

Schräger Wellenauflauf an Seedeichen

- Abschlußbericht zum BMBF Forschungsprojekt KIS 015/016 -

(LWI Bericht Nr. 881 / FI Bericht Nr. 643/V)

Dezember 2002



Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci
Dipl.-Ing. J. Möller
Dr.-Ing. H. Schüttrumpf

Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann
Dr.-Ing. K.-F. Daemrich
Dipl.-Ing. N. Ohle



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Allgemeiner Zusammenhang.....	2
2.1 Stand der Forschung beim Start des Projektes	3
2.2 Zielsetzung und Vorgehen	5
3 Beschreibung der Modellversuche und Versuchsprogramm	9
3.1 Beschreibung der Modellversuche aus Projektphase 1	10
3.2 Beschreibung der Modellversuche aus Projektphase 2	12
4 Analyse der Versuchsdaten und Ergebnisse	16
4.1 Ergebnisse der Projektphase 1 (Versuche in Kanada).....	16
4.1.1 Überprüfung der Homogenität des Wellenfeldes und des Wellenauflaufes entlang des Deiches	17
4.1.2 Ergebnisse der Wellenauflaufversuche.....	19
4.1.3 Ergebnisse der Wellenüberlaufversuche.....	22
4.1.4 Bewertung der Ergebnisse der Projektphase 1.....	23
4.2 Ergebnisse der Projektphase 2 (Versuche in Hannover)	25
4.2.1 Ergebnisse der Modelluntersuchungen am 1 : 6 geneigten ebenen Deich im WBM	25
4.2.2 Ergebnisse der Modelluntersuchungen am 1 : 3 geneigten ebenen Deich im WBM	32
4.2.3 Ergebnisse für Bermenprofile.....	35
4.2.4 Bewertung der Ergebnisse der Projektphase 2.....	42
5 Theoretische Untersuchungen und Überlegungen zum schrägem Wellenauflauf.....	44
5.1 Anmerkung zur Bemessungsformel für Wellenauflauf	44
5.2 Anmerkungen zum Einfluss von Shoaling und Refraktion bei der Interpretation von Messungen zum Wellenauflauf an Seedeichen	47
5.2.1 Theoretische Grundlagen.....	47
5.2.2 Abschätzung des theoretischen Verlaufs der Richtungsfunktion.....	51
5.3 Einflüsse aus Unsicherheiten die aus Messungen in regelmäßigen Wellen bekannt sind und dem Vorwelleneinfluss nach TAUTENHAIN.....	53
5.4 Anmerkungen zum Einfluss von Reflexionen bei Messungen zum Wellenauflauf an Seedeichen	56

6	Zusammenfassung, Bewertung der Ergebnisse und Ausblick	59
7	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern und Institutionen	60
8	Schrifttum	61
9	Zusammenstellung der Veröffentlichungen, Berichte und Vorträge zum Forschungsprojekt	63

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Einflussfaktoren auf den Wellenauf- und Wellenüberlauf	2
Abb. 2:	Definition des Wellenauflaufes und der schrägen Wellenangriffsrichtung	3
Abb. 3:	Vergleich vorhandener Ansätze zur Berücksichtigung des schrägen Wellenangriffs auf den Wellenauflauf für Seedeiche	4
Abb. 4:	Projektablaufplan „Schräger Wellenauflauf an Seedeichen“	6
Abb. 5:	Ziele der Modellversuche und Vorgehen bei der Auswertung in der ersten Projektphase	7
Abb. 6:	Ziele der Modellversuche und Vorgehen bei der Auswertung in der zweiten Projektphase	8
Abb. 7:	Übersicht der Inhalte aus den vier Teilberichten zum Forschungsprojekt „Schräger Wellenauflauf an Seedeichen“	9
Abb. 8:	Übersicht über den Modelldeich der Projektphase 1 einschließlich der installierten Messgeräte im Wellenbecken des NRC	10
Abb. 9:	Eingesetzte Messgeräte in der ersten Projektphase	11
Abb. 10:	Versuchsprogramm der ersten Projektphase (Wellenauflauf- und Wellenüberlaufversuche)	12
Abb. 11:	Übersicht über den Modelldeich der Projektphase 1 einschließlich der installierten Messgeräte im Wellenbecken des Franzius-Instituts	13
Abb. 12:	Messgeräte in der zweiten Versuchsphase und Wellenmaschine sowie der Modelldeich	14
Abb. 13:	Bauwerksgeometrien und Versuchsprogramm in der zweiten Projektphase	15
Abb. 14:	Ziele der Untersuchungen und zugeordnete Untersuchungen im Projektrahmen	16
Abb. 15:	Variation von H_{m0} , T_p and $R_{u2\%}$ entlang des Deichs für kurzkämmigen Seegang ($\sigma_\theta = 10^\circ$) mit schrägem Wellenangriff ($\theta = 20^\circ$)	18
Abb. 16:	Reduktionskoeffizient γ_θ in Abhängigkeit der Wellenangriffsrichtung für d. Wellenauflaufhöhe $R_{u,2\%}$	21
Abb. 17:	Korrekturkoeffizient γ_θ in Abhängigkeit von der Wellenangriffsrichtung θ für die mittlere Wellenüberlauftrate q	23
Abb. 18:	Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Projektphase	24
Abb. 19:	Relativer Wellenauflauf in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl (Wellenangriffsrichtung $\theta = 0^\circ$, Deichneigung 1 : 6)	26

Abb. 20: Einfluss der Wellenhöhen auf den relativen Wellenauflauf (Wellenangriffsrichtung $\theta = 0^\circ$, Deichneigung 1 : 6, $d = 0,5$ m).....	27
Abb. 21: Einfluss der Bezugswassertiefe (hier Tiefwasser) auf den relativen Wellenauflauf (Wellenangriffsrichtung $\theta = 0^\circ$, Deichneigung 1 : 6)	27
Abb. 22: Relative Auflaufhöhen $R_{u2\%}$ in Abhängigkeit von ξ_{op} mit Regressionsgeraden	28
Abb. 23: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus der Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 6).....	29
Abb. 24: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus allen Messungen	30
Abb. 25: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus allen Messungen – Alle Ergebnisse.....	31
Abb. 26: Relativer Wellenauflauf in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl (Neigung 1 : 3).....	32
Abb. 27: Relative Auflaufhöhen $R_{u2\%}/H_s$ in Abhängigkeit von ξ_{op} mit Regressionsgeraden für unterschiedliche Anlaufrichtungen (Neigungen 1 : 3).....	33
Abb. 28: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus den Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 3).....	34
Abb. 29: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus allen Messungen (Deichneigung 1 : 3).....	34
Abb. 30: Geometrische Parameter für ein Deichprofil mit Berme	35
Abb. 31: Relative Wellenaufbauhöhe für den 1:6 geneigten Deich mit und ohne Berme.....	36
Abb. 32: Vergleich der gemessenen Wellenaufbauhöhen mit den nach dem Verfahren von <i>Van der Meer et al. (1998)</i> berechneten Werten für Deichprofile mit Berme.....	37
Abb. 33: Relative Wellenaufbauhöhe für den Deich mit Knickprofil und 1:6 und 1:3 geneigten Deich	38
Abb. 34: Vergleich der berechneten (unter Verwendung von Gl. (24)) und gemessenen Wellenaufbauhöhen für das Knickprofil.....	39
Abb. 35: a-Koeffizienten und Reduktionskoeffizient γ_θ für alle Bauwerksgeometrien ($\xi_{eq} = \gamma_b \cdot \xi_{op}$).....	40
Abb. 36: Darstellung des Reduktionskoeffizienten γ_θ für in der Natur gemessene Wellenspektren am 1:6 Deich mit schmaler Berme	42
Abb. 37 Unterschreitungshäufigkeit des relativen Wellenaufbaus in regelmäßigen Wellen (Tautenhain, 1981)	45
Abb. 38 Relativer Wellenaufbau in Abhängigkeit vom Brecherparameter ξ_p (<i>De Waal und Van Der Meer, 1992</i>).....	45
Abb. 39: Abhängigkeit des Beiwertes von der Wellenanlaufrichtung ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell.....	49
Abb. 40: Abhängigkeit des Beiwertes von der Wellenanlaufrichtung mit Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell.....	50
Abb. 41: Abhängigkeit des Beiwertes von der Wellenanlaufrichtung mit Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell.....	51
Abb. 42: Theoretisch erwartete Richtungsfunktionen und gemessene Richtungsfunktion für eine Deichneigung 1 : 6	52
Abb. 43: Vergleich der Datensätze mit und ohne Streuung nach <i>Vinje</i>	53
Abb. 44: Verlauf des Verhältnisses der Quantilen der Datensätze mit und ohne Streuung nach <i>Vinje</i>	54

Abb. 45: Vergleich der Datensätze mit und ohne Berücksichtigung der Vorwelle	55
Abb. 46: Verlauf des Verhältnisses der Quantilen der Datensätze mit und ohne Berücksichtigung der Vorwelle ($\psi = 1$).....	55
Abb. 47 Relative Wellenhöhen vor einem Bauwerk (Reflexionsgrad 17 %, $T_p = 1,27$ s).....	56
Abb. 48 Relative Wellenhöhen vor einem Bauwerk(Reflexionsgrad 17%, langkämmige JONSWAP / TMA-Spektren)	57
Abb. 49 Gemessene signifikante Wellenhöhen vor dem Deich mit Knickprofil ($T_p = 1,27$ s).....	58
Abb. 50 Gemessene signifikante Wellenhöhen vor dem Deich mit Knickprofil ($T_p = 1,79$ s).....	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammenfassung der Untersuchungen zum Einfluss des Wellenangriffswinkels auf den Wellenauflauf an geböschten Bauwerken.....	5
Tab. 2: Zusammenstellung der relativen Abweichungen (minimale Abweichung, maximale Abweichung und mittlere Abweichung) der Messungen an den 10 Wellenpegeln bzw. Wellenauflaufpegeln entlang des Deiches.....	17
Tab. 3: Zusammenstellung der relativen Abweichungen (minimale Abweichung, maximale Abweichung und mittlere Abweichung) der Messungen an den 10 Wellenpegeln bzw. 4 Wellenüberlaufmessungen entlang des Deiches.....	19
Tab. 4: Vergleich der Streuungen $s(a)$ der Versuchsergebnisse für den dimensionslosen Koeffizienten a und Abweichung Δa der Koeffizienten a zwischen lang- und kurzkämmigen Versuchen.....	21
Tab. 5: a -Werte und γ_θ -Werte aus den Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 6).....	29
Tab. 6: a -Werte und γ_θ -Werte aus den Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 3).....	33
Tab. 7: a -Koeffizienten für Bauwerksvarianten mit Berme und Knick bei senkrechtem und schrägem Wellenangriff und Bandbreite der Streuungen.....	41
Tab. 8: Berechnete Faktoren für die Versuchsergebnisse ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell.....	49
Tab. 9: Berechnete Faktoren für die Versuchsergebnisse ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell.....	50
Tab. 10: Berechnete Faktoren für die Versuchsergebnisse mit Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell.....	51
Tab. 11 Veränderung der relativen Wellenhöhe durch Reflexionen (s.a. Abb. 47 und Abb. 48) (Reflexionsstelle Ruhewasserspiegel)	57

1 Einleitung

Seedeiche sind sehr bedeutendes Hochwasser- und Küstenschutzbauwerk. Die Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und der Anstieg des Meeresspiegels stellen die für den Deichausbau verantwortlichen Stellen vor immer neue bauliche Aufgaben und erfordern große finanzielle Mittel. Eine optimale Planung der Deichgeometrie ist daher erforderlich, damit die Deiche kommenden Sturmfluten Stand halten können. Für eine sichere und ökonomische Bemessungspraxis ist die Berücksichtigung möglichst vieler der in der Natur vorkommenden Randbedingungen unumgänglich, um bei der Bemessung eine optimale Kronenhöhe zu gewährleisten. Zu diesen Randbedingungen gehören u.a. die natürliche Form der Seedeiche mit Knicken und Bermen, der natürliche Charakter des Seegangs und die möglichen Richtungen der einlaufenden Wellen. Untersuchungen zum schrägen Wellenauflauf wurden in der Vergangenheit meist nur an idealisierten Deichprofilen mit glatter durchgehender Deichoberfläche durchgeführt und unterlagen bislang breiten Streuungen, die eine sichere Bemessung für schrägen Wellenauflauf nur unzureichend ermöglichten. Neben der schrägen Angriffsrichtung der einlaufenden Wellen entsprechen die real existierenden Deiche jedoch nicht immer den bislang untersuchten idealisierten Geometrien, Deiche mit Bermen oder Knicken sind keine Seltenheit.

Das BMBF Forschungsprojekt „Schräger Wellenauflauf an Seedeichen“ wurde 1999 gemeinsam vom Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig und dem Franzius-Institut der Universität Hannover initiiert. Anlass hierfür war, dass über den tatsächlichen Einfluss der Wellenangriffsrichtung auf die Wellenauflaufhöhe an typischen flachgeneigten Deichprofilen noch große Unsicherheiten im Schrifttum bestanden. Diese Unsicherheiten liegen z.T. an den Streuungen der Messungen in Wellenbecken und in der Natur, die nicht nur präzise Aussagen nicht zuließen sondern auch zu widersprüchlichen Ergebnissen führten. Daher lag ein Schwerpunkt der Untersuchungen auf der exakten Ermittlung der Eingangssparameter und der Wellenauflaufhöhe. Das gesamte Projekt war unterteilt in zwei Arbeitsphasen. In der ersten Projektphase wurde am 1:6 geneigten Deich grundlegend untersucht, ob signifikante Unterschiede beim schrägen Wellenauflauf für kurz- und langkämmigen Seegang bestehen und anschließend eine empirische Richtungsfunktion zur Beschreibung des schrägen Wellenangriffs entwickelt.

In der zweiten Projektphase wurden weitere Versuche am 1:6 Deich durchgeführt, um die Erkenntnisse der Grundlagenversuche der ersten Phase zu verifizieren und anschließend wurde der schräge Wellenauflauf für weitere Bauwerksgeometrien (Deiche mit Bermen, Knickprofil) untersucht. Diese Versuche sollten zeigen, ob die ermittelte Funktion zur Beschreibung des Einflusses des schrägen Wellenangriffs auch für komplexere Deichgeometrien angewandt werden kann. Im folgenden Abschnitt wird der allgemeine Zusammenhang, in dem die Untersuchungen durchgeführt wurden, dargestellt. Dazu werden zunächst die Parameter vorgestellt, die den Wellenauflauf an Seedeichen beeinflussen und die wesentlichen Definitionen zum Wellenauflauf gegeben. Auf Grundlage einer kurzen Zusammenstellung des Wissensstandes beim Start des Projektes wird die Zielsetzung erläutert. Außerdem wird aufgezeigt, welche Vorgehensweise und Methodik gewählt wurde, um diese Ziele zu erreichen. Die

kleinmaßstäblichen Modellversuche der ersten Projektphase wurden im Wellenbecken des NRC-CHC in Ottawa, Kanada durchgeführt, die Modellversuche der zweiten Projektphase im Wellenbecken des Franzius-Instituts der Universität Hannover. Der Modellaufbau und die Messeinrichtungen während der zwei Projektphasen werden im dritten Abschnitt beschrieben, ebenso wie auch die gewählten Versuchsprogramme.

Im vierten Abschnitt werden die Ergebnisse der Modelluntersuchungen der ersten und zweiten Projektphase dargestellt und diskutiert. Der Einfluss der Wellenangriffsrichtung wird für verschiedene Seegangformen und Bauwerkstypen beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind detailliert in den Teilberichten des Projektes (*Oumeraci et al. 2001, 2002*) dargestellt. In diesem Abschlußbericht werden die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen aus den einzelnen Teilberichten zusammengefasst. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Allgemeiner Zusammenhang

Für die Festlegung der Kronenhöhe von Seedeichen ist neben dem maßgebenden Bemessungswasserstand auch die Wellenauflaufhöhe zu berücksichtigen. Diese ist im wesentlichen vom angreifenden Seegang und der Geometrie des Deiches, aber auch von anderen weiteren Parametern, die in Abbildung 1 dargestellt sind, abhängig. Dabei haben beim Seegang neben den Parametern Wellenhöhe und Wellenperiode die Wellenangriffsrichtung und die Form des Wellenspektrums bzw. die Vorwellen einen Einfluss auf die Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%}$, die von 2% aller einlaufenden Wellen überschritten wird. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden der Einfluss des Seegangs und der Deichgeometrie auf den Wellenauflauf näher untersucht.

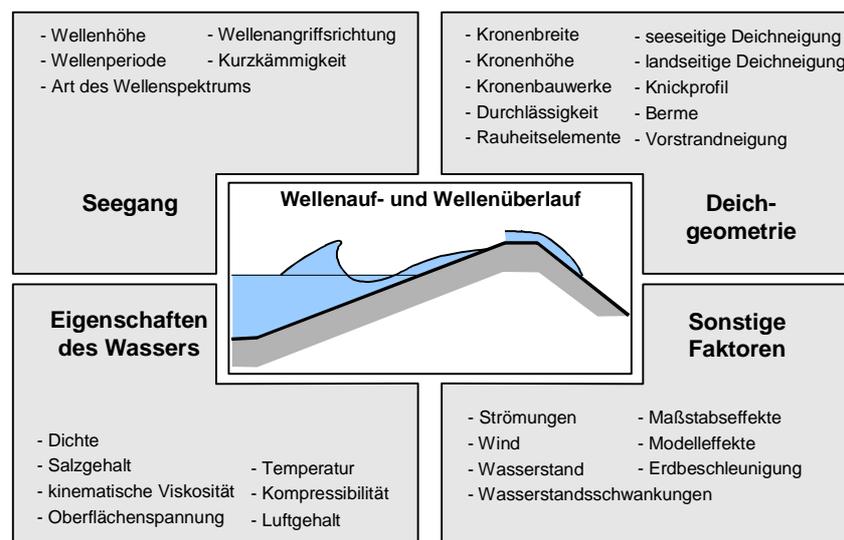


Abb. 1: Einflussfaktoren auf den Wellenauf- und Wellenüberlauf

In Abbildung 2 sind der einlaufende Seegang sowie die Wellenauflaufhöhe im Querschnitt dargestellt, während die Draufsicht die schräge Wellenangriffsrichtung und die Kurzkämmigkeit zeigt. Der einlaufende Seegang wird durch die Wellenperiode T und die Wellenhöhe

H, die Kurzkämmigkeit σ , die Form des Wellenspektrums (theoretisches Wellenspektrum, in der Natur gemessenes Wellenspektrum) und die Wellenangriffsrichtung θ beschrieben.

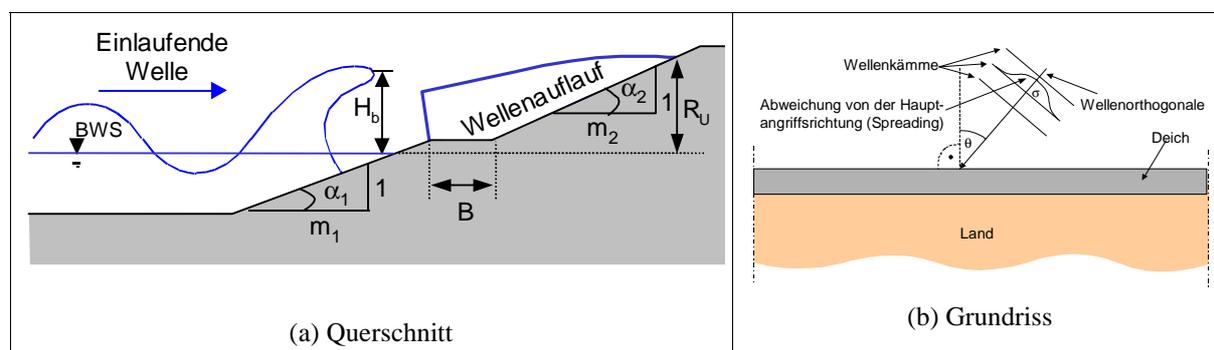


Abb. 2: Definition des Wellenauflaufes und der schrägen Wellenangriffsrichtung

Auf der Grundlage des Wissensstandes zum Projektbeginn bestanden noch Unsicherheiten über den tatsächlichen Einfluss der Wellenangriffsrichtung auf die Wellenauflaufhöhe an typischen flachgeneigten Deichprofilen bei verschiedenen Seegangformen (kurzkämmig, langkämmig, regelmäßig) und Wellenspektren (theoretische und in der Natur gemessene Wellenspektren). Diese Unsicherheiten liegen z.T. an der Streuung der Messungen in Wellenbecken und in der Natur, die präzise Aussagen nicht zulassen und zu widersprüchlichen Ergebnissen führten. Daher war ein wesentlicher Inhalt dieses Forschungsprojektes die möglichst exakte Ermittlung der Eingangsparameter und der Wellenauflaufhöhe unter Reduktion bzw. Berücksichtigung störender Modelleffekte.

2.1 Stand der Forschung beim Start des Projektes

Zahlreiche Modelluntersuchungen wurden bislang zum Wellenauflauf und Wellenüberlauf an Seedeichen durchgeführt. Dabei wurde nicht nur der Einfluss der Seegangparameter (Wellenhöhe, Wellenperiode) berücksichtigt, sondern viele Arbeiten hatten auch zum Ziel, den Einfluss verschiedener Deichgeometrien (Berme, Vorstrand, Knickprofile, Böschungsrauheit, Aufsatzmauer, etc.) auf den Wellenauflauf zu ermitteln.

Ein wesentlicher Einflussfaktor - die Richtung des Seegangs - wurde nur selten untersucht. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass entsprechende Versuchseinrichtungen (Wellenbecken) nicht vorhanden waren, bzw. ein erheblicher Aufwand für diese Modelluntersuchungen erforderlich ist. Daher waren die Kenntnisse zum Zeitpunkt des Projektstarts hierzu noch sehr gering und die Ansätze im Schrifttum für die Anwendung bei praktischen Fällen unsicher.

