
E_d	[J]	dissipierter Energieanteil
E_r	[J]	reflektierter Energieanteil
E_t	[J]	transmittierter Energieanteil
E_V	[J]	Energieverlust
F	[-]	Variable [0..1] der VOF-Methode für Konzentration des Fluids
F_{res}	[N]	resultierende Kraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H_i	[m]	einlaufende, initiale Wellenhöhe
H_r	[m]	reflektierte Wellenhöhe
H_s	[m]	signifikante Wellenhöhe
H_t	[m]	transmittierte Wellenhöhe
k	[1/m]	Wellenzahl
K_P	[m]	Konzentrationspunkt eines Wellenpakets
L	[m]	Wellenlänge
μ	[m ² /s]	kinematische Viskosität

Ω	[1/s]	Wirbelstärke
P	[-]	Porosität
p	[Pa]	Druck
ρ	[kg/m ³]	Wasserdichte
T	[s]	Wellenperiode
t	[s]	Zeit
T_p	[s]	Peak-Periode
Ur	[-]	<i>Ursell</i> -Zahl
u, v, w	[m/s]	Geschwindigkeitskomponenten
W	[-]	Verbauungsgrad einer getauchten Struktur
ω	[rad/s]	Kreisfrequenz
x	[m]	Koordinate in Kanal- bzw. Wellenausbreitungsrichtung
y	[m]	Koordinate für Kanalbreite
z	[m]	Koordinate für Wasser- bzw. Kanaltiefe
ζ_a	[m]	Wellen- bzw. Wasserspiegelauslenkung
$\zeta(t)$	[m]	zeitabhängige Wasserspiegelauslenkung

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CD	Central Differencing
CFD	Computational Fluid Dynamics
CICSAM	Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes
DKS	Dreikammersystem (4 Filter)
DMS	Dehnungsmessstreifen
EKS	Einkammersystem (2 Filter)
FFT	Fast Fourier Transformation
GWK	Großer Wellenkanal des Forschungszentrums Küste, Hannover
ISM	Institut für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin
KMW	Kraftmesswaage
KWK	Kleiner Wellenkanal am FG Meerestechnik der TU Berlin
LWI	Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
MWK	Mittlerer Wellenkanal am Institut für Wasserbau der TU Berlin
RANSE	Reynolds Averaged Navier-Stokes-Equations
RB	Randbedingung
UD	Upwind Differencing
VOF	Volume of Fluid
ZKS	Zweikammersystem (3 Filter)

11 Anhang

Empfehlung eines optimalen Künstlichen Riffs für die Ostsee

Auf der Basis der in der Arbeit vorgestellten Entwurfskriterien wird ein optimales Unterwasser-Filterssystem als Künstliches Riff für den Ostseeraum vorgeschlagen. Die angenommene Wassertiefe repräsentiert eine durchschnittliche Tiefe im Vorstrandbereich. Die zugrundegelegten Wellenparameter des Seegangsspektrums ergeben sich aus einer Messung bei Starkwindverhältnissen.

Damit erhält man die folgenden Eingangsparameter:

- Wassertiefe: $d = 8\text{m}$
- Signifikante Wellenhöhe: $H_s = 1,5\text{m}$
- Peak-Wellenperiode: $T_p = 8\text{s}$

Aufgrund der Kosten/Nutzen-Analyse wird als Künstliches Riff ein Einkammersystem ausgewählt. Die Filterporositäten werden gemäß der zuvor erläuterten hydrodynamischen Ergebnisse mit 5% für den strandseitigen und 11% für den seeseitigen Filter gewählt.

Die optimale Kammerlänge des Systems, d.h. der Abstand der beiden Filter zueinander, muss auf das Seegangsspektrum abgestimmt werden, um insbesondere die Reflexion zu minimieren und gleichzeitig die Dissipation zu erhöhen. Wie bei der Reflexionsanalyse gezeigt, ist die Kammerlänge auf die mit der Peak-Periode zusammenhängende Wellenlänge abzustimmen, um im gesamten Spektrum gute Dämpfungseigenschaften zu erzielen und insbesondere die energiereichen Wellen zu dissipieren. Aus der Wellenperiode von 8s kann bei einer gegebenen Wassertiefe von 8m die zugehörige Wellenlänge iterativ mithilfe der Dispersionsgleichung bestimmt werden. Die Auslegungswellenlänge L beträgt demnach ca. 65m. Daraus ergibt sich wiederum eine optimale Kammerlänge von $\frac{1}{4} L = 16,25\text{m}$. Die Bauhöhe des Riffs wird auf 95% des Entwurfswasserstandes von 8m festgelegt. Sie beträgt demnach 7,6m.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Hauptparameter und -abmessungen für das Bauwerk:

- Porosität des seegangsseitigen Filters: $P = 11\%$
- Porosität des küstenseitigen Filters: $P = 5\%$
- Abstand der beiden Filter zueinander: $b = 16,25\text{m}$
- Bauhöhe des Künstlichen Riffs: $d_s = 7,6\text{m}$

Eine Vorhersage der Transmission für das optimierte System ist für das gesamte Spektrum mit dem semi-empirischen Modell möglich und ergibt folgende prozentuale Verteilung:

- Transmittierte Energie: 14%
- Reflektierte Energie: 20%
- Dissipierte Energie: 66%

Eine zusätzliche Berücksichtigung der nichtlinearen Effekte (z.B. die Transformation langer Wellen in kurze) kann auf Basis der numerischen und experimentellen Analyse erfolgen. Um neben dem Wasseraustausch auch einen gezielten Sedimenttransport in Richtung Strand zu ermöglichen und gleichzeitig eine Verschmutzung der porösen Öffnungen zu verhindern, sollte bei der Konstruktionsausführung die Porosität des Filters in ein bis zwei Öffnungen im unteren Filterdrittel konzentriert werden.

Abbildungen



Abb. 11.1: Aufbau eines Zweikammersystems (GWK)

Rolf Habel – „Künstliche Riffe“ zur Wellendämpfung

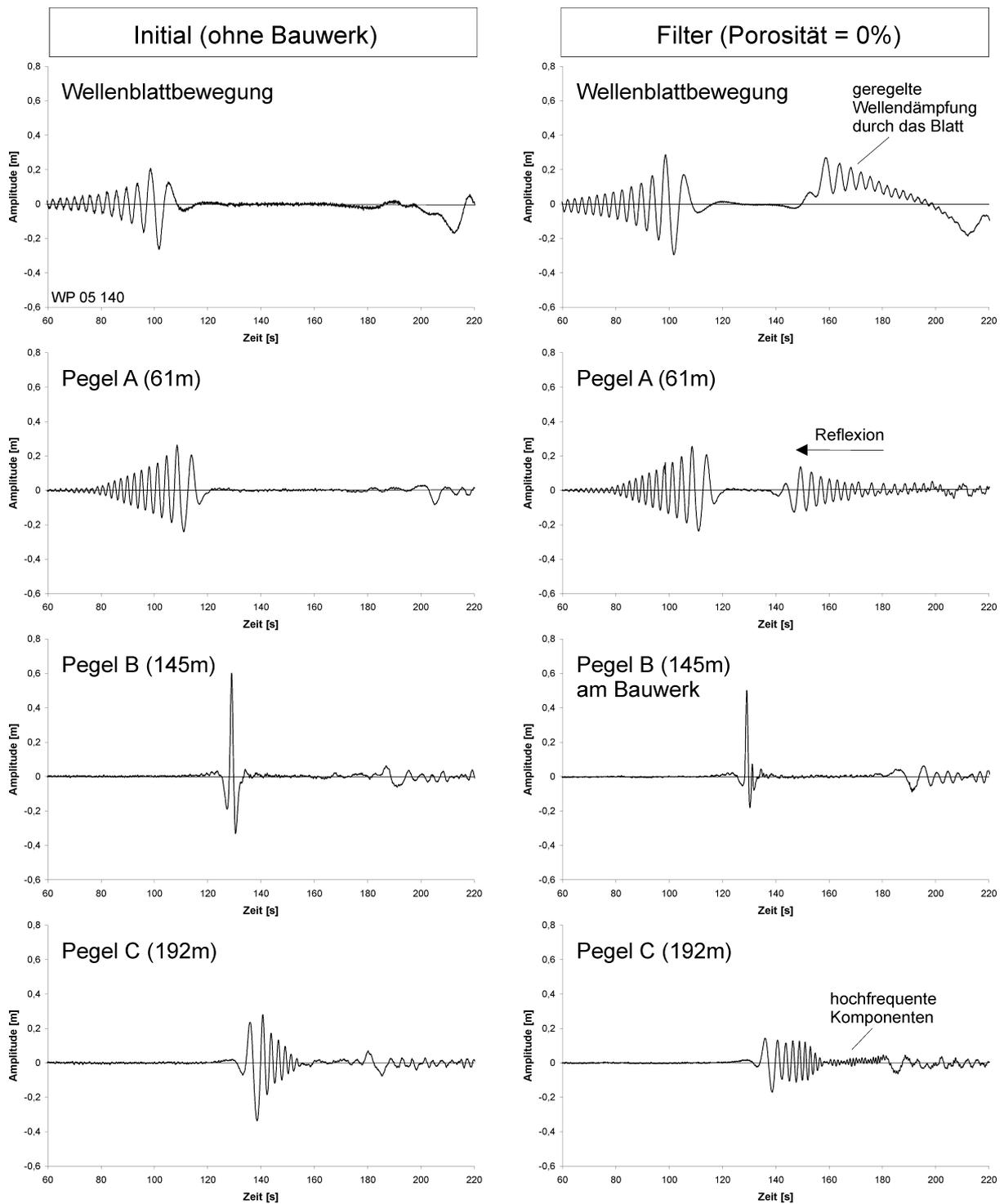


Abb. 11.2: Zeitregistrierung eines transienten Wellenzuges (GWK, $K_p=140\text{m}$)