Das Bemessungsverfahren, das z.Zt. dem Kenntnisstand am besten entspricht, ist das Verfahren nach *Van der Meer et al. (1995, 1998)* zur Berechnung der Wellenauflaufhöhe. Es hat die Wellenauflaufformel nach *Hunt (1959)* als Grundlage und wurde durch zahlreiche Modellversuche zu den Einflussfaktoren (s. Abb. 1) auf den Wellenauflauf in verschiedenen Wasserbaulaboratorien überprüft und erweitert. Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens für die deutschen See- und Stromdeiche wird auch im Rahmen der *Empfehlungen A2 „Wellenauf- und Wellenüberlauf“ des Arbeitsausschusses für Küstenschutzwerke der Hafentechnischen Gesellschaft* empfohlen. Die einzelnen Einflussfaktoren werden durch die Einfüh-

rung von Korrekturkoeffizienten γ_i in die Wellenaufformel berücksichtigt. Für den schrägen Wellenauflauf $R_{u\theta}$ bedeutet dies, dass er wie folgt aus dem küstennormalen Wellenauflauf $R_{u, \text{normal}} (\theta=0^\circ)$ ermittelt wird:

$$(1) \quad R_{u\theta} = \gamma_\theta \cdot R_{u, \text{normal}}$$

mit γ_θ = Korrekturkoeffizient für den Einfluss der schrägen Wellenangriffsrichtung

Beim Wellenüberlauf wird die Freibordhöhe R_C wie folgt angepasst, um den schrägen Wellenauflauf zu berücksichtigen:

$$(2) \quad R_C^* (\text{schräg}) = \frac{R_C}{\gamma_\theta}$$

Die Berechnungsmethode basiert ursprünglich auf den Untersuchungen von *Owen (1980)*.

Die vorhandenen Ansätze zur Implementierung der Wellenangriffsrichtung in die Ermittlung der Wellenauflaufhöhe unterliegen breiten Streuungen (s. Abb. 3 und Tab. 1). Insbesondere im Bereich kleiner Wellenangriffswinkel ($\theta < 40^\circ$), die in den meisten Fällen für eine Bemessung maßgebend sind, bestehen Unsicherheiten darüber, ob es zu einer Erhöhung oder einer Reduktion gegenüber dem küstennormalen Wellenangriff kommt. *Owen (1980)*, *Tautenhain (1982)* und *Van der Meer u. De Waal (1993)* für Deiche, *Juhl u. Sloth (1994)* für geschüttete Wellenbrecher und *Hiraishi et al. (1996)* für senkrechte Wände finden unabhängig voneinander eine Erhöhung des Wellenauflaufes bzw. Wellenüberlaufes bei kleinen Wellenangriffswinkeln und langkämmigem Seegang. Dies ist umso bemerkenswerter, da die Randbedingungen der verschiedenen Untersuchungen sehr unterschiedlich sind.

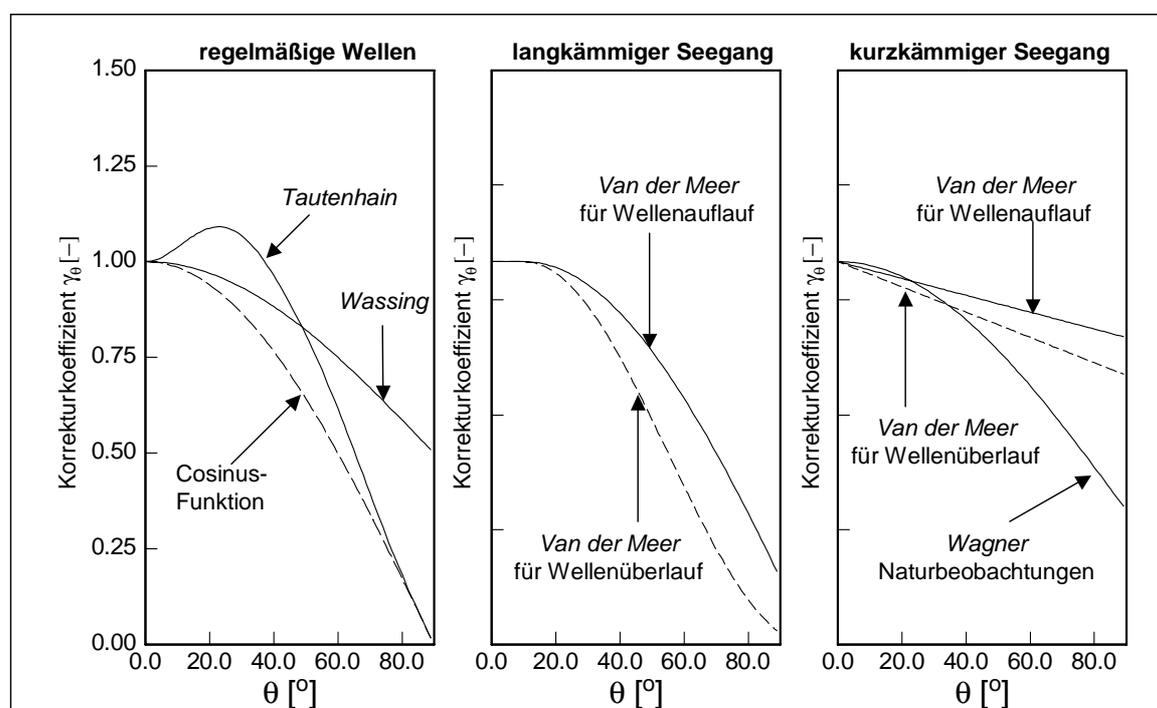


Abb. 3: Vergleich vorhandener Ansätze zur Berücksichtigung des schrägen Wellenangriffs auf den Wellenauflauf für Seedeiche

Tab. 1: Zusammenfassung der Untersuchungen zum Einfluss des Wellenangriffswinkels auf den Wellenauf-
lauf an geböschten Bauwerken

Autor	Jahr	Bauwerk	Wellen	Koeffizient
<i>Wassing</i>	1957	Deich	regelmäßig	$\gamma_{\theta} = \frac{1 + \cos \theta}{2}$
<i>Shidorova</i>	1960	Deich	regelmäßig	$\gamma_{\theta} = \frac{1}{1 + \cos^2 \alpha \cdot \tan^2 \theta}$
<i>Hosoi u. Shuto</i>	1964	1:2 Böschung	regelmäßig	-
<i>Wagner u. Bürger</i>	1973	Deich	(Natur- beobachtung)	$\gamma_{\theta} = 0,35 + 0,65 \cos \theta$
<i>Tautenhain</i>	1981	1:6 Deich	regelmäßig	$\gamma_{\theta} = \cos \theta \cdot \sqrt[3]{2 - \cos^3(2 \cdot \theta)}$
<i>De Waal u. Van der Meer</i>	1992	Deich	langkämmig kurzkämmig	- $\gamma_{\theta} = 1 - 0,0022 \cdot \theta$
<i>Van der Meer u. Janssen</i>	1995	Deich	langkämmig	$\gamma_{\theta} = \cos(\theta - 10^\circ)$ mit $\gamma_{\theta} > 0,6$
<i>Murphy et al.</i>	2001	1:6 Deich	langkämmig kurzkämmig	$\gamma_{\theta} = 1 - 0,0095 \cdot \theta$ -

Eine physikalische Erklärung für die Erhöhung des Wellenauflaufes infolge schräger Wellenangriffsrichtung und langkämmigen Seegangs wurde bislang nicht gegeben. Bei kurzkämmigem Seegang, für den bislang nur wenige Untersuchungen vorliegen (*Van der Meer et al. (1995, 1998)* für Deiche und *Franco et al. (1995)* für Hochwasserschutzwände), wurde eine Erhöhung des Wellenauflaufes bzw. Wellenüberlaufes noch nicht dokumentiert. Es kann vermutet werden, dass auch die Abfolge der Wellen im Wellenzug die Wellenauflaufhöhe und die Wellenüberlauftrate beeinflusst („Vorwelleneinfluss“). Im Rahmen der Untersuchungen sollte also ermittelt werden, ob und wie es zu einer Erhöhung des Wellenauflaufes (Wellenüberlaufes) infolge schrägen Wellenangriffs für langkämmigen Seegang kommen kann und warum dieser Effekt bei kurzkämmigem Seegang - laut Schrifttum - nicht auftritt. Die Wirkung gemessener Wellenspektren (Naturspektren) auf den Wellenauflauf ist bislang nicht untersucht worden und sollte daher ebenfalls untersucht werden.

2.2 Zielsetzung und Vorgehen

Das Hauptziel des Forschungsprojektes war die systematische Untersuchung des Einflusses von schrägem Wellenangriff auf die Wellenauflaufhöhe an Seedeichen. Damit sollten die Grundlagen für eine Bemessung und konstruktive Gestaltung von geböschten Küstenschutzbauwerken verbessert werden. Dazu wurden die folgenden Teilaspekte unter gleichzeitiger Berücksichtigung der schrägen Wellenangriffsrichtung untersucht:

- i) Einfluss der Richtungsstruktur des Seegangs,
- ii) Einfluss verschiedener Seegangparameter und in der Natur gemessener Wellenspektren
- iii) Einfluss der Bauwerksgeometrie auf die Wellenauflaufhöhe bei Seedeichen.

Zu Beginn des Projektes wurde daher ein Projektablaufplan aus zwei Phasen erstellt, der in Abbildung 4 dargestellt ist.

Im Rahmen der ersten Projektphase wurden Modellversuche an einer durchgehend 1:6 geneigten glatten Böschung im Wellenbecken des NRC/Kanada mit kurz- und langkämmigem Seegang und Wellenangriffsrichtungen zwischen 0 und 40° durchgeführt. Nach der Projektphase 1 wurden die Ergebnisse der ersten Untersuchungen vorgestellt.

Da keine Unterschiede beim Wellenauflauf zwischen Versuchen mit langkämmigem und Versuchen mit kurzkämmigem Seegang festgestellt wurden, konnte das Forschungsprojekt in Absprache mit der KFKI-Projektgruppe im Wellenbecken des Franzius-Instituts, in dem nur langkämmiger Seegang erzeugt werden kann, mit der Untersuchung von weiteren Deichprofilen fortgesetzt werden (Projektphase 2).

Abschließend sollte ein Bemessungsansatz für schrägen Wellenangriff auf Basis der Ergebnisse beider Projektphasen ermittelt werden.

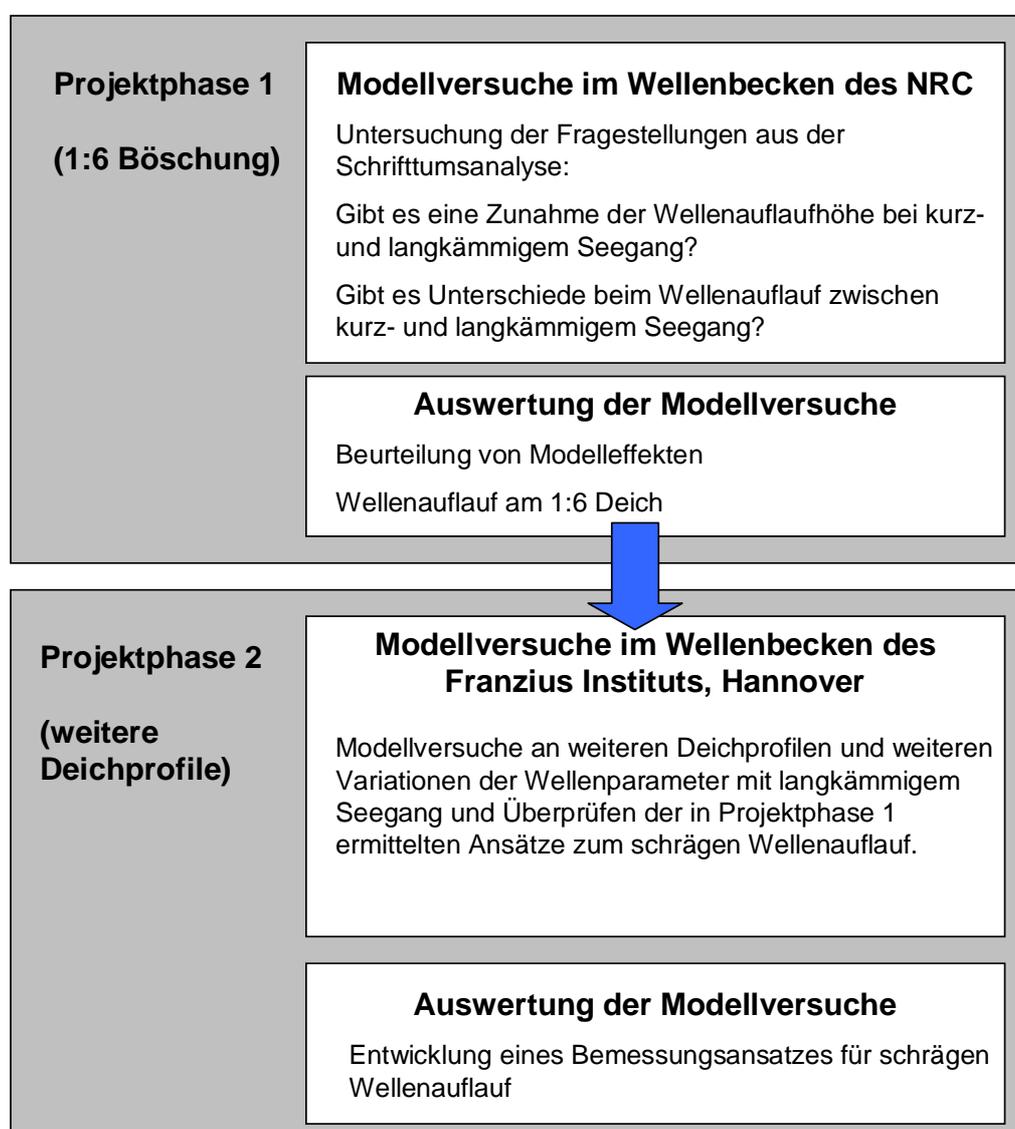


Abb. 4: Projektablaufplan „Schräger Wellenauflauf an Seedeichen“

Aufbauend auf dem Projektablaufplan (Abb. 4) wurde das Vorgehen und die Zielsetzung der ersten Projektphase entwickelt. Die Ziele und Vorgehen dieser ersten Phase sind in Abbildung 5 dargestellt.

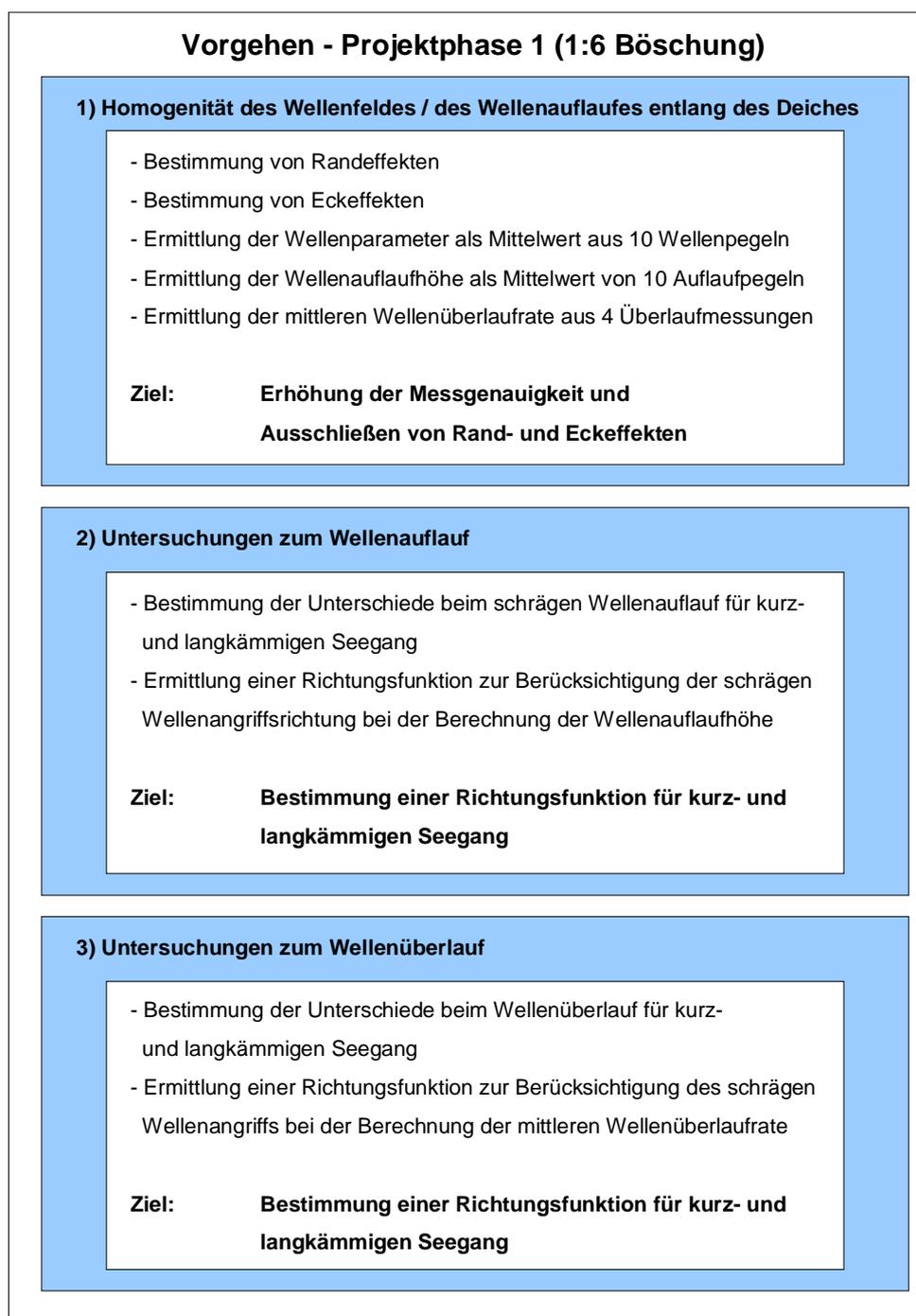


Abb. 5: Ziele der Modellversuche und Vorgehen bei der Auswertung in der ersten Projektphase

In der zweiten Projektphase wurden die Untersuchungen der ersten Phase weitergeführt und um Deichgeometrien mit Berme erweitert. Dabei wurde das in Abbildung 6 dargestellte Vorgehen genutzt, um abschließend einen Bemessungsansatz für schrägen Wellenauflauf zu entwickeln, der auch für komplexere Geometrien angewandt werden kann.

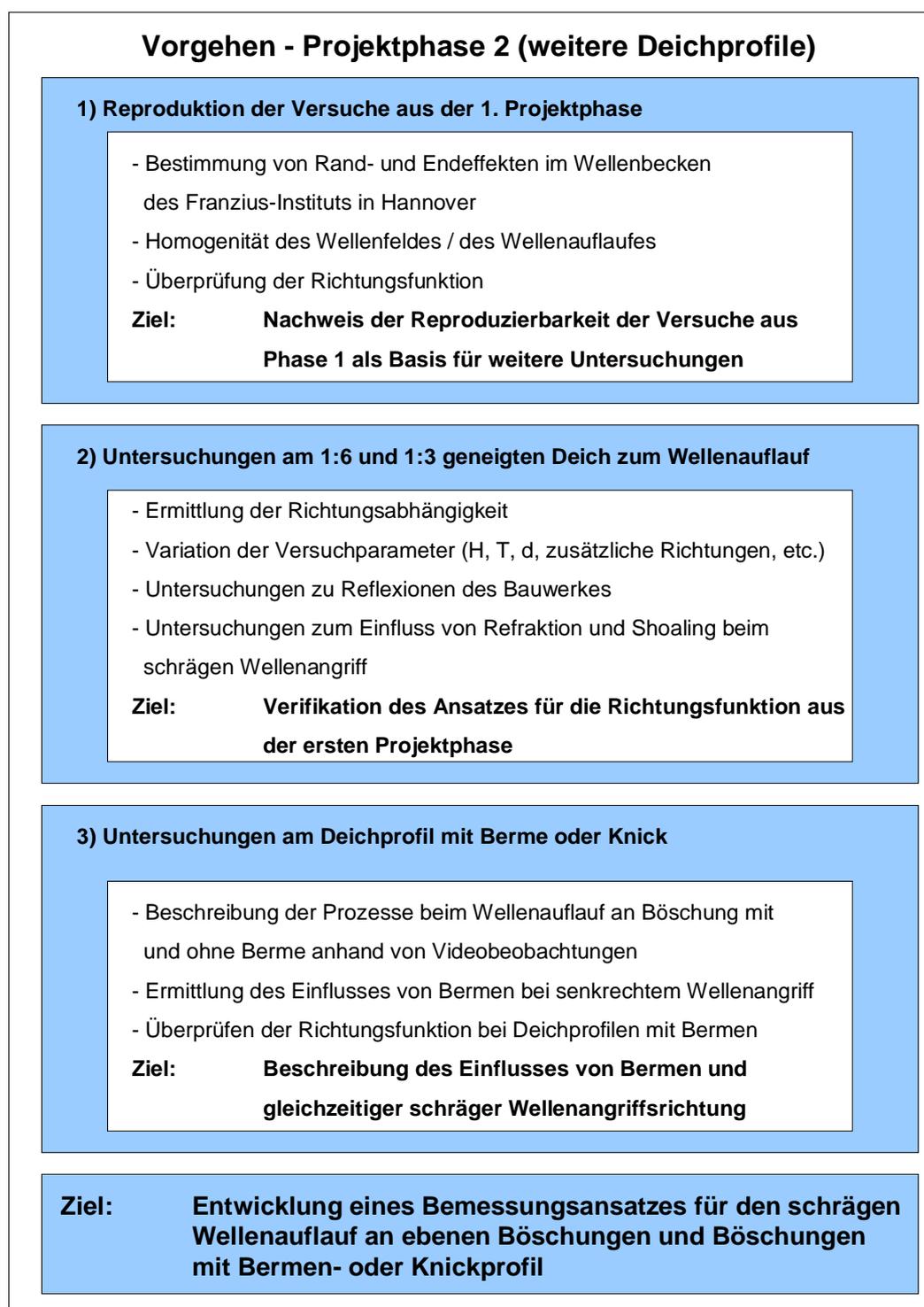


Abb. 6: Ziele der Modellversuche und Vorgehen bei der Auswertung in der zweiten Projektphase

Die wesentlichen Ergebnisse dieses Forschungsprojektes sind im vorliegenden Abschlußbericht dargestellt. Ausführlichere Beschreibungen der Modellversuche, Analysen und Ergebnisse sind in den vier Teilberichten, die im Rahmen des Forschungsprojektes erstellt wurden, zu finden. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die wesentlichen Inhalte dieser Teilberichte:

- Teilbericht 1: *Oumeraci, H.; Zimmermann, C.; Schüttrumpf, H.; Daemrich, K.-F.; Möller, J.; Ohle, N. (2001)* Influence of oblique wave attack on wave run-up and wave overtopping – 3D model tests at NRC/Canada with long- and shortcrested waves -
- Teilbericht 2: *Zimmermann, C.; Oumeraci, H.; Ohle, N.; Möller, J.; Daemrich, K.-F. (2002)* Untersuchungen zum Einfluss von Wellenparametern, Wasserständen und Deichneigungen auf den schrägen Wellenauflauf
- Teilbericht 3: *Oumeraci, H.; Zimmermann, C.; Möller, J.; Daemrich, K.-F.; Kübler, S.; Ohle, N. (2002)* Einfluss von Bermen und Knicken im Deichquerschnitt auf den schrägen Wellenauflauf – Ergebnisse der Modellversuche -
- Teilbericht 4: *Zimmermann, C.; Oumeraci, H.; Daemrich, K.-F.; Möller, J.; Ohle, N. (2002)* Theoretische Untersuchungen und Überlegungen zum schrägen Wellenauflauf

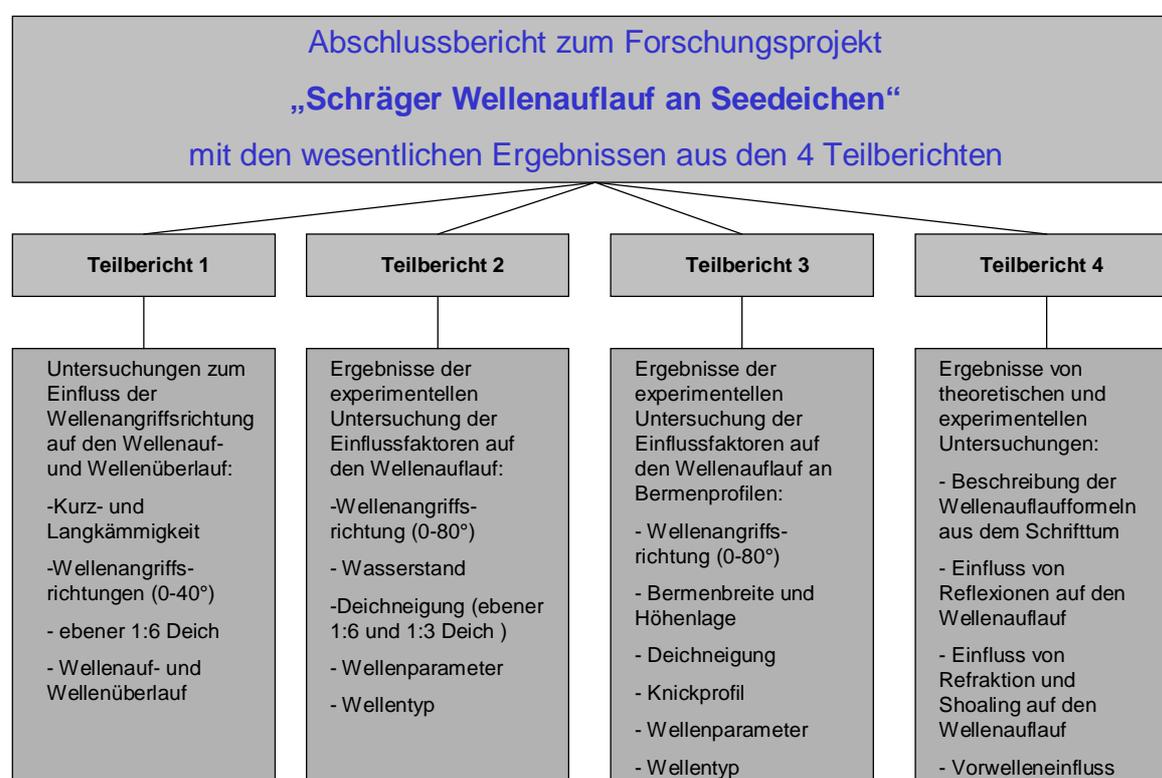


Abb. 7: Übersicht der Inhalte aus den vier Teilberichten zum Forschungsprojekt „Schräger Wellenauflauf an Seedeichen“

3 Beschreibung der Modellversuche und Versuchsprogramm

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden kleinmaßstäbliche 3D Modellversuche in zwei Wellenbecken durchgeführt:

- Wellenbecken des NRC – CHC in Ottawa/Kanada (Projektphase 1)
- Wellenbecken Marienwerder (WBM) des Franzius Instituts der Universität Hannover (Projektphase 2)

3.1 Beschreibung der Modellversuche aus Projektphase 1

Die Modellversuche der ersten Projektphase wurden im Wellenbecken des NRC-CHC durchgeführt. Das Wellenbecken ist 30 m lang und 20 m breit und verfügt über eine aus 60 Teilsegmenten bestehende Wellenmaschine, mit der kurz- und langkämmiger Richtungsseegang erzeugt werden kann. Der Modelldeich wurde in einer Gesamtlänge von 20 m unter einem Winkel von 20° im Wellenbecken eingebaut (Abb. 8). Durch die Ausrichtung der Bauwerksachse von 20° gegenüber der Wellenmaschinenachse ist auch bei den Versuchen mit einem Anlaufwinkel von 40° nur eine mittlere Richtungsabweichung von 20° bei der Wellenerzeugung erforderlich und es kann so eine sonst stärkere systembedingte Einschränkung der Homogenität des Wellenfeldes vermieden werden.

An den senkrechten Seitenteilen des Versuchseinbaus wurde als Übergang eine 1 : 2 geneigte Schotterböschung angeordnet, um Refraktions- und Diffraktionseffekte abzumindern. Der eigentliche Messbereich, eingegrenzt durch die Anordnung von 10 Auflaufpegeln im Abstand von 1 m, lag mittig, jeweils 5,5 m von den Bauwerksenden entfernt. Der untere Teil des Deiches bestand bis zur Höhe der für die Überlaufversuche vorgesehenen Deichkrone (0,6 m über Sohle) aus Estrich auf einem Schotterkern. Der höher liegende Teil wurde aus Sperrholz auf einer Tragkonstruktion aus Profilhölzern ausgeführt.

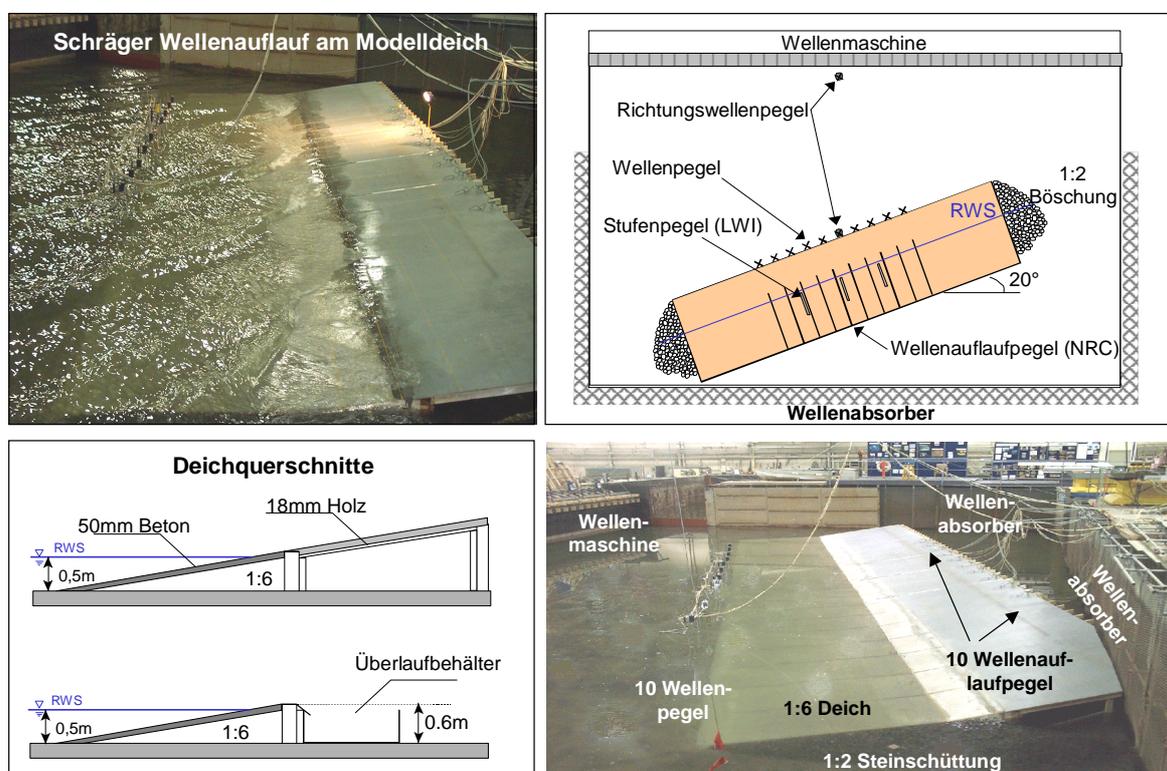


Abb. 8: Übersicht über den Modelldeich der Projektphase 1 einschließlich der installierten Messgeräte im Wellenbecken des NRC

Für die Messung der einlaufenden Wellen wurden am Böschungsfuß 10 Wellenpegel installiert. Zusätzlich befand sich ein Richtungswellenpegel vor der Wellenmaschine und ein weiterer am Deichfuß in der Mitte des Messfeldes, diese Pegel dienen zur Bestimmung der Richtungsstruktur des einlaufenden Seegangs. Der Wellenauflauf wurde mit zwei verschiedenen Messsystemen erfasst, zum einen wurden Drahtpegel des NRC verwendet, die eine analoge stufenlose Aufzeichnung des Wellenaufbaus ermöglichen und zum anderen wurden digitale Stufenpegel verwendet, die am LWI konstruiert wurden. Um einen möglichst breiten Bereich des Wellenaufbaus auf dem Deich zu erfassen, wurden 10 analoge Auflaufpegel im Abstand von je 1 m und dazwischen 3 digitale Auflaufpegel in der Mitte der Böschung angeordnet. Für die anschließenden Messungen des Wellenüberlaufs wurde der obere Teil der Konstruktion entfernt und eine Kronenhöhe von 0,6 m der Böschung eingestellt.

Hinter der Krone befanden sich 4 Überlaufbehälter, in denen die Überlaufwassermenge mit Schichtdickenpegeln erfasst wurde. Die verwendeten Messgeräte sind in Abbildung 9 dargestellt. Alle Versuche wurden mit einer Videokamera aufgezeichnet, die einen Gesamtüberblick über das Bauwerk und die Wellen lieferte und ausgewählte Versuche wurden zusätzlich mit einer weiteren Videokamera erfasst, wobei nur ein bestimmtes Messfeld auf der Böschung beobachtet wurde. Eine detailliertere Beschreibung des Versuchsaufbaus ist bei *Oumeraci et al. (2001)* gegeben.

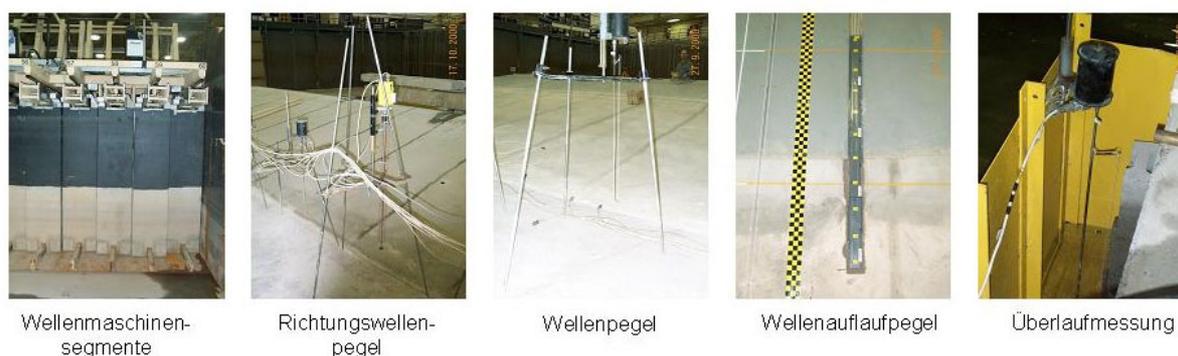


Abb. 9: Eingesetzte Messgeräte in der ersten Projektphase

Das Versuchsprogramm wurde so ausgewählt, dass vor allem der Einfluss von Wellensteilheit, Wellenangriffsrichtung und Lang- und Kurzkämmigkeit auf den Wellenauflauf und -überlauf ermittelt werden konnten. Alle Versuche wurden an einer ebenen und glatten 1 : 6 Böschung in konstanter Wassertiefe von $d = 0,5$ m durchgeführt. Die Wellenhöhe wurde für alle Versuche konstant zu $H_{m0} = 0,1$ m gewählt, während 4 verschiedene Wellenperioden ($T_P = 1,26$ s; 1,46 s; 1,78 s; 2,53 s) untersucht wurden. Die Wellenangriffsrichtung wurde bis zu einem Winkel von 20° in 5° Schritten und bis zum maximalen untersuchten Wellenangriffswinkel von 40° in 10° Schritten für das gewählte TMA-Spektrum verändert.

Der Einfluss der Richtungsstruktur des Seegangs (langkämmiger bzw. kurzkämmiger Seegang) wurde mit unterschiedlichen Breiten der Energieverteilung um die mittlere Richtung, dem so genannten „Spreading“ σ_θ von 0° , 10° , 20° und 30° untersucht. Das detaillierte Versuchsprogramm, das sowohl für die Wellenauflaufversuche als auch für die Wellenüberlaufversuche verwendet wurde, ist in der Abbildung 10 dargestellt.

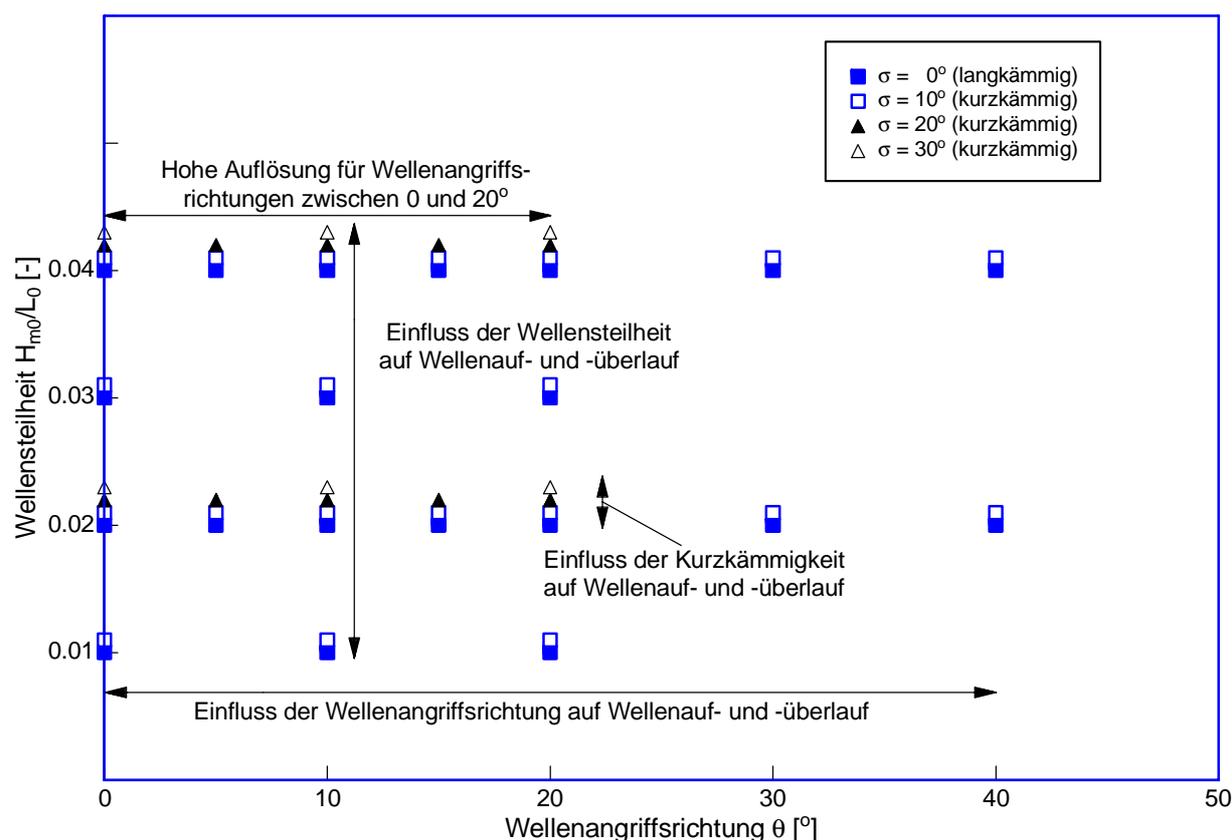


Abb. 10: Versuchsprogramm der ersten Projektphase (Wellenauf- und Wellenüberlaufversuche)

3.2 Beschreibung der Modellversuche aus Projektphase 2

Die Modellversuche der zweiten Projektphase wurden im Wellenbecken des Franzius-Instituts der Universität Hannover durchgeführt. Das Wellenbecken hat eine Länge von 45 m, eine Breite von 24 m und kann bis zu einer maximalen Wassertiefe von 0,7 m befüllt werden. Die Wellenmaschinen wurden vom DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI) entwickelt. Die Wellenmaschine besteht aus getrennt steuerbaren beweglichen Einzelelementen mit einer Gesamtbreite von rd. 25 m. Die Platten der Wellenmaschinen werden durch Ölhydraulikzylinder bewegt.

Im Wellenbecken wurde ein Deich mit einer Gesamtlänge von 15m eingebaut. Um Untersuchungen für Wellenangriffsrichtungen zwischen 0° und 80° durchführen zu können, wurde der Modelldiich drehbar konstruiert. Das Drehgestell bestand aus einer Stahl- und Holzkonstruktion, die Deichoberfläche aus Wasserbauplatten, die mit einem Anstrich versehen waren. Das Wellenbecken und der Versuchsaufbau einschließlich der Positionen der eingebauten Messgeräte sind in Abbildung 11 dargestellt.

Der Modellaufbau ermöglichte einen schnellen Umbau der Bauwerksvarianten, insgesamt wurden in der zweiten Versuchsphase die folgenden Geometrien untersucht:

- i) Variante A: durchgehender 1:6 geneigter Deich
- ii) Variante B: 1:6 geneigter Deich mit Berme, Bermbreite $B=0,30\text{m}$
- iii) Variante C: 1:6 geneigter Deich mit Berme, Bermbreite $B=0,60\text{m}$
- iv) Variante D: durchgehender 1:3 geneigter Deich
- v) Variante E: 1:3 geneigter Deich mit Berme, Bermbreite $B=0,30\text{m}$
- vi) Variante F: Knickprofil (untere Neigung 1:6 , obere Neigung 1:3)

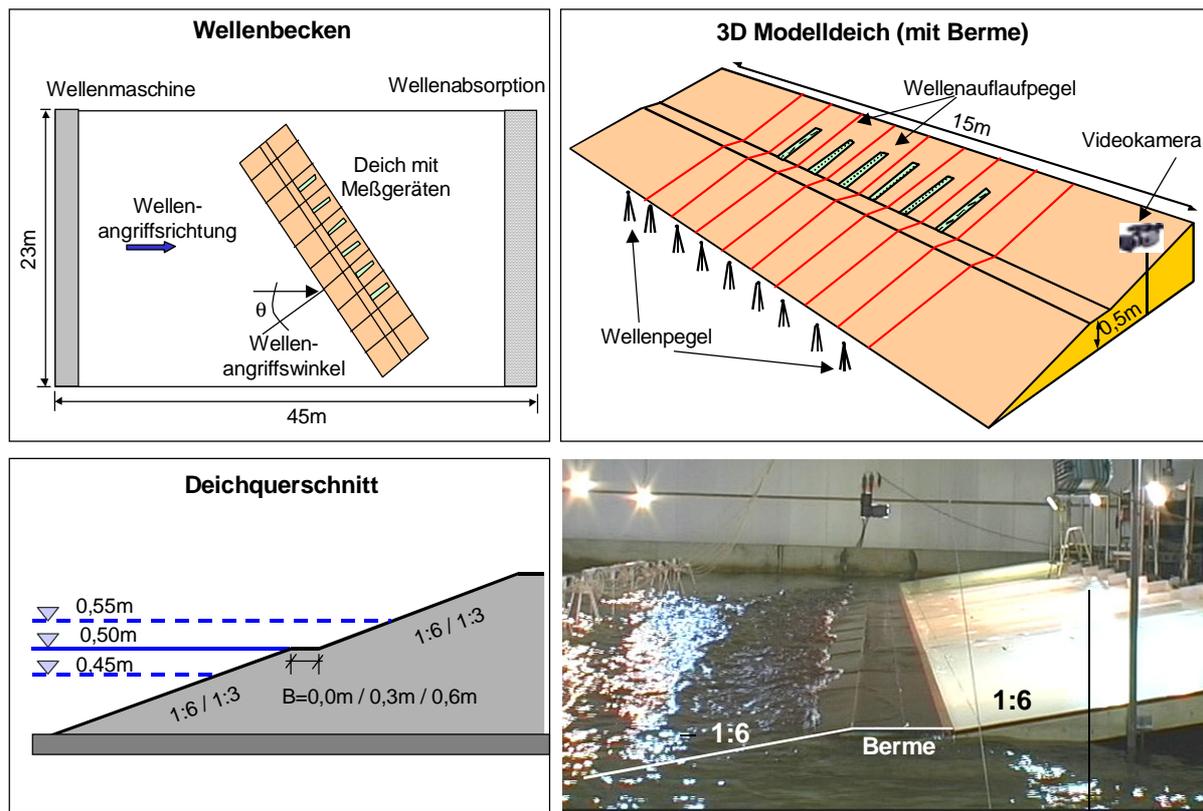


Abb. 11: Übersicht über den Modelldeich der Projektphase 1 einschließlich der installierten Messgeräte im Wellenbecken des Franzius-Instituts

Für die Ermittlung der Wellenparameter am Deichfuß wurden 10 Wellenpegel installiert. Die Wellenauflaufhöhe wurde mit zwei Messsystemen bestimmt, mit den digitalen Wellenauflaufpegeln des LWI, die auch in der Projektphase 1 verwendet wurden und mit analogen Drahtpegeln des FI, von denen 10 Pegel auf dem Deich angeordnet waren.