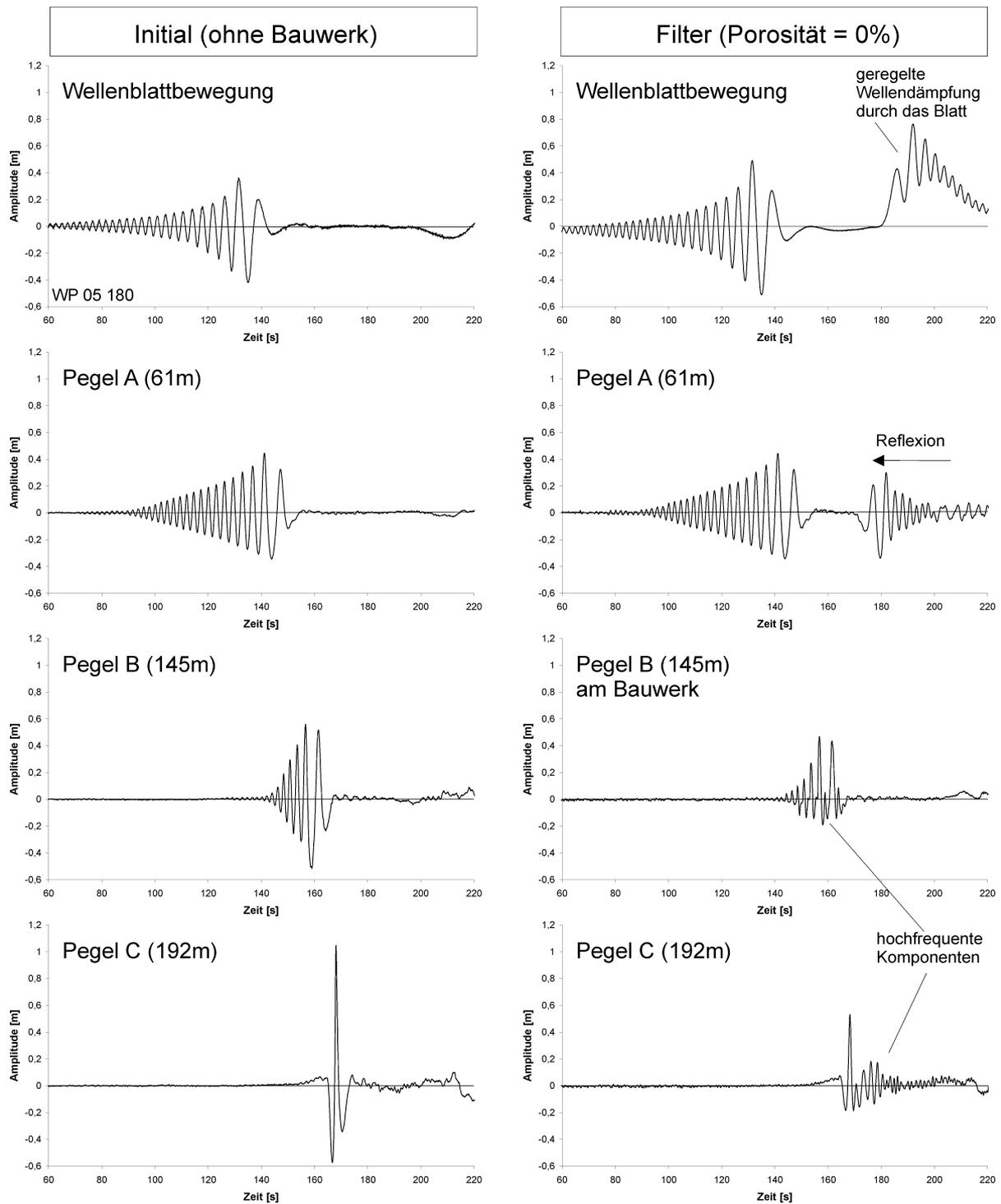


Abb. 11.3: Zeitregistrierung eines transienten Wellenzuges (GWK, $K_P=180\text{m}$)