Die Messgeräte waren auch bei diesen Versuchen in der Mitte des Deiches angeordnet, um Effekte an den Rändern des Deiches, die den Wellenauflauf beeinflussen könnten, nicht zu erfassen. Alle Versuche wurden zusätzlich mit einer Videokamera aufgezeichnet, die sich an der Seite des Deiches befand (s. Abb. 11, oben rechts). Die Messgeräte sowie eine Ansicht des Wellenbeckens und der Wellenmaschine sind in Abbildung 12 dargestellt.



Abb. 12: Messgeräte in der zweiten Versuchsphase und Wellenmaschine sowie der Modelldeich

Das Versuchsprogramm wurde so ausgewählt, dass zunächst am 1:6 geneigten Deich die Versuche der ersten Projektphase, die im Wellenbecken des NRC durchgeführt wurden, im Wellenbecken in Hannover wiederholt wurden, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Phase 1 zu überprüfen.

Anschließend wurden weitere Parametervariationen für den 1 : 6 Deich vorgenommen (Wellenangriffsrichtungen bis 80° , Variation des Wasserstandes, der Wellenhöhen, Naturspektren, etc.).

Außerdem wurden weitere Geometrien, wie sie in Abbildung 13 dargestellt sind, untersucht. Für alle Bauwerksgeometrien wurden neben den theoretischen Wellenspektren auch Einzelwellen, regelmäßige Wellen sowie Naturspektren untersucht.

Das detaillierte Versuchsprogramm ist in den Teilberichten gegeben. Am 1:6 geneigten Deich und am Knickprofil wurden außerdem Reflexionsmessungen zur Bestimmung des Reflexionskoeffizienten durchgeführt. Bei den Versuchen der zweiten Phase gab es ein breiteres Versuchsprogramm, dass aufgrund der laufenden Ergebnisauswertung während der Versuchsphase angepasst wurde.

Die Versuchsdauer betrug bei den theoretischen Wellenspektren zwischen 1300s für $T_p=1,27s$ und 2600s für $T_p=2,53s$ (1 Wellenzyklus = $1000 T_p$). Die Versuche mit regelmäßigen Wellen hatten eine Versuchsdauer von 180s. Die Messdauer wurde für alle Versuche etwas länger als die Versuchsdauer ausgewählt, um bei der Analyse einen Zeitbereich wählen zu können, in dem alle Wellen erfasst werden. Die Daten wurden mit einer Abtastfrequenz von 20Hz von der Messwerterfassung aufgezeichnet.

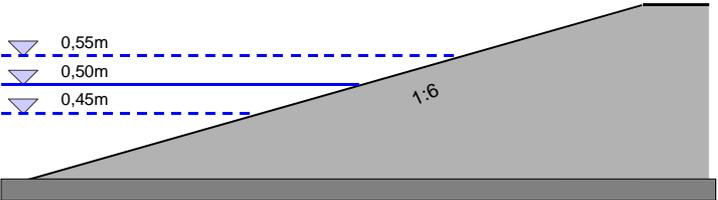
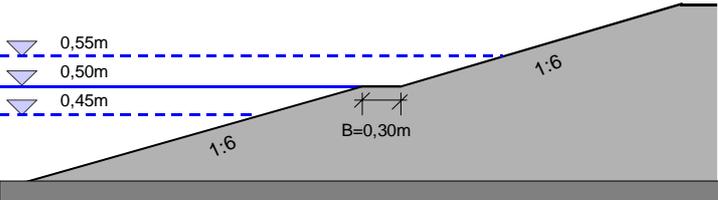
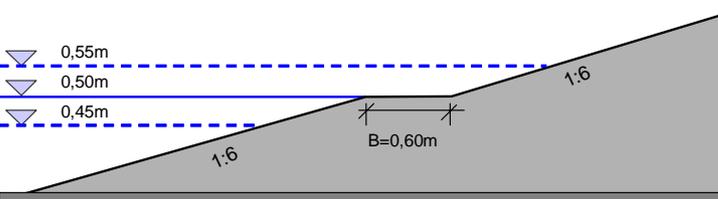
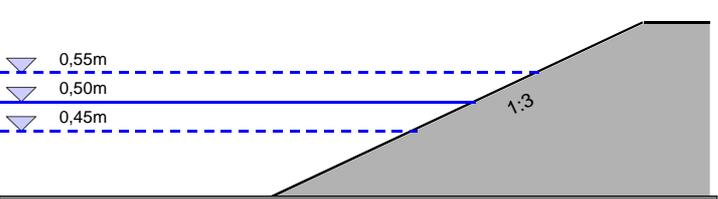
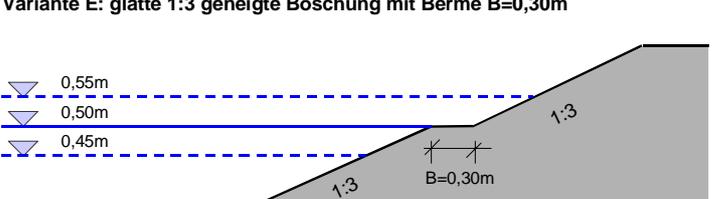
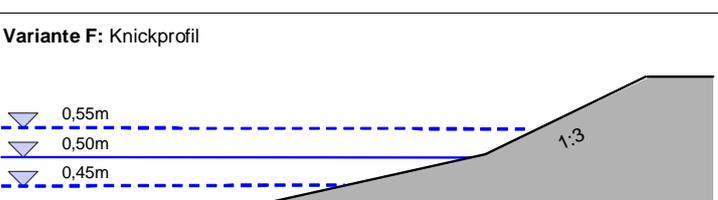
<p>Variante A: glatte 1:6 geneigte Böschung</p> 	<p>Kombinationen aus den folgenden Versuchsparametern: $d = 0,45; 0,50; 0,55\text{m}$ $H_S = 0,05; 0,10; 0,15\text{m}$ $T_P = 1,27; 1,46; 1,79; 2,53\text{s}$ $\theta = 0^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ; 25^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 45^\circ; 50^\circ; 60^\circ; 70^\circ; 80^\circ$</p>
<p>Variante B: glatte 1:6 geneigte Böschung mit Berme, B=0,30m</p> 	<p>Kombinationen aus den folgenden Versuchsparametern: $d = 0,45; 0,50; 0,55\text{m}$ $H_S = 0,10\text{m}$ $T_P = 1,27; 1,79\text{s}$ $\theta = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 40^\circ; 60^\circ; 80^\circ$</p>
<p>Variante C: glatte 1:6 geneigte Böschung mit Berme, B=0,60m</p> 	<p>Kombinationen aus den folgenden Versuchsparametern: $d = 0,45; 0,50; 0,55\text{m}$ $H_S = 0,10\text{m}$ $T_P = 1,27; 1,79\text{s}$ $\theta = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 40^\circ; 60^\circ; 80^\circ$</p>
<p>Variante D: glatte 1:3 geneigte Böschung</p> 	<p>Kombinationen aus den folgenden Versuchsparametern: $d = 0,45; 0,50; 0,55\text{m}$ $H_S = 0,10\text{m}$ $T_P = 1,27; 1,79\text{s}$ $\theta = 0^\circ; 20^\circ; 40^\circ; 60^\circ; 80^\circ$</p>
<p>Variante E: glatte 1:3 geneigte Böschung mit Berme B=0,30m</p> 	<p>Kombinationen aus den folgenden Versuchsparametern: $d = 0,45; 0,50; 0,55\text{m}$ $H_S = 0,10\text{m}$ $T_P = 1,27; 1,79\text{s}$ $\theta = 0^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 60^\circ; 80^\circ$</p>
<p>Variante F: Knickprofil</p> 	<p>Kombinationen aus den folgenden Versuchsparametern: $d = 0,45; 0,50; 0,55\text{m}$ $H_S = 0,10\text{m}$ $T_P = 1,27; 1,79\text{s}$ $\theta = 0^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 60^\circ; 80^\circ$</p>

Abb. 13: Bauwerksgeometrien und Versuchsprogramm in der zweiten Projektphase

4 Analyse der Versuchsdaten und Ergebnisse

Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung einer Richtungsfunktion für den Wellenauf- und Wellenüberlauf sowie die Beschreibung des Einflusses der schrägen Wellenangriffsrichtung für unterschiedliche Deichprofile. Die einzelnen Einflussfaktoren, die dabei in den zwei Projektphasen untersucht wurden, sind in Abbildung 14 dargestellt. Neben den Untersuchungen an durchgehenden Böschungen wurden auch Bermen und ein konkaves Knickprofil untersucht.

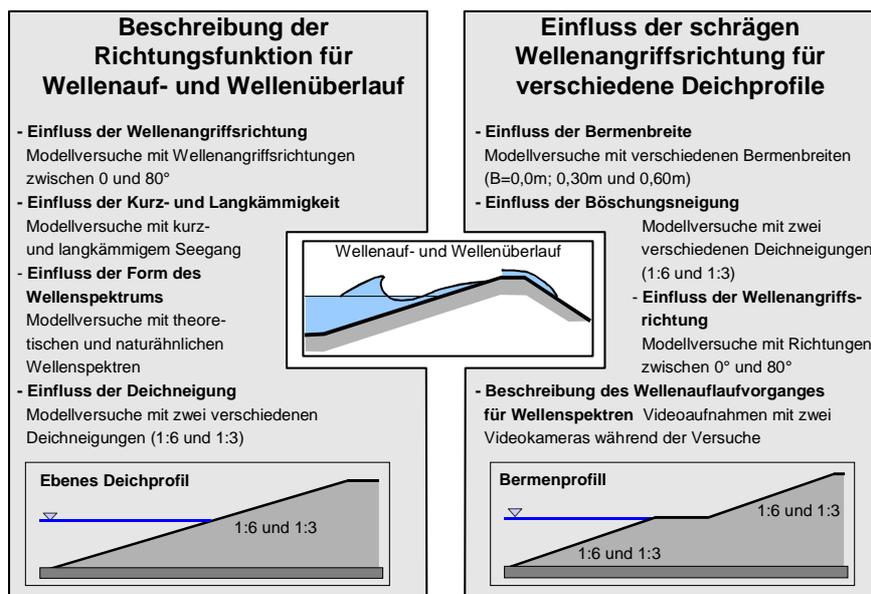


Abb. 14: Ziele der Untersuchungen und zugeordnete Untersuchungen im Projektraum

Die Ergebnisse der Modellversuche werden in diesem Abschnitt für die beiden Projektphasen dargestellt. Im ersten Abschnitt, der die Ergebnisse der Modellversuche in Kanada beschreibt wird dargestellt, welche Unterschiede es beim schrägen Wellenauflauf für kurz- und langkämmigen Seegang gibt und wie die Richtungsfunktion für schrägen Wellenangriff beschrieben werden kann. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 die Richtungsfunktion für zusätzliche Modellkonfigurationen überprüft und der Einfluss der Bauwerksgeometrie bei schrägem Wellenauflauf untersucht.

4.1 Ergebnisse der Projektphase 1 (Versuche in Kanada)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in der Projektphase 1 durchgeführten Grundsatzuntersuchungen zum schrägen Wellenauflauf und -überlauf im Wellenbecken des NRC-CHC (National Research Council - Canadian Hydraulics Centre) dargestellt. Kernpunkt der Untersuchungen ist die Klärung der Frage, ob Ergebnisse mit langkämmigem Seegang in den wesentlichen Tendenzen den Ergebnissen mit kurz- und langkämmigem Seegang entsprechen.

Die Versuche wurden an einem ebenen 1 : 6 geneigten Modelldeich mit Seegangsspektren unterschiedlicher Richtungsstrukturen und Anlaufrichtungen durchgeführt. Im folgenden werden die Ergebnisse der Modellversuche unter Berücksichtigung der Teilaspekte, die in

Abbildung 5 dargestellt sind, vorgestellt. Dabei wird zunächst die Homogenität des Wellenfeldes bzw. des Wellenauflaufes entlang des Deiches beschrieben. Anschließend werden die wesentlichen Ergebnisse zum Wellenauflauf dargestellt und abschließend für Projektphase 1 die Ergebnisse zum Wellenüberlauf präsentiert.

4.1.1 Überprüfung der Homogenität des Wellenfeldes und des Wellenauflaufes entlang des Deiches

Um den Einfluss der Randbedingungen im Modell so gering wie möglich zu halten, wurden nur in der Mitte des Deiches in einem 10 m langen Messfeld die einlaufenden Wellen und der Wellenauflauf gemessen. Die Ränder des Modelldeichs lagen jeweils 5,5 m vom eigentlichen Messfeld entfernt, um eventuelle Rand- und Eckeffekte zu reduzieren. Um festzustellen, ob trotzdem Randeffekte Einfluss auf die Messergebnisse haben, wurden alle Messergebnisse auf Homogenität überprüft. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die Variabilität entlang des Deiches von Wellenhöhe H_{m0} , Wellenperiode T_p und Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%}$ für einen Versuch mit kurzkämmigem Seegang („Spreading“ $\sigma_\theta = 10^\circ$) und einer Wellenangriffsrichtung von $\theta = 20^\circ$.

Es ist zu erkennen, dass im äußeren Bereich, d.h. im Bereich der Wellenpegel 1/2 und 9/10, noch leichte Einflüsse der Ecken und Ränder vorhanden waren. Insgesamt streuen die Versuchsergebnisse aber nur sehr gering. Die größte Variationskoeffizient s' liegt im Bereich von $s' = 3,8\%$ und ist damit fast zu vernachlässigen. Sie ist wie folgt definiert:

$$(3) \quad s' = \frac{s}{\bar{x}}$$

mit s = Standardabweichung
 \bar{x} = Mittelwert (aus allen Datenpunkten)

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass alle Versuche eine relativ homogene Verteilung der einlaufenden Wellen entlang des Deiches aufweisen, ohne dass wesentliche Rand- und Eckeffekte erkennbar sind. Eine Zusammenfassung der relativen Abweichungen für alle Versuche zum Wellenauflauf der Projektphase 1 ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Zusammenstellung der relativen Abweichungen (minimale Abweichung, maximale Abweichung und mittlere Abweichung) der Messungen an den 10 Wellenpegeln bzw. Wellenauflaufpegeln entlang des Deiches

	Langkämmiger Seegang			Kurzkämmiger Seegang		
	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel
H_{m0}	1,51%	7,74%	3,93%	0,66%	3,56%	1,58%
T_p	0,60%	5,36%	2,17%	0,57%	1,67%	0,93%
$R_{u2\%}$	2,53%	8,00%	3,98%	1,19%	5,83%	3,28%

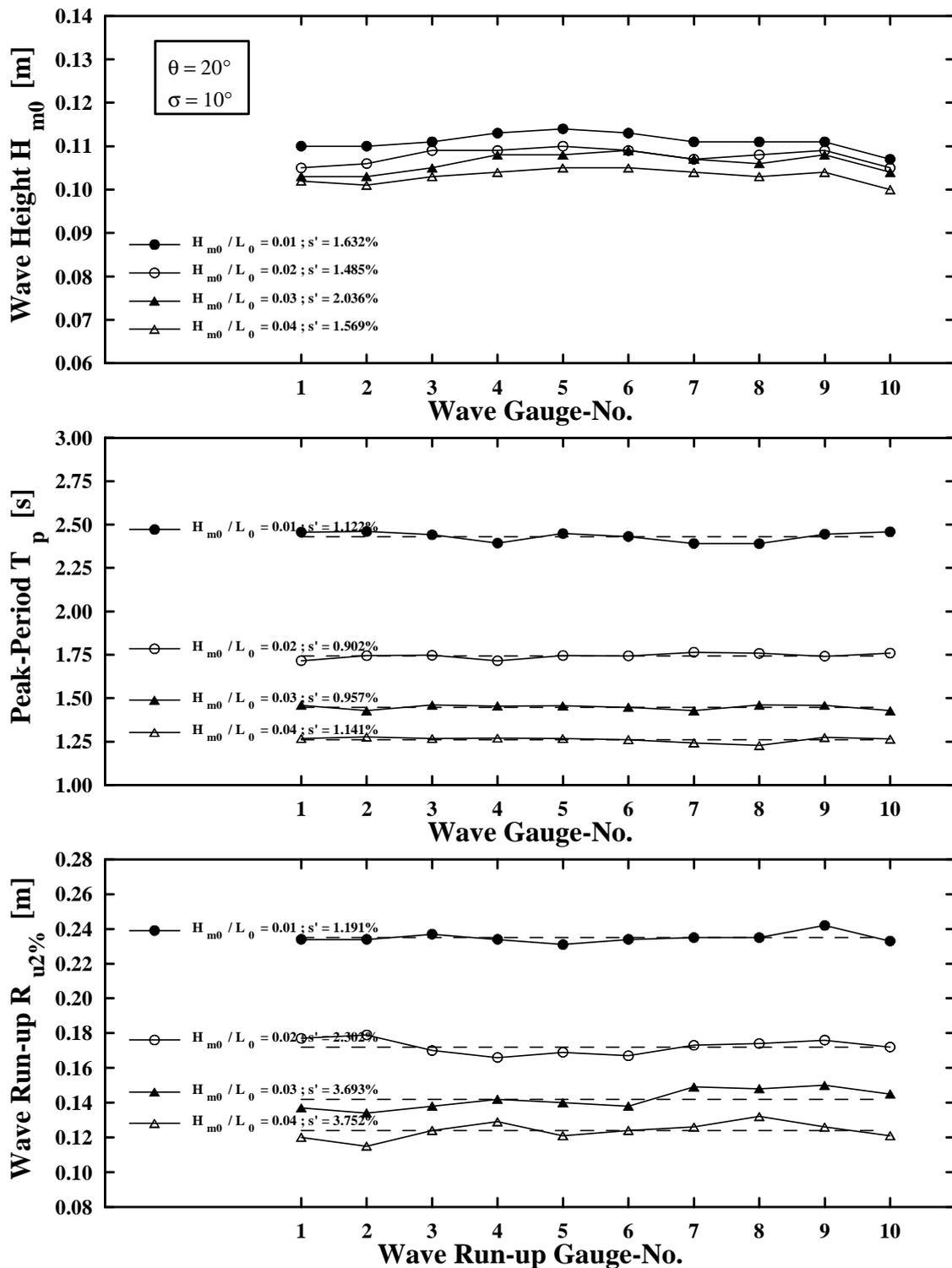


Abb. 15: Variation von H_{m0} , T_p and $R_{u2\%}$ entlang des Deichs für kurzkämmigen Seegang ($\sigma_\theta = 10^\circ$) mit schrägem Wellenangriff ($\theta = 20^\circ$)

Die Versuche zum Wellenüberlauf zeigten deutlich höhere Abweichungen entlang des Deichs (Tab. 3), diese können jedoch auch mit mittleren Abweichungen von ca. 8,5 % bei der mittleren Wellenüberlauftrate als gering eingestuft werden, da insbesondere bei Wellenüberlaufmessungen in einem Wellenkanal Abweichungen in einer Größenordnung zwischen 10 % und 20 % keine Seltenheit sind.

Tab. 3: Zusammenstellung der relativen Abweichungen (minimale Abweichung, maximale Abweichung und mittlere Abweichung) der Messungen an den 10 Wellenpegeln bzw. 4 Wellenüberlaufmessungen entlang des Deiches

	Langkämmiger Seegang			Kurzkämmiger Seegang		
	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel
H_{m0}	1,03%	8,46%	4,07%	0,79%	3,77%	2,06%
T_P	0,95%	5,71%	2,20%	0,63%	1,87%	1,34%
q	1,89%	18,60%	8,63%	1,56%	15,72%	5,80%

Zusammenfassend kann angesichts der üblichen Messgenauigkeiten sowohl das Wellenfeld unmittelbar vor dem Deich als auch die Verteilung der Wellenauflaufhöhen und der mittleren Wellenüberlaufzeiten entlang des Deiches als relativ homogen bezeichnet werden. Die maximalen Abweichungen entlang des Deiches betragen ca. 8 %, die mittleren Abweichungen maximal 4 % bei den Wellenauflaufversuchen und bei den Wellenüberlaufversuchen betragen die mittleren Abweichungen 8,6 %. Durch die Anordnung des Messbereichs in der Mitte des 20m langen Deiches wurde erreicht, dass die Ergebnisse nicht durch Prozesse, die an den Ecken und Rändern des Bauwerks auftreten, beeinflusst werden.

4.1.2 Ergebnisse der Wellenauflaufversuche

Das Hauptziel der Modelluntersuchungen war es, den Einfluss der Wellenangriffsrichtung und der Kurzkämmigkeit auf den Wellenauflauf und Wellenüberlauf zu ermitteln. Um eine vergleichbare Beziehung zwischen Wellenauflaufhöhe und den Wellenparametern, wie Wellenhöhe und -steilheit zu ermitteln, wird ein dimensionsloser Koeffizient a eingeführt. Die im folgenden dargestellte Gleichung (4) ordnet der dimensionslosen Wellenauflaufhöhe R/H und der Brecherkennzahl ξ den dimensionslosen Koeffizienten a zu. Diese Vorgehensweise hat sich auch bei vielen früheren Wellenauflaufuntersuchungen bewährt:

$$(4) \quad \frac{R}{H} = a \cdot \xi$$

Für die weiteren Untersuchungen wird die theoretische Wellenauflaufhöhe R durch die gemessenen statistischen Kenngrößen der Auflaufhöhe $R_{u2\%}$, $R_{1/3}$ etc. ersetzt. Die theoretische Wellenhöhe H geht in den Faktor der Brecherkennzahl ξ ein, wie er in Gleichung (5) definiert ist und wird durch die gemessenen statistischen Kenngrößen der Wellenhöhe H_{m0} , $H_{2\%}$ etc. ersetzt:

$$(5) \quad \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{(H/L_0)}}$$

$$\text{mit: } L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \quad (\text{Wellenlänge im Tiefwasser})$$

$$T = \text{Wellenperiode (bei der Auswertung ersetzt je nach Bedarf durch } T_p, T_{01}, T_{02}, \text{ etc.)}$$

g	=	Erdbeschleunigung
$\tan \alpha$	=	Deichneigung
H_{m0}	=	Wellenhöhe aus Wellenspektrum
$R_{u2\%}$	=	Wellenauflaufhöhe die von 2% aller Wellen überschritten wird
$R_{u1/10}$	=	Mittelwert der 1/10 höchsten Wellenaufläufe aller einlaufenden Wellen
$R_{u1/3}$	=	Mittelwert der 1/3 höchsten Wellenaufläufe aller einlaufenden Wellen
T_p	=	Peakperiode des Wellenspektrums
T_{01}, T_{02}	=	Charakteristische Wellenperiode des Spektrums

Im folgenden wird die Auswertung für die Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%}$ dargestellt, dabei wird die Peakperiode T_p und die Wellenhöhe H_{m0} verwendet:

$$(6) \quad \frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = a \cdot \xi_{0p}$$

Um den dimensionslosen Faktor a für jeden Modellversuch zu berechnen, wird Gleichung (6) wie folgt umgeformt:

$$(7) \quad a = \frac{R_{u,2\%}}{H_{m0} \cdot \xi_{0p}}$$

Um den Einfluss der Wellenangriffsrichtung θ und der Kurzkämmigkeit („Spreading“ σ_θ) auf die Wellenauflaufhöhe darstellen zu können, wird der Reduktionsfaktor γ_θ eingeführt:

$$(8) \quad a(\theta) = \gamma_\theta \cdot a(\theta=0^\circ)$$

Durch Umformung folgt:

$$(9) \quad \gamma_\theta = \frac{a(\theta)}{a(\theta=0^\circ)} \quad \text{wobei } \gamma_\theta(0^\circ)=1,0$$

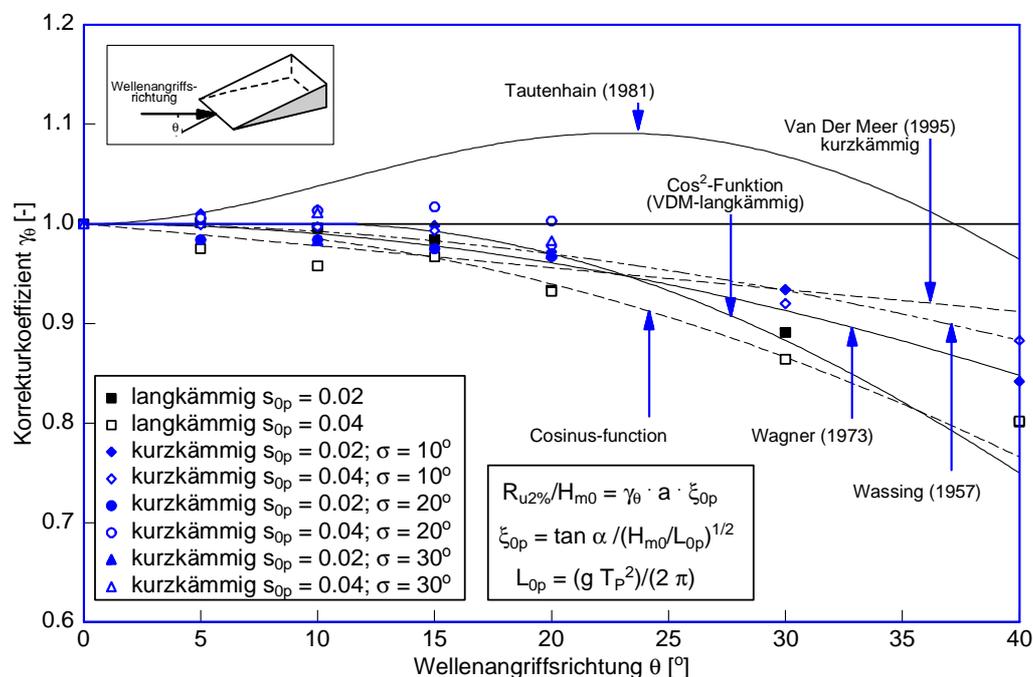
Der Einfluss der Kurz-, bzw. Langkämmigkeit der Versuchswellen auf den Wellenauflauf aus den bisherigen Untersuchungen im Vergleich zu den eigenen Messungen kann Abbildung 16 entnommen werden. Hierbei ist der Einfluss der Wellenangriffsrichtung auf die Wellenauflaufhöhe in Form des Korrekturkoeffizienten γ_θ dargestellt.

Um eine Quantifizierung der Streuung der Ergebnisse und des Einflusses der Kurzkämmigkeit zu erhalten, ist in Tabelle 4 die Standardabweichung des dimensionslosen Koeffizienten a über alle Versuche und das arithmetische Mittel aller Abweichungen zwischen kurz- und langkämmigen Versuchen bezüglich verschiedener Wellenauflaufhöhen ($R_{u2\%}$, $R_{1/3}$ und $R_{1/10}$) dargestellt. Die Unterschiede der Wellenauflaufhöhe zwischen Versuchen mit langkämmigem Seegang und Versuchen mit kurzkämmigem Seegang Δa liegen in der Größenordnung der natürlichen Streuung $s(a)$ der Ergebnisse bezüglich der Standardabweichung (Tab. 4). Es ist also für die untersuchten Wellenangriffsrichtungen von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 40^\circ$ kein signifikanter Unterschied zwischen kurz- und langkämmigen Versuchen für die Ermittlung der Wellenauflaufhöhe bezüglich der Wellenangriffsrichtung erkennbar.

Tab. 4: Vergleich der Streuungen $s(a)$ der Versuchsergebnisse für den dimensionslosen Koeffizienten a und Abweichung Δa der Koeffizienten a zwischen lang- und kurzkämmigen Versuchen

	$R_{u,2\%}$ [m]	$R_{1/10}$ [m]	$R_{1/3}$ [m]
$\Delta a =$ langkämmig - kurzkämmig	0,028	0,025	0,013
$s(a)$	0,021	0,021	0,010

Ein Ziel der Untersuchungen war es, zu überprüfen, ob für kleine Wellenangriffsrichtungen mit einer Erhöhung der Wellenaufbauhöhe zu rechnen ist, wie sie z.B. von *Tautenhain et al. (1982)* in Modellversuchen ermittelt wurde. Bei den eigenen Untersuchungen erkennt man, dass einige Korrekturkoeffizienten bei Versuchen mit kurzkämmigem Seegang einen Wert aufweisen, der größer als 1,0 ist, bei Versuchen mit langkämmigem Seegang nur 1 Versuch einen Reduktionskoeffizienten aufweist, der größer als 1,0 ist. Die größte Erhöhung aller Versuche beträgt jedoch nur $\gamma_\theta = 1,012$ und liegt somit noch in der Streubreite der Untersuchungen. In früheren Modellversuchen wurde für kleine Wellenangriffsrichtungen ($5^\circ < \theta < 20^\circ$) ein Wert für den Korrekturkoeffizienten γ_θ von teilweise bis zu 1,1 bestimmt. Die Untersuchungen in diesem Projekt, bei denen Randeffekte und Tendenzen an den Bauwerksecken weitestgehend reduziert werden konnten bzw. die Messungen nicht beeinflussten, zeigen, dass die früher beobachteten Erhöhungen für kleine Wellenangriffsrichtungen keine physikalischen Ursachen haben, sondern auf Modelleffekte zurückgeführt werden können.

Abb. 16: Reduktionskoeffizient γ_θ in Abhängigkeit der Wellenangriffsrichtung für d. Wellenaufbauhöhe $R_{u,2\%}$

Insgesamt können die Versuchsdaten zum Wellenauflauf der ersten Projektphase mit der Richtungsfunktion:

$$(10) \quad \gamma_\theta = 0,35 + 0,65 \cos \theta \quad \text{mit } s' = 5\%$$

beschrieben werden. Diese Funktion gilt sowohl für kurz- als auch für langkämmigen Seegang und entspricht der Richtungsfunktion, die 1973 von *Wagner und Bürger* ermittelt wurde.

4.1.3 Ergebnisse der Wellenüberlaufversuche

Für die Wellenüberlaufversuche wurde das gleiche Versuchsprogramm gewählt wie auch für die Wellenauflaufversuche. Hauptziel war bei den Untersuchungen zum Wellenüberlauf die Beschreibung des Einflusses der schrägen Wellenangriffsrichtung bei kurz- und langkämmigem Seegang auf die mittlere Wellenüberlauftrate. Analog zu den Wellenauflaufversuchen wird der Einfluss der Wellenangriffsrichtung auch bei den Versuchen zum Wellenüberlauf über einen Koeffizienten a und anschließend den Korrektorkoeffizienten γ_θ beschrieben. Hierzu wird eine dimensionslose Wellenüberlauffunktion gewählt, wie sie z.B. von *Schütt-rumpf (2001)* für einen 1:6 Deich verwendet wurde:

$$(11) \quad \frac{q}{\sqrt{2 g H_S^3}} = Q_0 \xi_{0p} \exp\left(-b \frac{R_C}{R_{u2\%}}\right)$$

mit: $Q_0, b =$ dimensionslose Faktoren

Die Gleichung (10) kann durch Ersetzen der Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%}$ aus Gleichung (6), wie folgt vereinfacht werden:

$$(12) \quad \frac{q}{\sqrt{2 g H_{m0}^3}} = Q_0 \xi_{0p} \exp\left(-b' \frac{R_C}{\xi_{0p} H_{m0}}\right)$$

Die Gleichung (11) kann wie folgt umgestellt werden (mit $b' = b/a$):

$$(13) \quad \frac{R_C}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} \cdot \frac{1}{\xi_{0p}}\right)} = a' \cdot \xi_{0p}$$

wobei, analog zu den Auflaufversuchen, der dimensionslose Koeffizient a' für jeden Modellversuch ermittelt wird.

Durch Einführung des Reduktionsfaktors γ_θ wird in der Gleichung (12) der Einfluss der Wellenangriffsrichtung θ und der Kurzkämmigkeit σ_θ auf die Wellenüberlauftrate berücksichtigt:

$$(14) \quad \gamma_\theta = \frac{a(\theta)}{a(\theta = 0^\circ)}$$

Zur Ermittlung der Reduktionsfaktoren werden alle Wellenparameter entlang des Deichs (10 Positionen) gemittelt und in Bezug auf die Überlaufmengen (4 Positionen) gesetzt. Abbildung 17 zeigt die Reduktionsfaktoren γ_θ in Abhängigkeit der Wellenangriffsrichtung für die mittlere Wellenüberlauftrate q . Man kann erkennen, dass langkämmige Wellen zu leicht höheren mittleren Wellenüberlauftraten führen als kurzkämmige Wellen. Außerdem sind darge-

stellt die Richtungsfunktion für Wellenüberlauf nach *Van der Meer et al. (1998)* und die Richtungsfunktion, die für die eigenen Wellenauflaufversuche ermittelt wurde. Der Vergleich zeigt, dass die Funktion nach Van der Meer et al. (1998) weniger gut geeignet ist, um den schrägen Wellenüberlauf zu berücksichtigen als die eigene Funktion für den Wellenauflauf. Außerdem wurde bei den Wellenüberlaufversuchen keine deutlich andere Richtungsfunktion verglichen mit den Wellenauflaufversuchen ermittelt.

Im Vergleich zur Streuung der Versuchsergebnisse sind die Erhöhung und die Reduzierung der mittleren Wellenüberlaufsraten allerdings gering. Die größte Erhöhung beträgt nur ca. 3% ($\gamma_\theta = 1,03$) für kurzkämmige Wellen bei kleinen Wellenangriffsrichtungen ($\theta < 15^\circ$). Das bedeutet, dass die Untersuchungen zum Wellenüberlauf im allgemeinen die Ergebnisse zum Wellenauflauf bestätigen. Die mittleren Wellenüberlaufsraten sind in den Versuchen für langkämmige Versuche zwar leicht erhöht gegenüber den kurzkämmigen Versuchen, jedoch liegt die Streuung noch innerhalb der Standardabweichung aller Versuchsergebnisse.

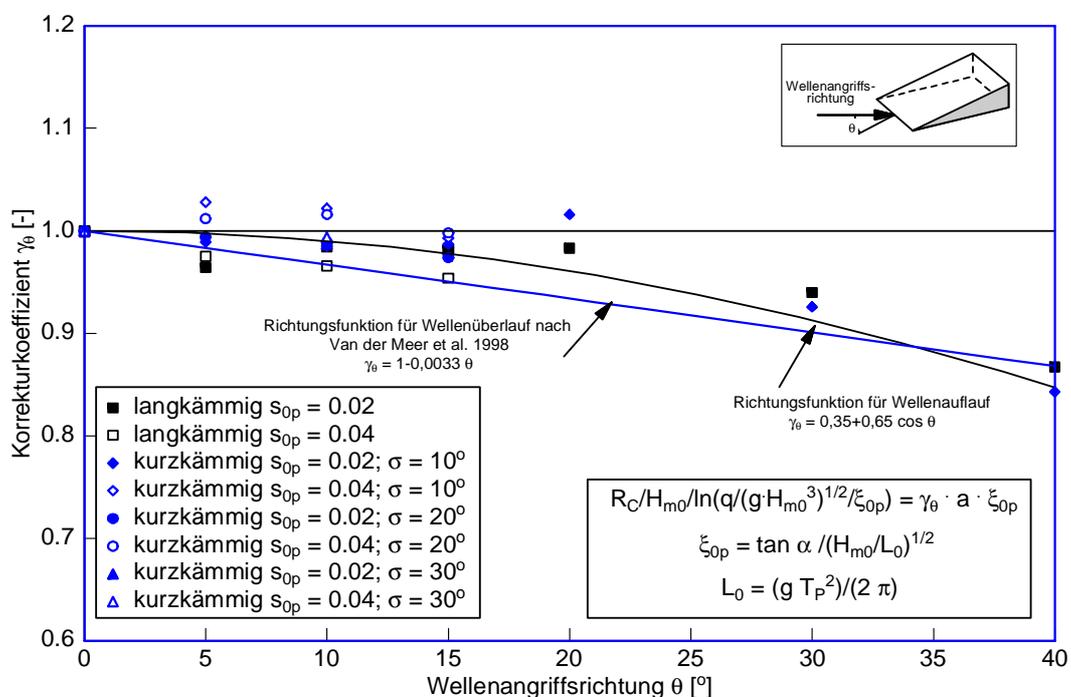


Abb. 17: Korrekturkoeffizient γ_θ in Abhängigkeit von der Wellenangriffsrichtung θ für die mittlere Wellenüberlauftrate q

4.1.4 Bewertung der Ergebnisse der Projektphase 1

Obwohl zahlreiche Untersuchungen zum Wellenauf- und Wellenüberlauf an Seedeichen weltweit durchgeführt wurden, bestanden noch Zweifel am Einfluss des schrägen Wellenangriffs auf den Wellenauf- und Wellenüberlauf bei kurz- und langkämmigem Seegang. Daher wurden die beschriebenen Modellversuche der ersten Projektphase im Wellenbecken des NRC-CHC in Kanada an einem 1 : 6 geneigten Deich mit kurz- und langkämmigem Seegang für Wellenangriffsrichtungen zwischen $\theta = 0^\circ$ und 40° durchgeführt. Dabei wurden die in Abbildung 5 beschriebenen Ziele verfolgt. In Abbildung 18 ist zusammenfassend dargestellt,

welche Ergebnisse erreicht wurden. Im ersten Schritt wurde das Wellenfeld und der Wellenauflauf auf Homogenität entlang des Deiches untersucht, um Randeinflüsse im Modell zu erkennen. Die mittlere Variation der untersuchten Parameter entlang des Deiches beträgt ca. 3 % ohne klaren Trend, d.h. dass Rand- und ECKEINFLÜSSE bei den durchgeführten Versuchen ausgeschlossen werden können.

Anschließend wurde für alle Wellenauf- und Wellenüberlaufversuche der Koeffizient a bestimmt, um den Unterschied zwischen Versuchen mit kurz- und langkämmigem Seegang zu ermitteln. Die maximale relative Standardabweichung des a -Koeffizienten beträgt für alle Versuche $s' = 3,3\%$. Diese Unsicherheit ist im Vergleich zu früheren Untersuchungen sehr niedrig und zeigt die Genauigkeit der Messungen im kanadischen Wellenbecken.

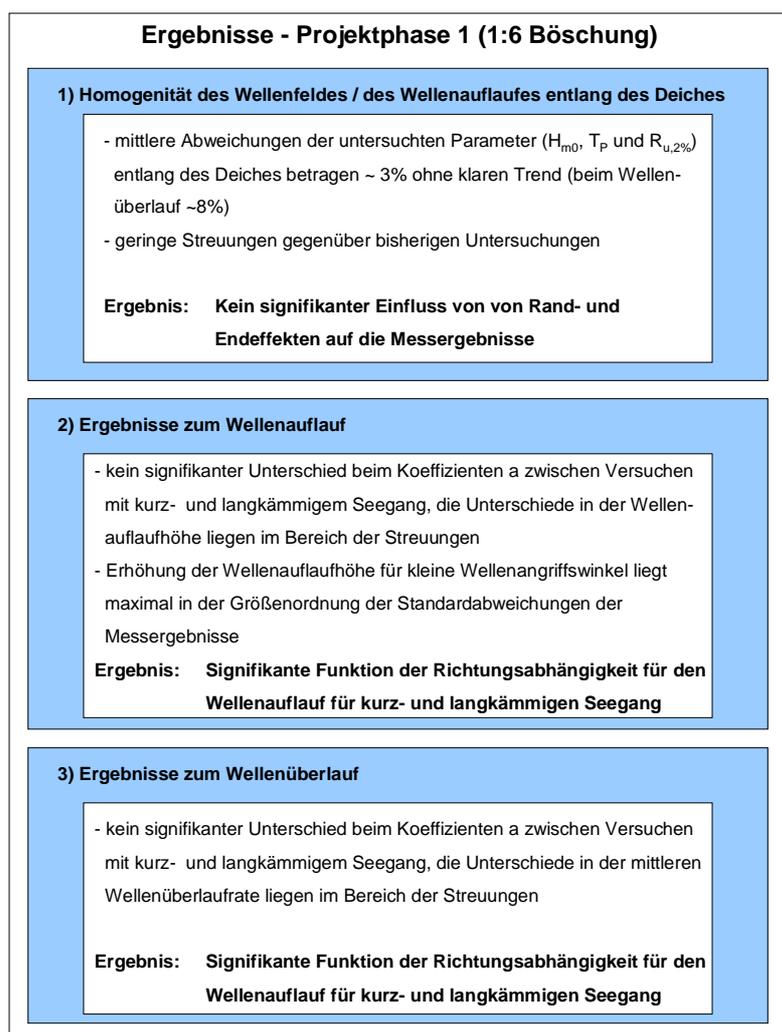


Abb. 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Projektphase

Unterschiede zwischen lang- und kurzkämmigen Versuchen lagen im Bereich der natürlichen Streuungen und wiesen für alle a -Koeffizienten keine unterschiedlichen Tendenzen auf. Dies wurde auch bei der Untersuchung des Reduktionsfaktors der Wellenauflaufhöhe für unterschiedliche Wellenangriffsrichtungen festgestellt. Außerdem haben sich auch bei unterschiedlichen Wellenauflaufhöhenparametern ($R_{u,2\%}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$) keine Erhöhungen des Wellenauflaufes bei kleinen Wellenangriffsrichtungen ergeben.

Insgesamt können die Versuche mit der Richtungsfunktion:

$$(15) \quad \gamma_{\theta} = 0,35 + 0,65 \cos \theta \quad \text{mit } s' \approx 5\%$$

beschrieben werden. Diese Funktion gilt sowohl für kurz- als auch für langkämmigen Seegang und entspricht der Richtungsfunktion, die 1973 von *Wagner und Bürger* ermittelt wurde. Die Modelluntersuchungen des Wellenüberlaufes haben die wesentlichen Ergebnisse des Wellenauflaufes bestätigt, auch die Richtungsfunktion des Wellenauflaufes kann auf den Wellenüberlauf übertragen werden. Die Wellenüberlaufsraten sind in diesen Versuchen zwar für langkämmige Verhältnisse etwas erhöht gegenüber den kurzkämmigen Ergebnissen. Die Streuung liegt jedoch noch innerhalb der Standardabweichung aller Versuchsergebnisse. Im weiteren Verlauf des Projekts werden in der zweiten Projektphase die in Kanada gesammelten Ergebnisse im Wellenbecken des Franzius-Instituts verifiziert und außerdem der Einfluss von Neigung und Form der Deichaußenböschung (Bermen, Knickprofile) auf den Wellenauflauf untersucht.

4.2 Ergebnisse der Projektphase 2 (Versuche in Hannover)

Die Modellversuche der zweiten Projektphase wurden im Wellenbecken des Franzius-Instituts durchgeführt, in dem nur Versuche mit langkämmigem Seegang möglich sind. Da die Ergebnisse der ersten Projektphase gezeigt haben, dass die Unterschiede beim Wellenauflauf zwischen Versuchen mit kurz- und langkämmigem Seegang im Bereich der Streuungen der Messungen liegen, konnte das Projekt in Hannover fortgesetzt werden. Dabei wurden zunächst die Versuche zum Wellenauflauf an einer 1:6 geneigten Böschung mit langkämmigem Seegang der ersten Phase wiederholt, um die Reproduzierbarkeit nachzuweisen. In einem zweiten Schritt wurden die Wasserstände variiert und zusätzliche Wellenangriffsrichtungen bis zu $\theta=80^{\circ}$ untersucht. Ein weiterer Aspekt der Modellversuche der 2. Projektphase war die Erweiterung der Geometrien. Es wurden verschiedene Geometrien mit Bermen und einer weiteren Neigung untersucht (s. Abb. 13).