Porosität $P=11.0\%$

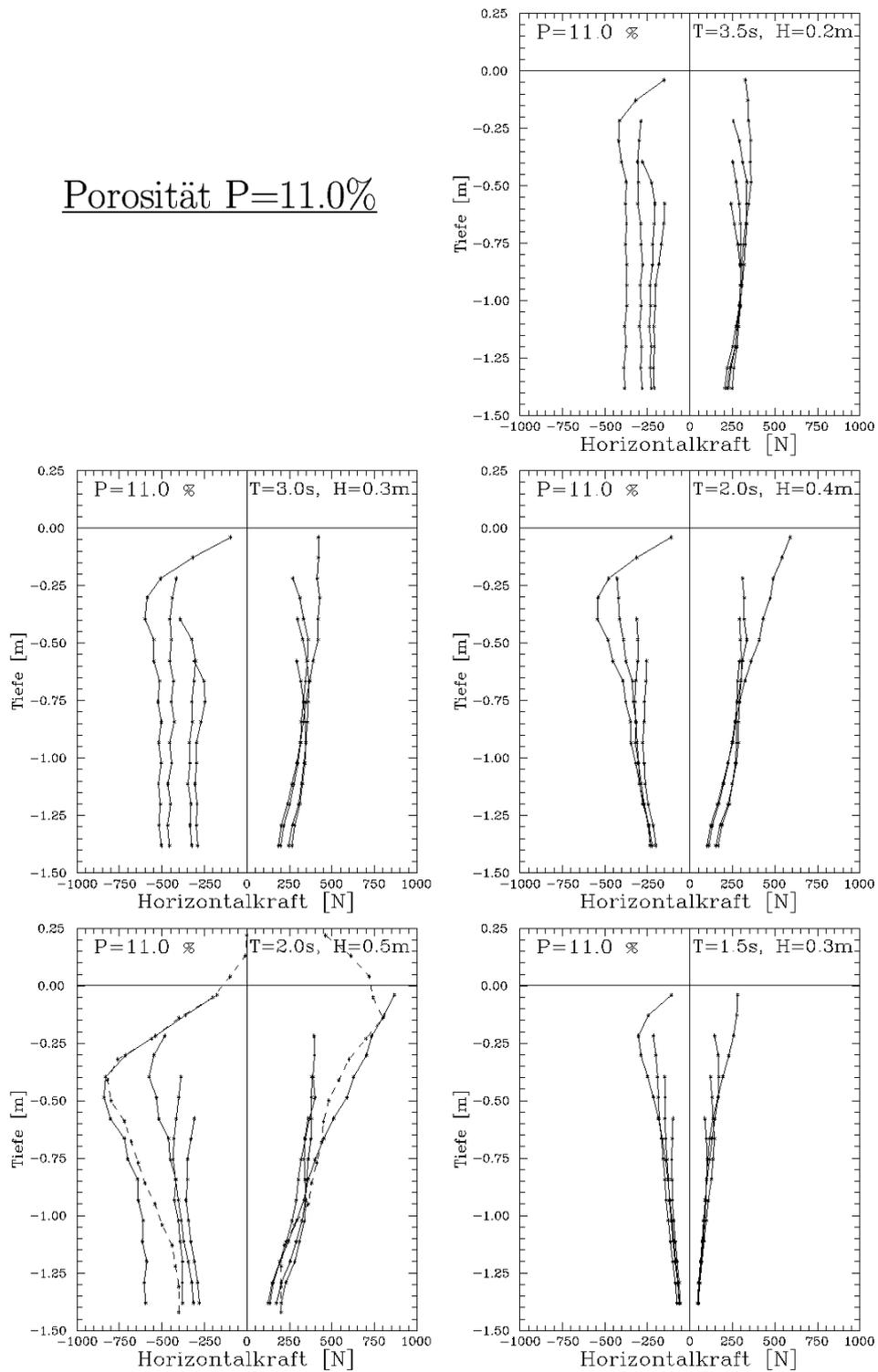


Abb. 11.4: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 11% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$)

Porosität $P=20.0\%$

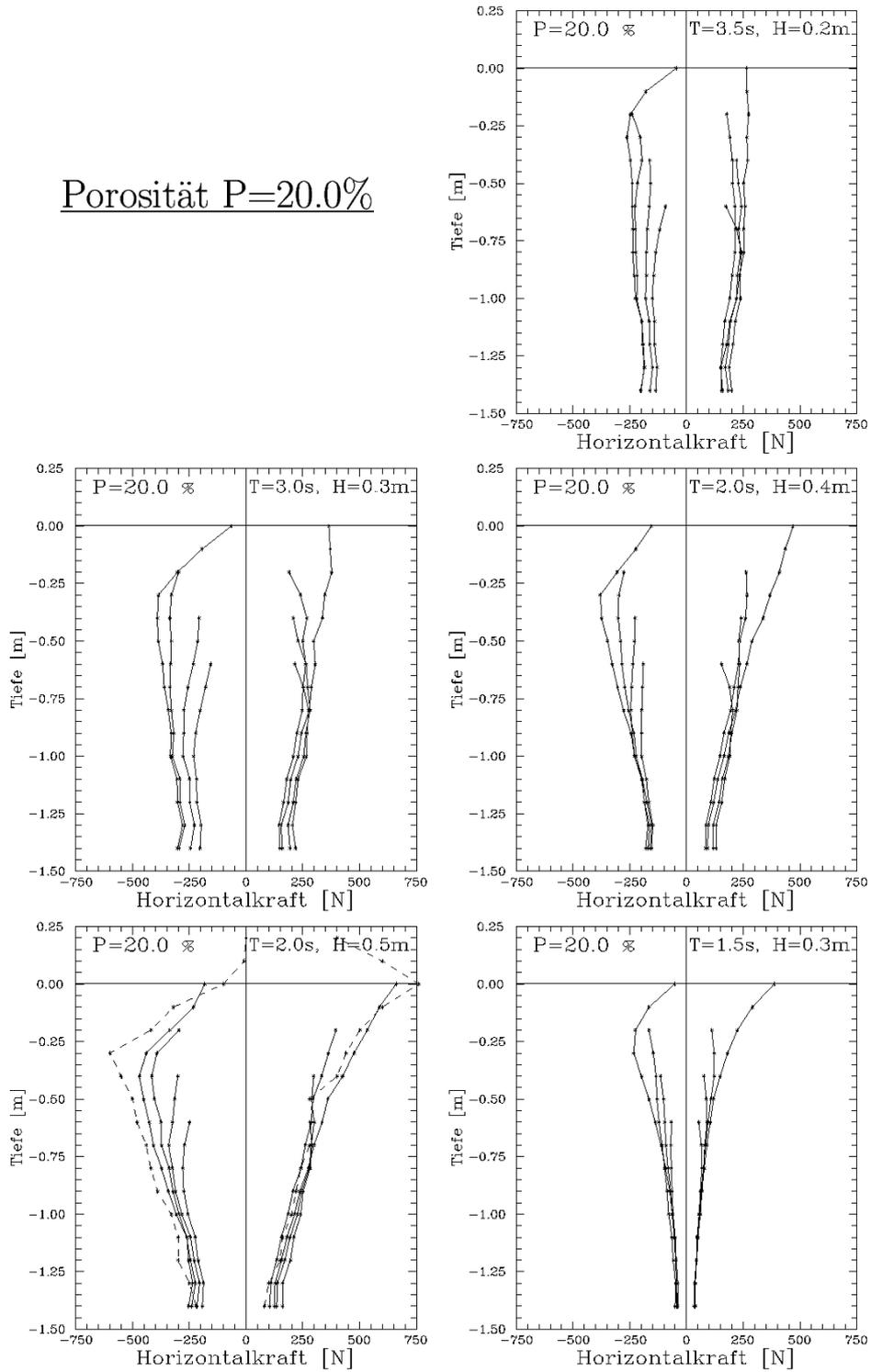


Abb. 11.5: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 20% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4\text{m}$)