Im folgenden werden die Ergebnisse der Versuche im Wellenbecken Marienwerder (WBM) mit einer Böschung der Neigung 1 : 6 dargestellt, diskutiert und mit den Ergebnissen aus Kanada verglichen. Danach wird der Einfluss der unterschiedlichen Böschungsneigungen von 1:6 und 1:3 beschrieben, bevor anschließend der Einfluss von Bermen und Knicken auf den schrägen Wellenauflauf untersucht wird.

4.2.1 Ergebnisse der Modelluntersuchungen am 1 : 6 geneigten ebenen Deich im WBM

4.2.1.1 Einordnung und Wertung der Ergebnisse für senkrechten Wellenanlauf ($\theta = 0^{\circ}$)

Wie bereits im vorigen Abschnitt werden die Ergebnisse an den derzeit empfohlenen Bemessungsverfahren orientiert. Die Bemessungsformel für senkrechten Wellenauflauf lautet

$$(16) \quad \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = a \cdot \xi$$

mit: $a = \text{konstant}$ (empfohlene Werte 1,5 oder 1,6 mit Höchstwert 3,0 bzw. 3,2 ab $\xi = 2$)

und geht damit von einer linearen (proportionalen) Abhängigkeit des relativen Wellenaufbaus von der Brecherzahl ξ aus, die den Einfluss von Böschungsneigung und Wellensteilheit in einem Parameter zusammenfasst. Eine Auftragung der Ergebnisse in dieser Form zeigt Abb. 19 im Vergleich zur empfohlenen Bemessungsformel.

$$(17) \quad \frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1,86 \cdot \xi^{0,71}$$

Zusätzlich zur empfohlenen Bemessungsformel ist auch eine von *Mase (1989)* gegebene nichtlineare Abhängigkeit angegeben.

Zunächst ist anzumerken, dass die Größenordnung der relativen Wellenaufläufe der Bemessungsformel entspricht. Die Bandbreite und Tendenz der Abweichungen entsprechen denen des Schrifttums, die Bandbreite ist eher geringer. Tendenziell muss festgestellt werden, dass der Verlauf der von *Mase (1989)* gegebenen Funktion besser den Daten entspricht, jedoch etwa eine obere Einhüllende bildet.

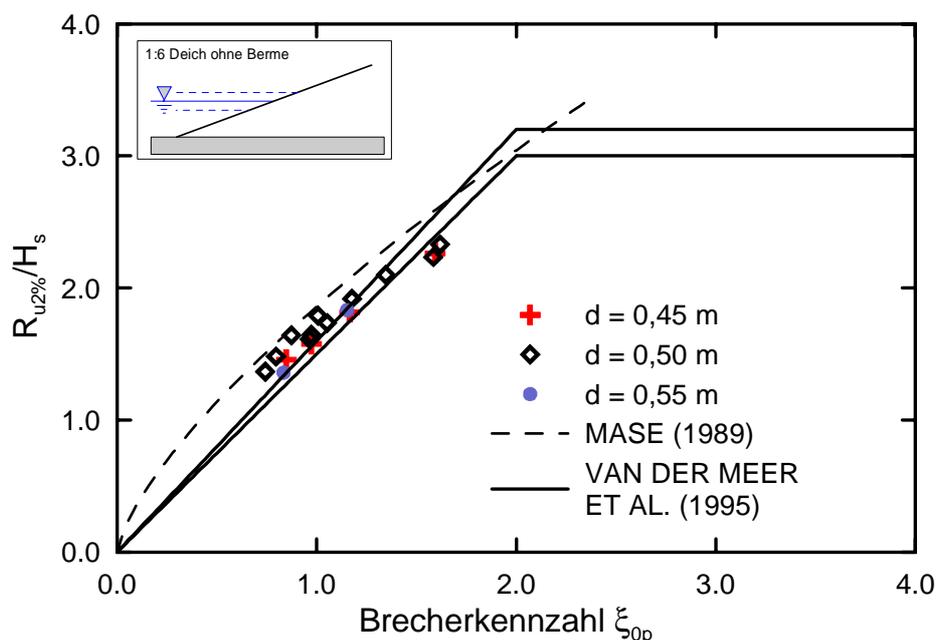


Abb. 19: Relativer Wellenaufbau in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl (Wellenangriffsrichtung $\theta = 0^\circ$, Deichneigung 1 : 6)

Betrachtet man die Ergebnisse der beim Wasserstand $d = 0,5$ m mit unterschiedlichen Wellenhöhen durchgeführten Versuche (Abb. 20) zeigt sich eine weitere vom idealen Verlauf der empfohlenen Bemessungsformel abweichende Tendenz. Kleine Wellenhöhen führen bei gleichen Brecherkennzahlen zu höheren relativen Wellenaufbauten als große Wellenhöhen.

Dies könnte in dieser Darstellungsform als Maßstabeffekt interpretiert werden, soll aber hier nicht weiter diskutiert werden, da die wesentliche Aufgabenstellung des Forschungsprojekts

die Bewertung der Richtungsabhängigkeit ist und die von der derzeitigen Bemessungsformel abweichenden Tendenzen für die Auflaufrichtung 0° durch den Bezug auf die aktuelle Messung nicht von signifikantem Einfluss ist.

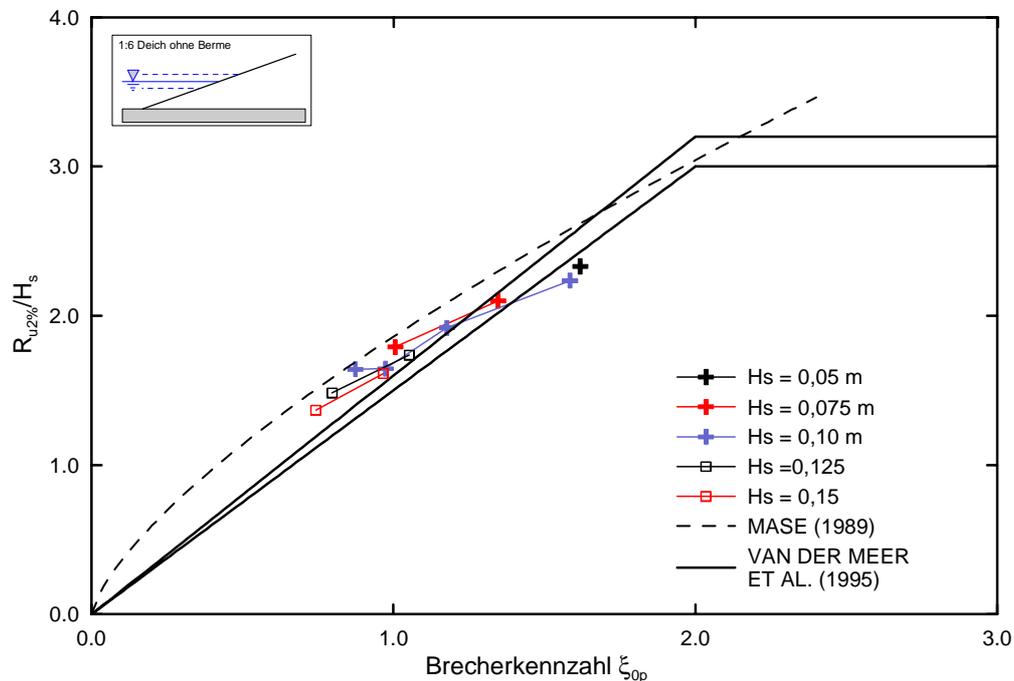


Abb. 20: Einfluss der Wellenhöhen auf den relativen Wellenauflauf (Wellenangriffsrichtung $\theta = 0^\circ$, Deichneigung 1 : 6, $d = 0,5$ m)

Es ist weiterhin anzumerken, dass für diese Darstellungen entsprechend der Richtungsfunktion gewichtete Ergebnisse der Richtungen 0° bis 30° verwendet werden. Die Originalmesswerte bei 0° streuen etwas stärker, weisen aber die gleichen Tendenzen auf.

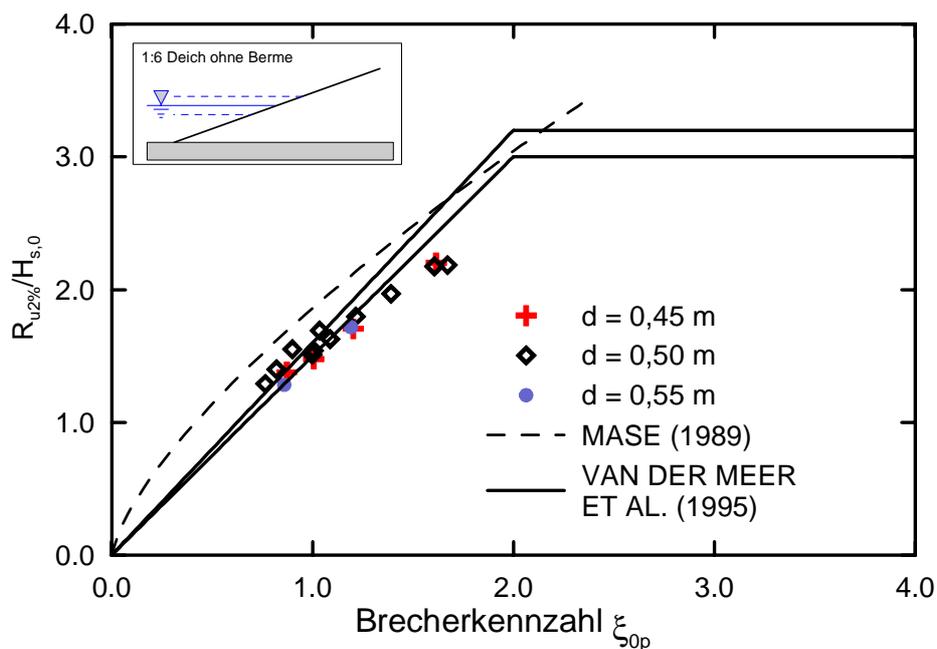


Abb. 21: Einfluss der Bezugswassertiefe (hier Tiefwasser) auf den relativen Wellenauflauf (Wellenangriffsrichtung $\theta = 0^\circ$, Deichneigung 1 : 6)

Um die grundsätzliche Problematik der Bezugswellenhöhe aufzuzeigen - alle bisherigen Versuche wurden auf die Wellenhöhen am Deichfuß bezogen - sind in Abb. 21 die auf Tiefwasserbedingungen rückgerechneten Wellenhöhen als Bezugswellenhöhen zugrunde gelegt worden. Es ergibt sich eine zahlenmäßig deutlich geringere relative Wellenauflaufhöhe (vgl. Abb. 19). Grundsätzlich sollte bei der Veröffentlichung von Daten daher auch die Bezugswassertiefe angegeben werden, um Ergebnisse aus unterschiedlichen Modellversuchen vergleichbar zu machen.

4.2.1.2 Ermittlung von Richtungsfunktion durch lineare Regression aller gemessener Daten

Ohne auf Details einzelner Messungen einzugehen, wurden zunächst alle Ergebnisse als relative Auflaufhöhen $R_{u2\%} / H_s$ über die Brecherkennzahl ξ aufgetragen. Die Daten sind nach Richtungen geordnet und in Abb. 22 entsprechend unterschiedlich gekennzeichnet.

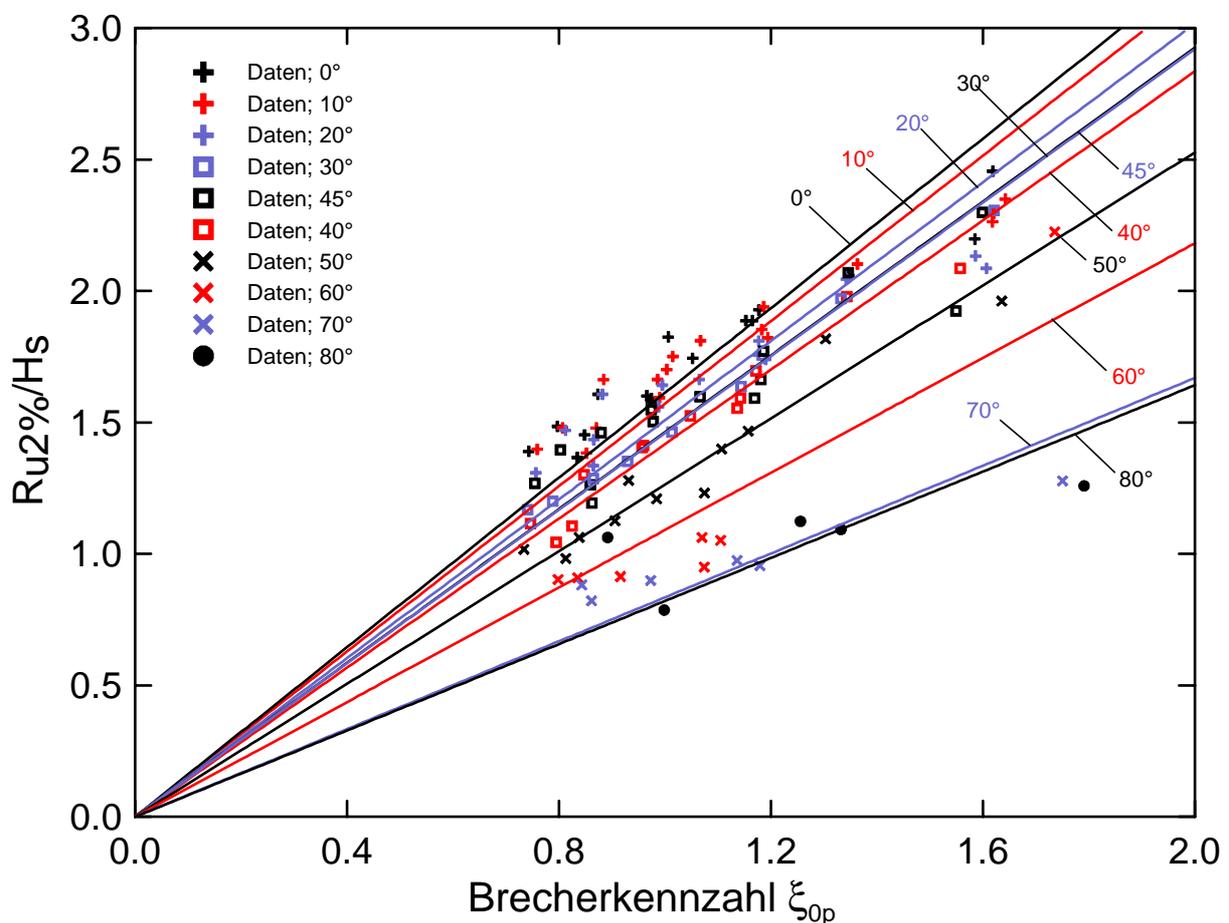


Abb. 22: Relative Auflaufhöhen $R_{u2\%}$ in Abhängigkeit von ξ_{0p} mit Regressionsgeraden

Für die Daten jeder Richtung wurden dann die Steigungen der Regressionsgeraden ermittelt die einen mittleren a -Wert der jeweiligen Richtungen entsprechen. Der Verlauf der γ_θ -Funktion kann dann wieder durch Bezug zum a -Wert bei $\theta = 0^\circ$ hergestellt werden:

$$(18) \quad \gamma_\theta = \frac{a(\theta)}{a(\theta=0^\circ)}$$

Die Ergebnisse sind in Tab. 5 und Abb. 23 dargestellt.

Tab. 5: a-Werte und γ_θ -Werte aus den Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 6)

θ	a	γ_θ
0°	1,61	1,00
10°	1,57	0,97
20°	1,51	0,94
30°	1,46	0,91
40°	1,42	0,88
50°	1,26	0,78
60°	1,09	0,68
70°	0,83	0,52
80°	0,82	0,51

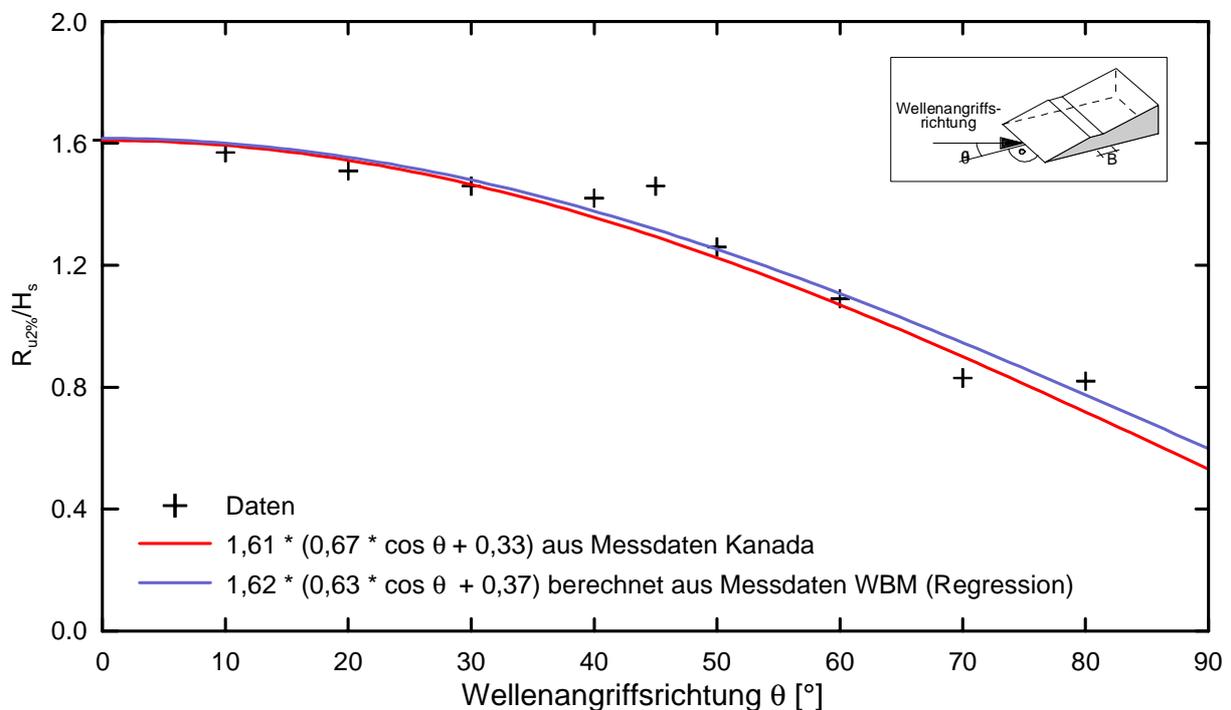


Abb. 23: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus der Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 6)

Durch nichtlineare Regressionsrechnung wurde die Richtungsfunktion dieser Daten ermittelt zu:

$$(19) \quad \gamma_{\theta} = 0,63 \cdot \cos \theta + 0,37$$

einer Funktion die nahezu identisch ist mit der aus den Messungen im Wellenbecken des CHC in Kanada.

4.2.1.3 Ermittlung der Richtungsfunktion γ_{θ} durch nichtlineare Regression aus gemessenen Richtungsverteilungen

Bei dieser Vorgehensweise werden zunächst die mit bestimmten Parameterkombinationen durchgeführten Messungen über die Richtungen zusammengefasst und deren a-Koeffizienten durch Bezug auf den a-Koeffizient bei $\theta = 0^{\circ}$ in γ_{θ} Werte umgerechnet. Der a-Koeffizient bei $\theta = 0^{\circ}$ wurde wie auch bei den Untersuchungen für die grundsätzlichen Abhängigkeiten bei der Auflafrichtung 0° durch gewichtete Mittelung der Messungen 0° bis 30° ermittelt.

Die gemessenen γ_{θ} -Werte aller mit der Neigung 1 : 6 durchgeführten Versuche sind in Abb. 24 dargestellt. Durch nichtlineare Regression wurden aus diesen Daten die Funktionsfaktoren a und b des wiederum zugrunde gelegten Funktionstyps

$$(20) \quad y = a \cdot \cos x + b$$

ermittelt. Aus diesen Berechnungen ergab sich die Richtungsverteilungsfunktion γ_{θ} zu.

$$(21) \quad \gamma_{\theta} = 0,61 \cdot \cos \theta + 0,39$$

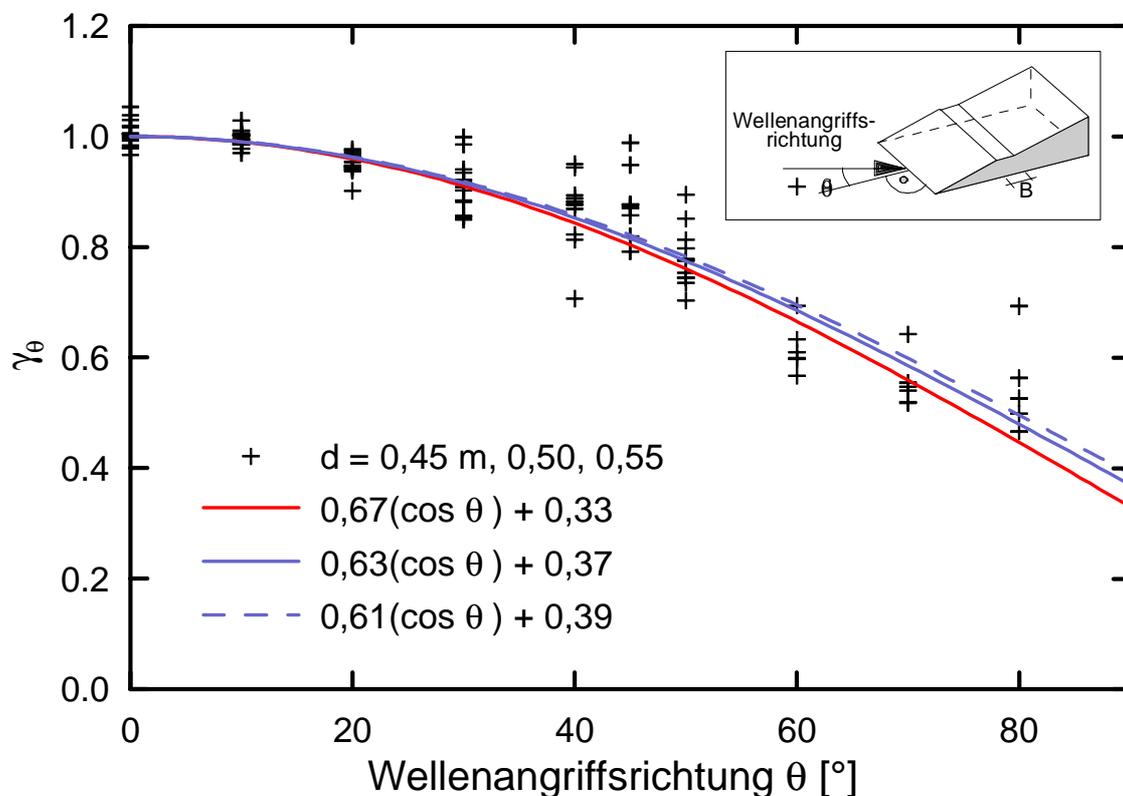


Abb. 24: Richtungsfunktion γ_{θ} ermittelt aus allen Messungen

Diese Funktion ist zusammen mit der aus den Versuchen in Kanada ermittelten Funktion und der im vorigen Abschnitt berechneten Funktion dargestellt. Die Funktionen liegen sehr dicht zusammen. Die Ergebnisse können als gleichwertig angesehen werden. Getrennte Analysen nach Wasserständen und nach Wellenperioden ergaben ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede in den berechneten Funktionen und keine signifikanten Tendenzen. Daher kann die Richtungsfunktion $\gamma_\theta = 0,35 + 0,65 \cos \theta$ für alle Versuche verwendet werden.

Zu den Streuungen in Abb. 24 ist Folgendes anzumerken:

- i) Die den Auswertungen zugrunde liegenden Daten wurden mit den „digitalen Wellenpegeln“ gemessen, da diese die zuverlässigsten Werte lieferten. Insgesamt standen vier Pegel zur Verfügung.
- ii) Eine Überprüfung besonders auffälliger Abweichungen vom mittleren Trend ergab dann meist, dass einer oder zwei der Pegel kein Signal geliefert hatte.
- iii) Durch einen Vergleich mit den insgesamt 10 analogen Wellenpegeln (deren absoluter gemessener Auflaufwert war im Mittel um einen konstanten Wert bis zu etwa 5 cm geringer als der mit den digitalen Pegeln gemessene Wert) konnte die Tendenz der Abweichung bestätigt werden, so dass hier keine versuchsbedingte Abweichung vorliegt sondern lediglich eine Messwertunsicherheit.

Dies rechtfertigt die Ermittlung der Richtungsfunktion durch Regressionsrechnungen, zumal Berechnungen mit Datenreihen ohne auffällige Abweichungen vom mittleren Trend zu keinen signifikanten Änderungen führten. Ein Beispiel einer solchen Rechnung zeigt Abb. 25.

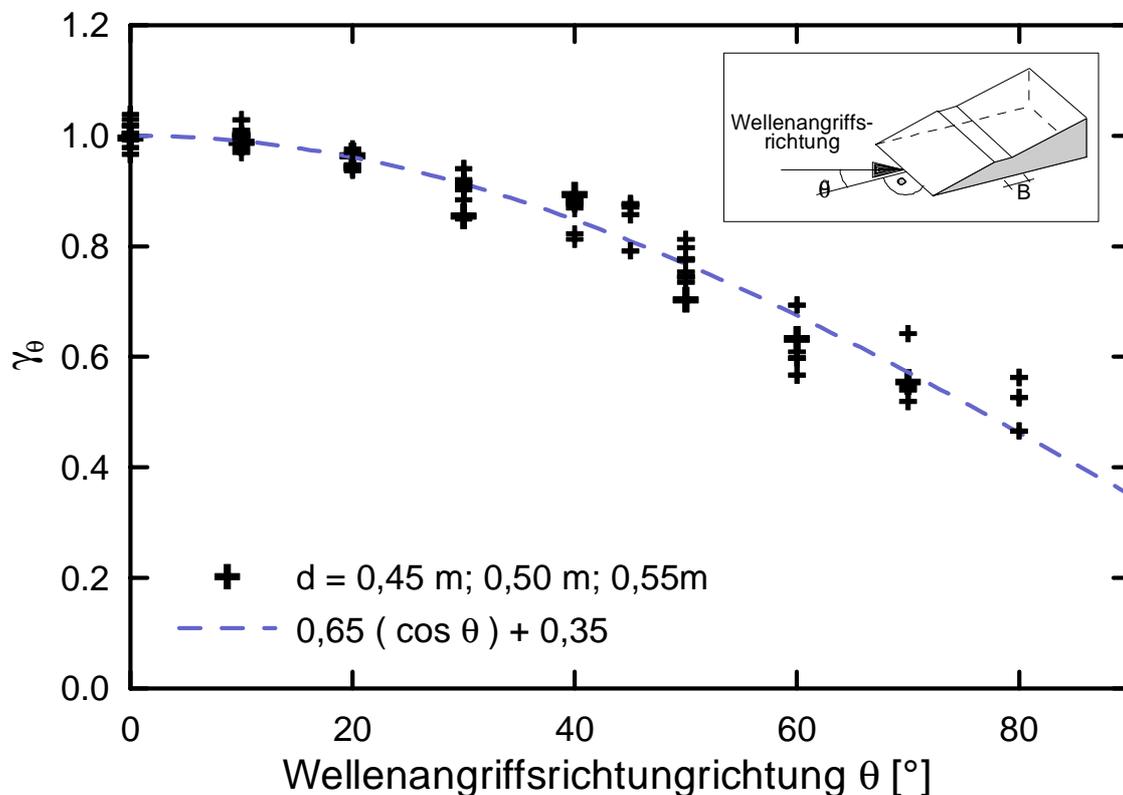


Abb. 25: Richtungsfunktion γ_θ ermittelt aus allen Messungen – Alle Ergebnisse

4.2.2 Ergebnisse der Modelluntersuchungen am 1 : 3 geneigten ebenen Deich im WBM

4.2.2.1 Einordnung und Wertung der Ergebnisse für senkrechten Wellenauflauf

Entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 4.2.1 wurden die relativen Wellenauflaufhöhen im Vergleich zur Bemessungsformel aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Abb. 26 dargestellt.

Die Werte liegen im Bereich der empfohlenen Bemessungsformel. Wiederum bildet auch hier die Gleichung nach *Mase (1989)* die obere Einhüllende. Für die verschiedenen Wassertiefen liegen zwar Unterschiede, nicht aber ein Trend vor.

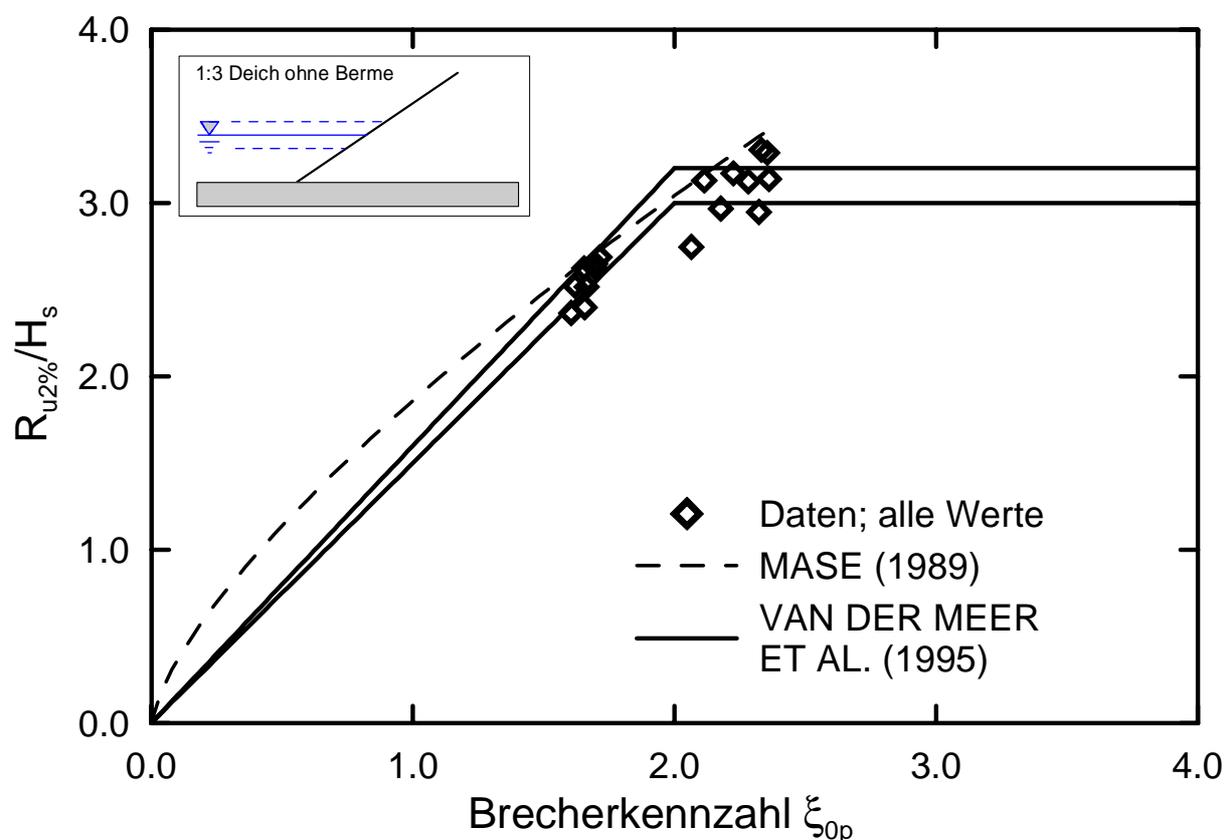


Abb. 26: Relativer Wellenauflauf in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl (Neigung 1 : 3)

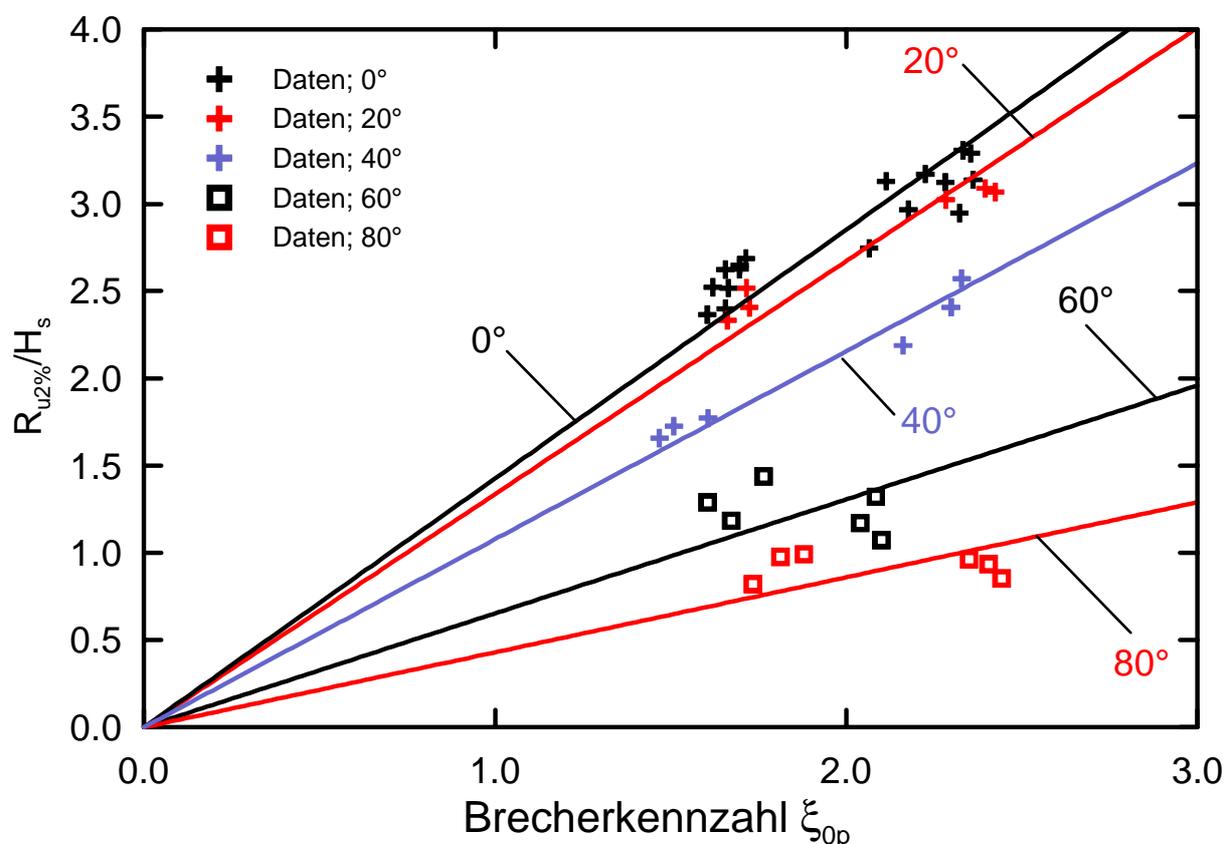
4.2.2.2 Ermittlung der Richtungsfunktion γ_θ durch lineare Regression aller gemessener Daten

Entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 4.2.1 wurde der Verlauf der Richtungsfunktion zunächst aus den Steigungen der Regressionsgeraden durch die über ξ aufgetragenen relativen Wellenaufläufe (getrennt nach Richtungen) ermittelt.

Die Ergebnisse sind in Tab. 6 und Abb. 27 dargestellt.

Tab. 6: a-Werte und γ_θ -Werte aus den Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 3)

θ	a	γ_θ	γ_θ^1
0°	1,43	1,00	1,03
20°	1,34	0,94	0,96
40°	1,08	0,76	0,77
60°	0,65	0,46	0,47
80°	0,43	0,30	0,31

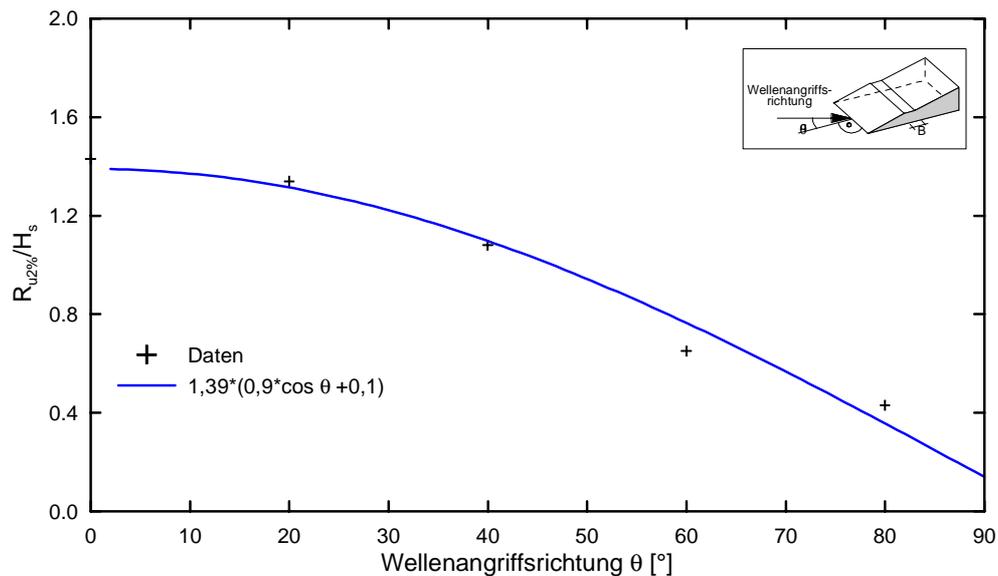
Abb. 27: Relative Auflaufhöhen $R_{u2\%}/H_s$ in Abhängigkeit von ξ_{op} mit Regressionsgeraden für unterschiedliche Anlaufrichtungen (Neigungen 1 : 3)

Berechnet man wiederum durch nichtlineare Regression die Faktoren der Funktion $y = a \cdot \cos x + b$ so ergibt sich:

$$(22) \quad \gamma_\theta = 0,90 \cdot \cos \theta + 0,10$$

Die Funktion ist zusammen mit den Messwerten in Abb. 28 dargestellt.

¹ berechnet durch Bezug auf den Wert der durch Regression ermittelten Funktion $y = a \cdot \cos \theta + b$ bei $\theta = 0^\circ$

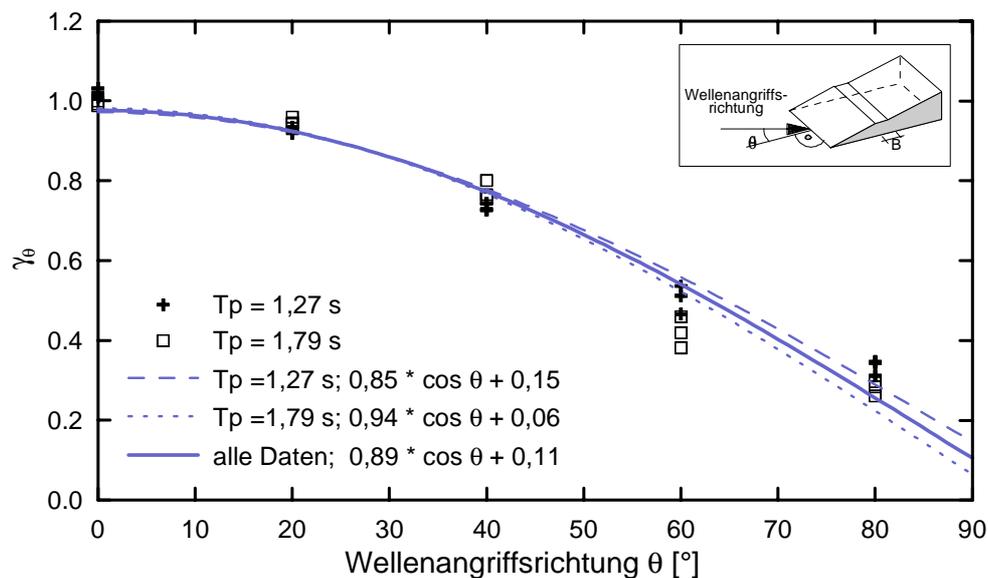
Abb. 28: Richtungsfunction γ_θ ermittelt aus den Regressionsgeraden aller Messungen (Neigung 1 : 3)

4.2.2.3 Ermittlung der Richtungsfunction γ_θ durch nichtlineare Regression aus gemessenen Richtungsverteilungen

Die Vorgehensweise bei der Berechnung entspricht der im Kapitel 4.2.1. Der a-Wert bei $\theta = 0^\circ$ wurde durch gewichtete Mittelung der a-Werte bei 0° und 20° berechnet und daraus für jeden Richtungsdatensatz mit gleichen Wellen- und Wasserstandsparametern die γ_θ -Werte bestimmt. Für den gesamten Datensatz ergibt sich die Richtungsfunction γ_θ aus der Regressionsrechnung zu

$$(23) \quad \gamma_\theta = 0,89 \cdot \cos\theta + 0,11$$

Die getrennten Berechnungen für die Perioden $T_p = 1,27$ s und $T_p = 1,79$ s ergaben nur leicht abweichende Funktionsverläufe. Die Daten und die Funktionen sind in Abb. 29 dargestellt.

Abb. 29: Richtungsfunction γ_θ ermittelt aus allen Messungen (Deichneigung 1 : 3)

4.2.3 Ergebnisse für Bermenprofile

Neben den ebenen Deichprofilen wurden im Wellenbecken des Franzius-Instituts auch Böschungen mit Bermen und ein konkaves Knickprofil untersucht. Die detaillierte Analyse des Wellenaufbaus für diese Bauwerksgeometrien ist im Teilbericht zu diesem Forschungsprojekt „Einfluss von Bermen und Knicken im Deichquerschnitt auf den schrägen Wellenaufbau“ (Oumeraci *et al.*, 2002) gegeben. Daher werden hier nur die wesentlichen Ergebnisse der Modellversuche mit Bermen- und Knickprofilen dargestellt.

4.2.3.1 Einfluss von Bermen / Knicken bei senkrechtem Wellenangriff

Die Berme innerhalb der Deichgeometrie lässt sich beschreiben durch die Bermenbreite B und die Höhenlage der Berme d_B bezüglich des Ruhewasserstandes (vgl. Abb. 30). Das Knickprofil stellt dabei eine Sonderform mit der Bermenbreite $d_B=0\text{m}$ und unterschiedlicher oberer und unterer Böschungsneigung ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) dar. Die Veränderung der Parameter Breite und Höhenlage der Berme / des Knickes bezüglich des Ruhewasserspiegels führt zu einer deutlichen Änderung der Wellenaufbauprozesse am Deich und somit auch zu einer Änderung der Wellenaufbauhöhe gegenüber durchgehenden Böschungen und wird daher im folgenden näher beschrieben.