Porosität $P=26.5\%$

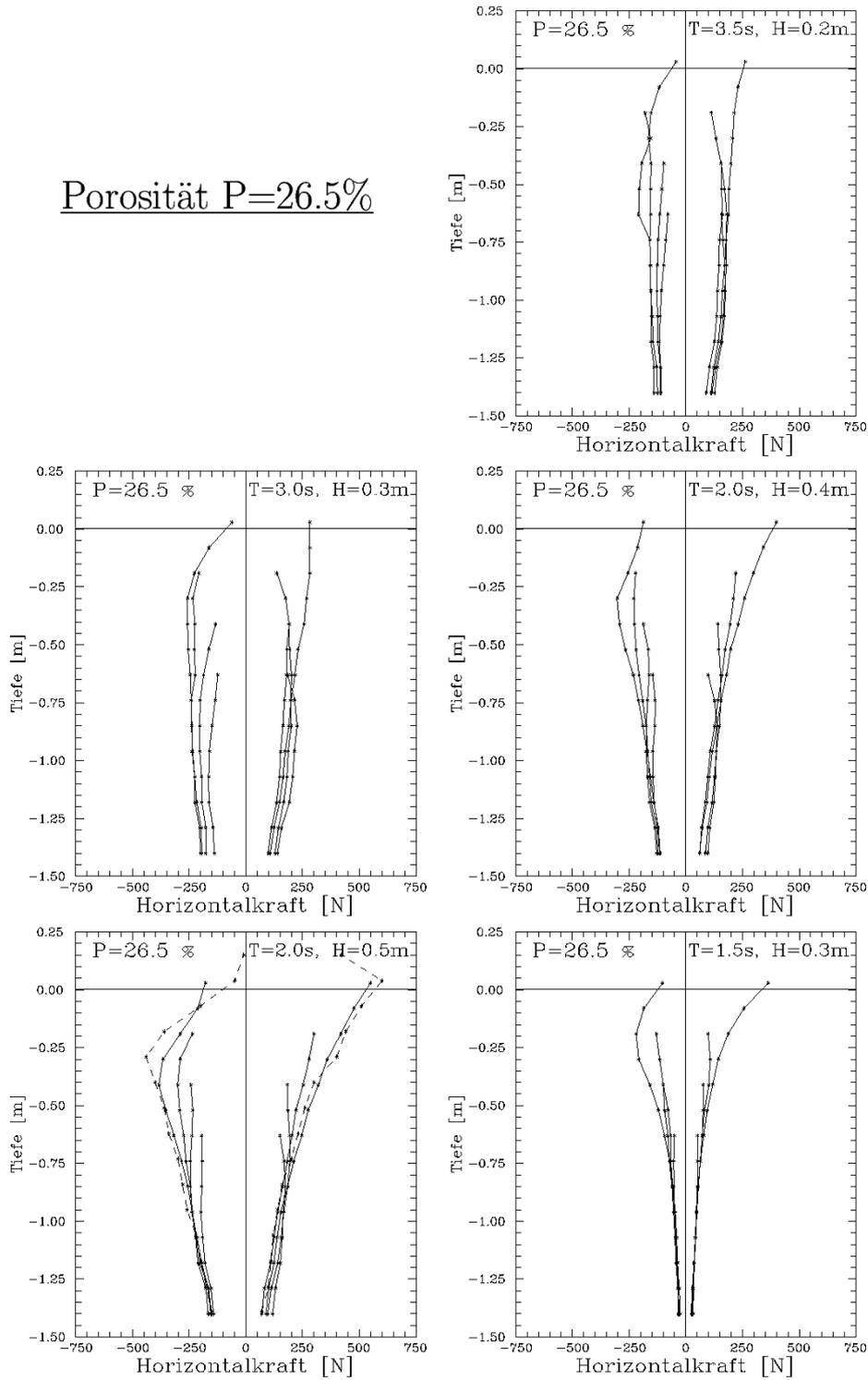


Abb. 11.6: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 26,5% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$)

Porosität $P=43.0\%$

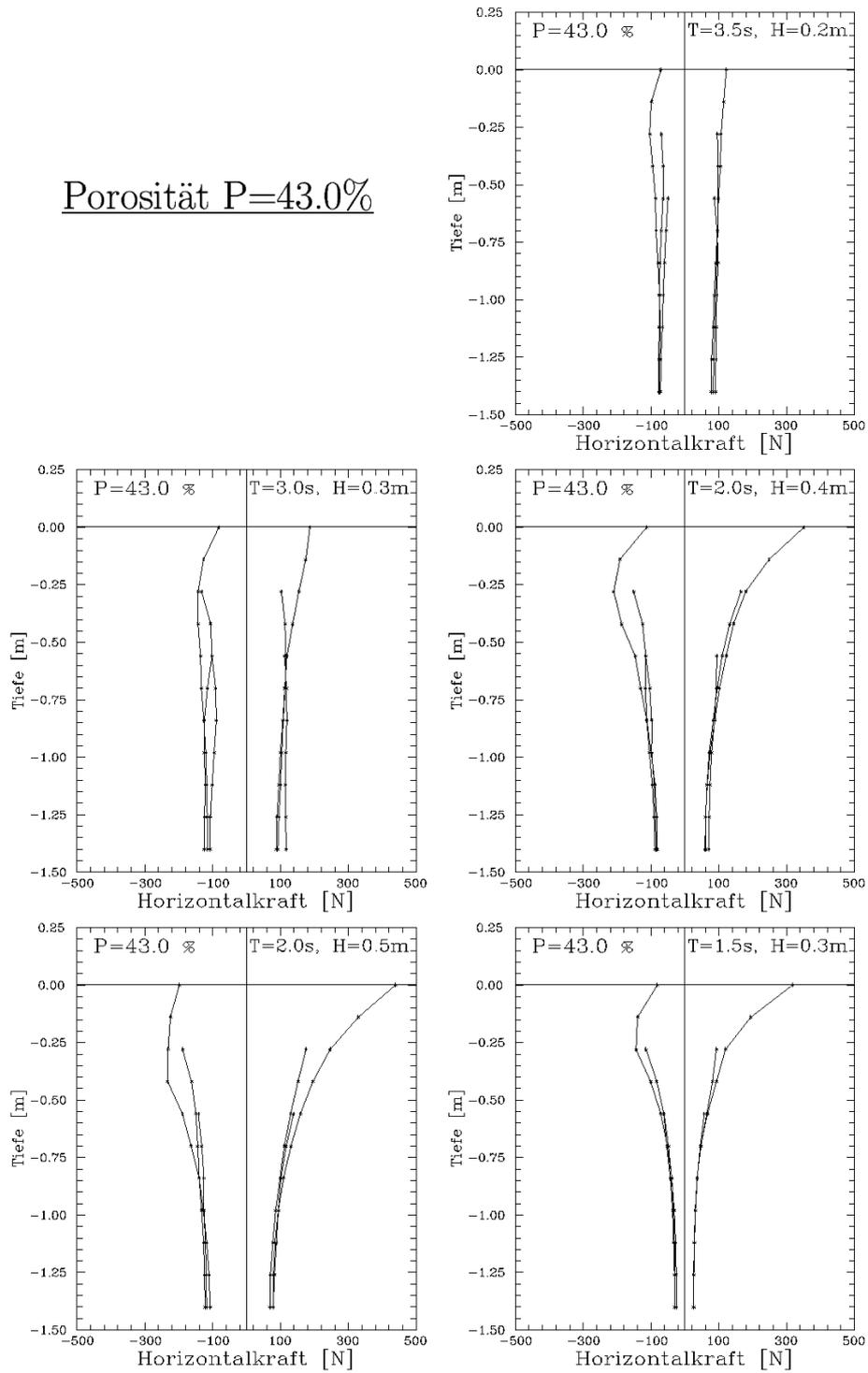
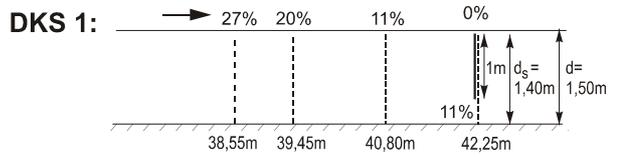
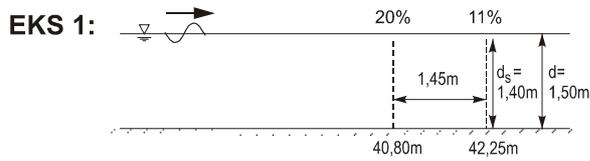


Abb. 11.7: Kräfte auf einen Einzelfilter mit 43% Porosität bei verschiedenen Wellenparametern und Bauhöhen (MWK $b_E=4m$)



EKS 2 - 7: Variation des Abstandes b zwischen den Filterwänden

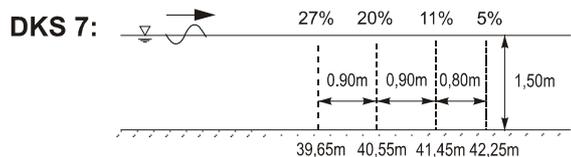
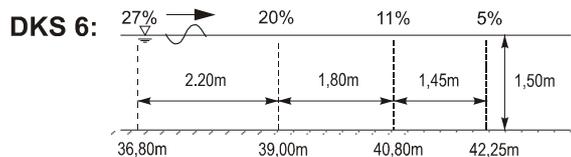
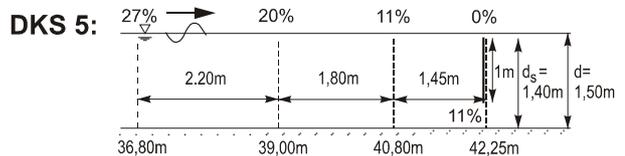
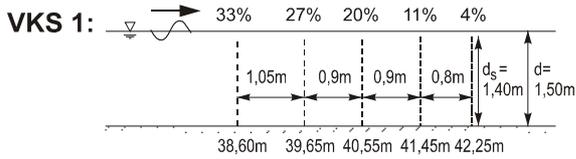
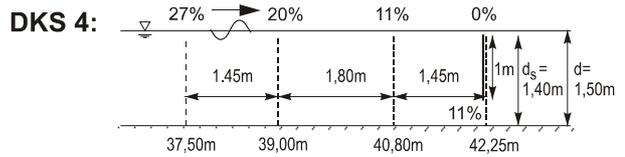
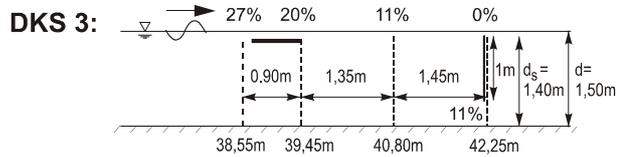
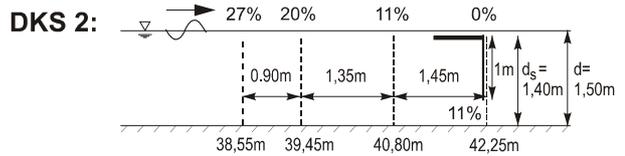
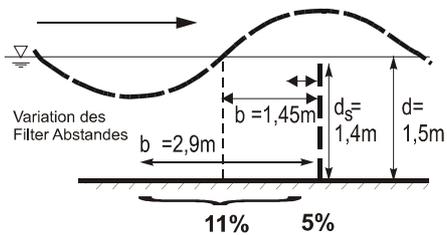


Abb. 11.8: Untersuchte Filtersysteme im Wellenkanal der TU Berlin (MWK)

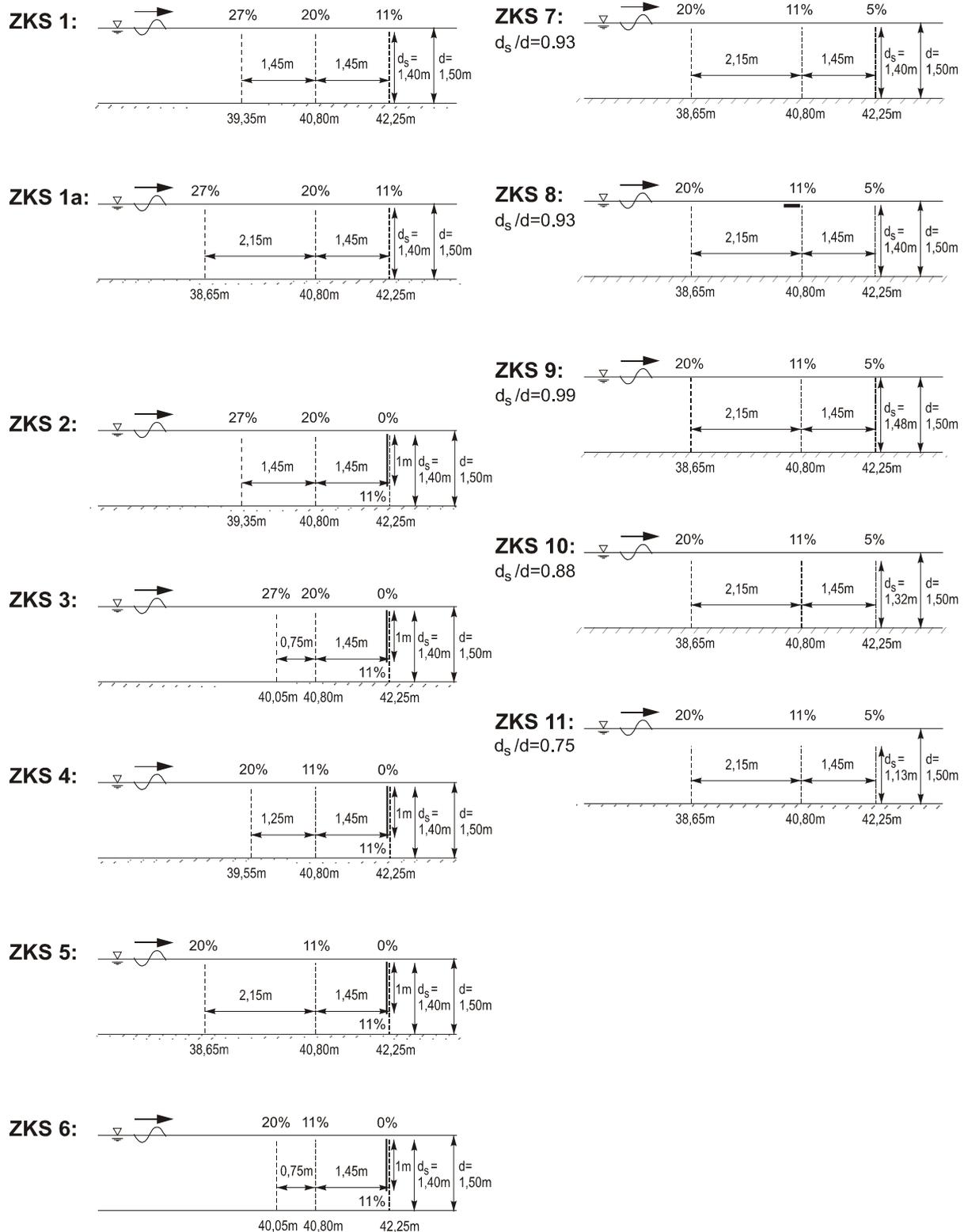


Abb. 11.9: Untersuchte Filtersysteme im Wellenkanal der TU Berlin (MWK)

Phase	$\theta = kx - \omega t$	Tiefwasser	Übergangsbereich	Flachwasser
Relative Wassertiefe	$\frac{d}{L}$	$\frac{d}{L} \geq 0.5$	$0.04 < \frac{d}{L} < 0.5$	$\frac{d}{L} \leq 0.04$
Geschwindigkeitspotential	Φ	$\zeta_a g e^{kz} \sin \theta$	$\zeta_a g \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin \theta$	$\zeta_a g \sin \theta$
Wasserspiegelauslenkung	ζ	$\zeta_a \cos \theta$	$\zeta_a \cos \theta$	$\zeta_a \cos \theta$
Dynamischer Druck	$p_{dyn} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	$\rho g \zeta_a e^{kz} \cos \theta$	$\rho g \zeta_a \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos \theta$	$\rho g \zeta_a \cos \theta$
Wasserpaketelgeschwindigkeiten				
- horizontal	$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$	$\zeta_a \omega e^{kz} \cos \theta$	$\zeta_a \omega \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos \theta$	$\zeta_a \omega \frac{1}{kd} \cos \theta$
- vertikal	$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$	$\zeta_a \omega e^{kz} \sin \theta$	$\zeta_a \omega \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin \theta$	$\zeta_a \omega (1 + \frac{z}{d}) \sin \theta$
Wasserpaketelbeschleunigungen				
- horizontal	$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$	$\zeta_a \omega^2 e^{kz} \sin \theta$	$\zeta_a \omega^2 \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin \theta$	$\zeta_a \omega^2 \frac{1}{kd} \sin \theta$
- vertikal	$\dot{w} = \frac{\partial w}{\partial t}$	$-\zeta_a \omega^2 e^{kz} \cos \theta$	$-\zeta_a \omega^2 \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos \theta$	$-\zeta_a \omega^2 (1 + \frac{z}{d}) \cos \theta$
Phasengeschwindigkeit	$c = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T}$	$c_0 = \sqrt{\frac{g}{k_0}} = \frac{g}{\omega}$	$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd}$	$c = \sqrt{gd}$
Gruppengeschwindigkeit	$c_{gr} = \frac{d\omega}{dk}$	$c_{gr} = \frac{c_0}{2} = \frac{g}{2\omega}$	$c_{gr} = \frac{c}{2} [1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}]$	$c_{gr} = c = \sqrt{gd}$
Kreisfrequenz	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$\omega = \sqrt{k_0 g}$	$\omega = \sqrt{kg \tanh kd}$	$\omega = k\sqrt{gd}$
Wellenlänge	$L = \frac{2\pi}{k}$	$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$	$kd \tanh kd = \frac{\omega^2}{g} d$	$L = T\sqrt{gd}$
Wellenzahl	$k = \frac{2\pi}{L}$	$k_0 = \frac{\omega^2}{g}$		$k = \frac{\omega}{\sqrt{gd}}$
Wasserpaketelauslenkungen				
-horizontal	ξ	$-\zeta_a e^{kz} \sin \theta$	$-\zeta_a \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin \theta$	$-\zeta_a \frac{1}{kd} \sin \theta$
-vertikal	ζ	$\zeta_a e^{kz} \cos \theta$	$\zeta_a \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos \theta$	$\zeta_a (1 + \frac{z}{d}) \cos \theta$
Partikelorbitalbahnform		Kreis	Ellipse	Ellipse

Quelle: *Clauss et al.* (1992)

Abb. 11.10: Ergebnisse der linearen Wellentheorie (Airy)

ROLF HABEL wurde 1969 in München geboren. Nach seinem Abitur am Math.- Naturwissenschaftlichen Gymnasium in Landsberg am Lech begann er 1988 sein Ingenieurstudium am Fachbereich Verkehrswesen der TU Berlin. Das Hauptstudium der Fachrichtung Luft- und Raumfahrttechnik beendete er dort 1994.

Im Anschluss an das Studium begann er seine Forschungstätigkeit am Fachgebiet Flugmechanik und Flugregelung auf dem Gebiet der Flugsimulation und beschäftigte sich insbesondere mit der numerischen Modellierung und Flugeigenschaftsanalyse sehr großer elastischer Flugzeuge. Im Jahr 1996 wechselte er an das Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin. Dort befasste er sich zunächst mit der Gittergenerierung und numerischen Strömungssimulation um Schiffsheck und Propeller. Schließlich nutzte er die Gelegenheit im Rahmen des BMBF Forschungsprojekts „Unterwasserfilter zur Wellendämpfung“ eine systematische experimentelle Analyse getauchter Strukturen durchzuführen und zusätzlich seine Erfahrungen auf dem Gebiet der Numerik einzubringen.



Die Arbeit in diesem Projekt und die Erfahrung aus den anderen Forschungsarbeiten waren die Basis für seine Dissertation, deren Ergebnisse in dem vorliegenden Buch dargestellt werden.

Das Buch präsentiert die numerische und experimentelle Analyse von „Künstlichen Riffen“ zur Wellendämpfung. Aufbauend auf Versuchsergebnissen wird zunächst ein neues *lineares Prognosemodell* mit modifizierten Randbedingungen vorgeschlagen. Zur detaillierten Analyse wird eine neue *nichtlineare numerische Berechnungsmethode* unter Berücksichtigung der freien Oberfläche vorgestellt. Sie basiert auf einer Kopplung der Reynolds Averaged Navier-Stokes Gleichungen (RANSE) mit der Volume of Fluid (VOF) Methode. Die Berechnungsergebnisse werden mit experimentell ermittelten Daten validiert. Es folgt eine ausführliche *numerische und experimentelle Analyse* und schließlich eine Empfehlung für die Gestaltung eines innovativen Künstlichen Riffs für den Einsatz im Küstenschutz.