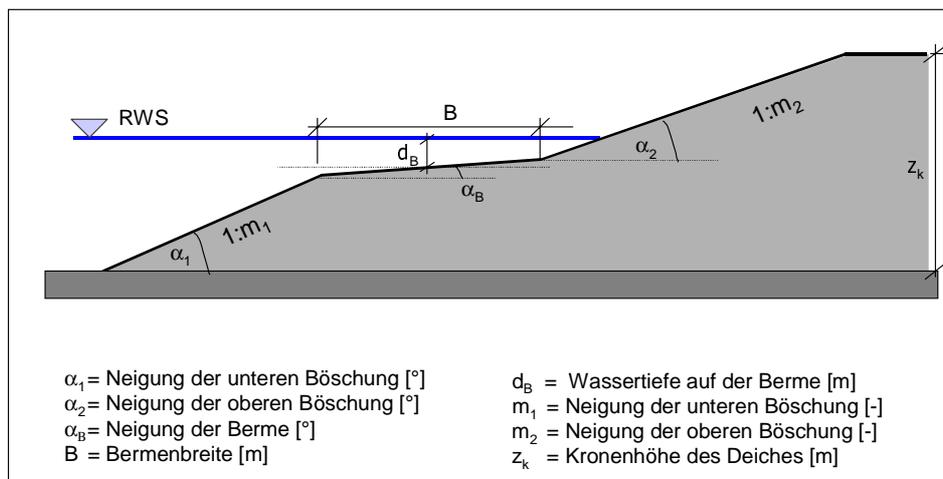


Abb. 30: Geometrische Parameter für ein Deichprofil mit Berme

a) Bermenprofile

In Abbildung 31 ist die relative Wellenaufbauhöhe $R_{u2\%}/H_s$ über der normierten Brecherkennzahl $1/(H_s/L_0)^{1/2}$ für alle untersuchten Bermengeometrien und als Vergleich für die durchgehende 1 : 6 und 1 : 3 Böschung dargestellt. Die relative Wellenaufbauhöhe steigt bei allen Deichgeometrien deutlich mit zunehmendem Wert $(H_s/L_0)^{-1/2}$ an. Vergleicht man die Ergebnisse am durchgehenden 1 : 6 Deich mit den Ergebnissen der Versuche mit Bermen am 1 : 6 Deich, so wird deutlich, dass die Berme die Wellenaufbauhöhe reduziert. Gleiches gilt auch für den 1 : 3 geneigten Deich mit und ohne Berme. Beim 1 : 3 Deich mit Berme ist jedoch der Einfluss des Wasserstandes auf den relativen Wellenaufbau deutlich größer als am 1 : 6 Deich, so dass die relativen Werte für den Wellenaufbau eine große Streubreite aufweisen.

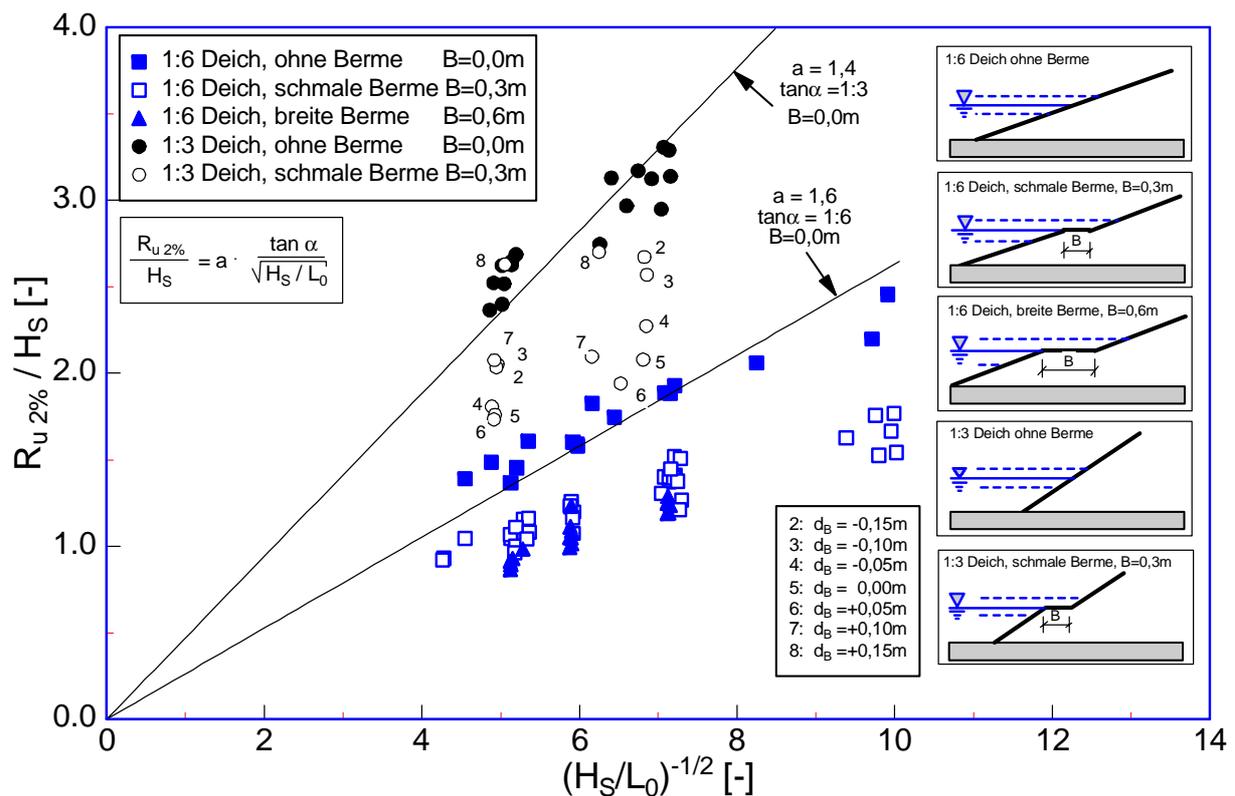


Abb. 31: Relative Wellenaufbauhöhe für den 1:6 geneigten Deich mit und ohne Berme

Diese Reduktionen der Wellenaufbauhöhe infolge der Bermen können zum einen damit begründet werden, dass sich beim Wellenaufbau an einer Böschung mit Berme die Wellenaufbauprozesse gegenüber einer durchgehenden Böschung verändern. Der Einbau einer Berme führt dazu, dass die vorherige Welle einen größeren Einfluss auf den Wellenaufbau der nachfolgenden Welle hat.

Es kommt durch das Aufeinandertreffen der entgegengesetzten Bewegungsrichtungen zu einer Energiedissipation. Außerdem kommt es an den Übergängen von der Böschung zur Berme und von der Berme zur Böschung zu Turbulenzen beim Wellenaufbau, die ebenfalls eine Energiedissipation bewirken. Das Vorhandensein einer Berme kann aber auch als eine Reduktion der mittleren Deichneigung angesehen werden, die zu einer Verringerung der relativen Wellenaufbauhöhe führt.

Anschließend wurden die Ergebnisse der Wellenaufbauuntersuchungen mit Ansätzen aus dem Schrifttum zur Berücksichtigung von Bermen bei senkrechtem Wellenangriff verglichen und es zeigte sich, dass der Ansatz von *Van der Meer et al. (1998)*, der auch in der *EAK 2002* für die Bemessung von Seedeichen mit Bermenprofilen empfohlen wird, die Daten der Modellversuche mit einer mittleren Standardabweichung von 5 % am besten beschreibt. Dieser Vergleich ist in Abbildung 32 dargestellt.

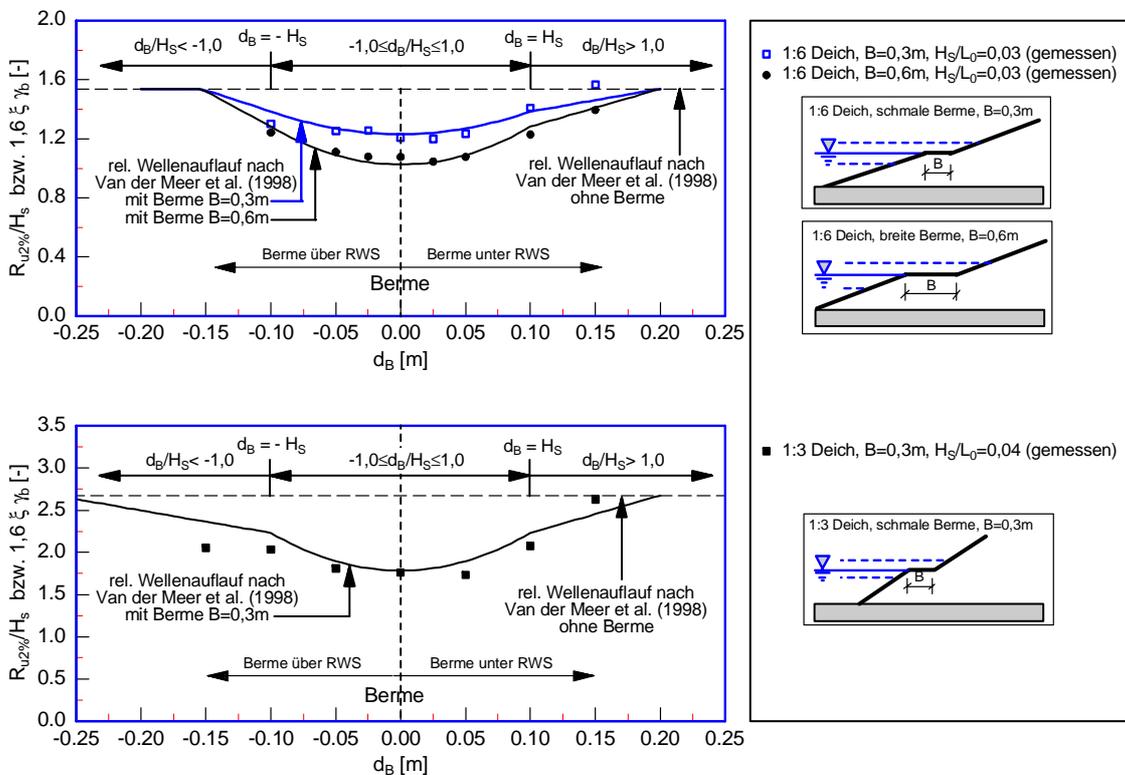
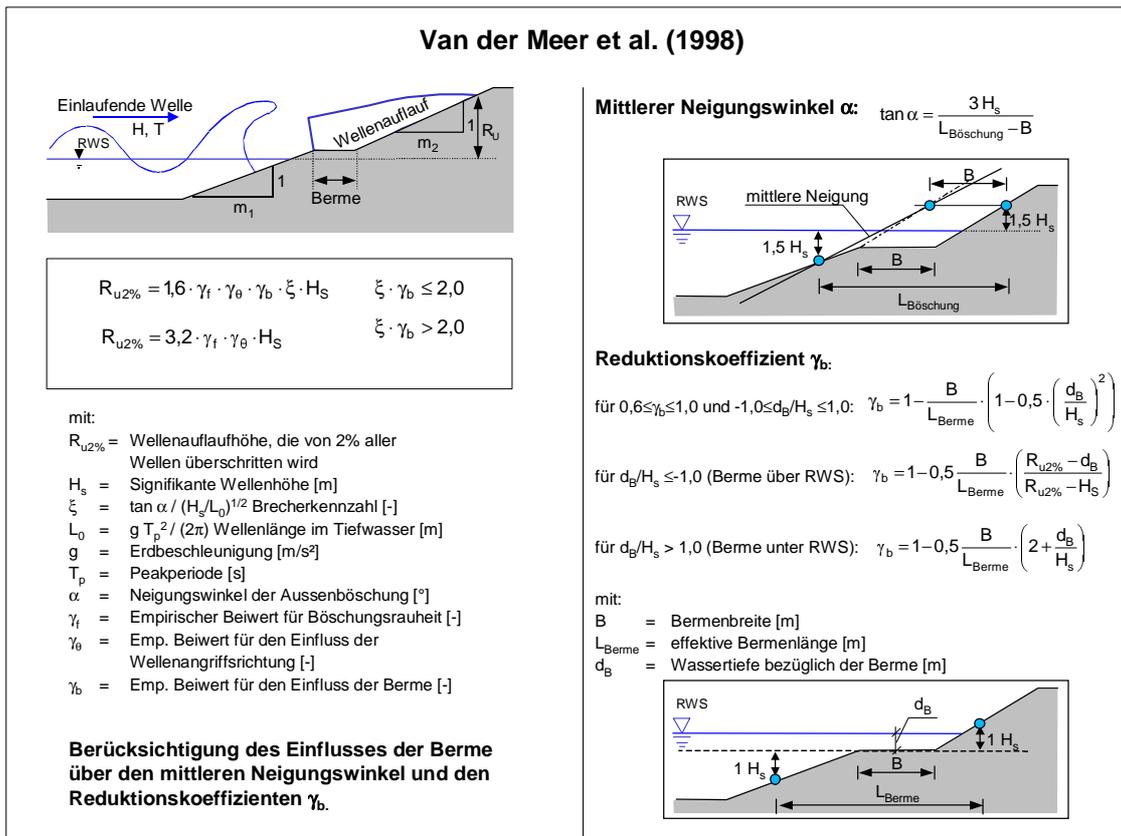


Abb. 32: Vergleich der gemessenen Wellenaufbauhöhen mit den nach dem Verfahren von *Van der Meer et al. (1998)* berechneten Werten für Deichprofile mit Berme

b) konkaves Knickprofil

Für das konkave Knickprofil sind die relativen Wellenaufbauhöhen $R_{u2\%}/H_S$ über der normierten Brecherkennzahl $1/(H_S/L_0)^{1/2}$ in Abbildung 33 dargestellt. Die Versuche am Knickprofil wurden für zwei Wellensteilheiten durchgeführt und der Wasserstand wurde zwischen $d = 0,35\text{m}$ ($d_B = -0,15\text{m}$) und $d = 0,65\text{m}$ ($d_B = +0,15\text{m}$) variiert. Es zeigt sich, dass auch hier die Bandbreite der relativen Wellenaufbauhöhe für gleiche $(H_S/L_0)^{-1/2}$ -Werte von denen am 1 : 3 Deich (hoher Wasserstand) bis zu denen am 1 : 6 Deich (niedriger Wasserstand) reicht.

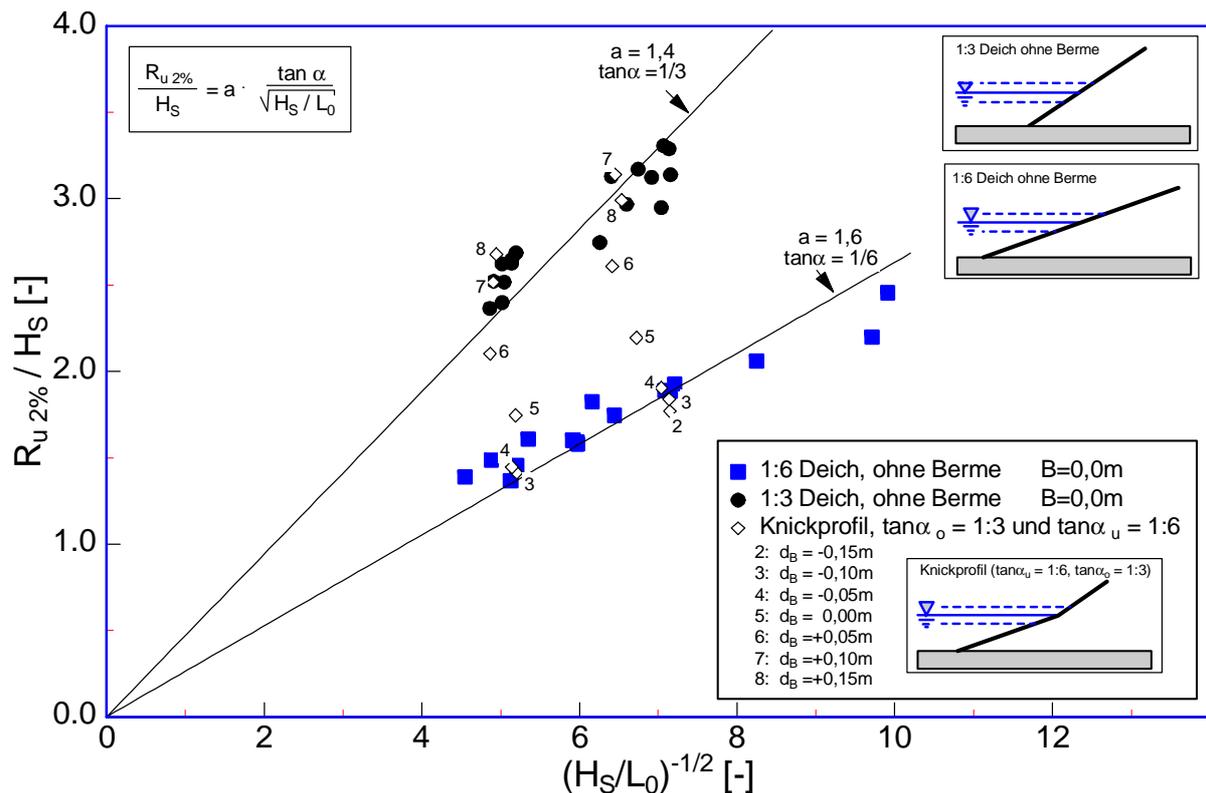


Abb. 33: Relative Wellenaufbauhöhe für den Deich mit Knickprofil und 1:6 und 1:3 geneigten Deich

Bei niedrigen Wasserständen erreichen die auflaufenden Wellen die obere steilere Böschung gar nicht oder nur in sehr geringer Anzahl, so dass der Wellenaufbauprozess hauptsächlich auf der unteren 1 : 6 geneigten Böschung stattfindet. In diesem Fall entspricht die Wellenaufbauhöhe etwa der, die am 1 : 6 Deich gemessen wurde. Mit zunehmendem Wasserstand nimmt auch der Einfluss der Neigung der oberen Böschung zu, bis die einlaufenden Wellen nur noch durch die obere 1 : 3 geneigte Böschung beeinflusst werden, da der gesamte Prozess des Wellenbrechens und Wellenauflaufes in diesem Bauwerksabschnitt auftritt, und so der Wellenaufbau dem am 1 : 3 geneigten Deich entspricht.

Auch für das Knickprofil wurde eine Vergleich mit den bestehenden Verfahren durchgeführt, dabei zeigte sich jedoch, dass eine lineare Berechnung der mittleren Neigung nach der folgenden Formel zur Ermittlung der mittleren Neigung in linearer Form zwischen $d_B = -0,05\text{m}$ und $d_B = 0,15\text{m}$, die in Abbildung 34 mit den gemessenen Daten verglichen dargestellt ist, am besten geeignet ist, um die Ergebnisse am Knickprofil zu beschreiben:

$$(24) \quad \tan \alpha_{\text{mittel}} = \frac{\tan \alpha_o - \tan \alpha_u}{2H_s} d_B + \frac{1}{4} \tan \alpha_o + \frac{3}{4} \tan \alpha_u \quad \text{für } 0,5H_s < d_B < 1,5H_s$$

mit: $\tan \alpha_o$ = Neigung der Böschung oberhalb des Knickes
 $\tan \alpha_u$ = Neigung der Böschung unterhalb des Knickes

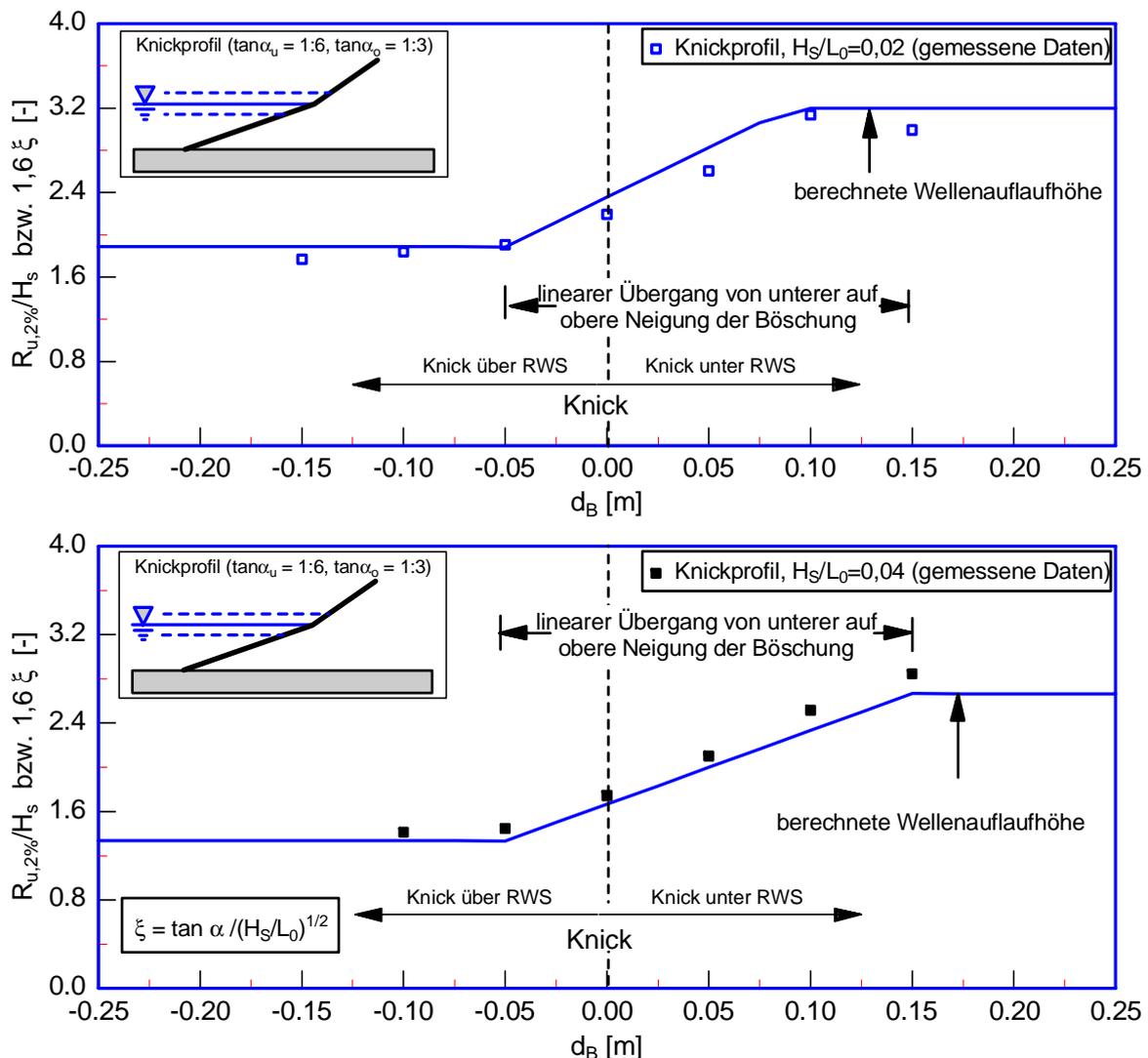


Abb. 34: Vergleich der berechneten (unter Verwendung von Gl. (24)) und gemessenen Wellenauflaufhöhen für das Knickprofil

Die Ergebnisse zum Einfluss der Böschungsneigung, der Bermenbreite und der Höhenlage der Berme bezüglich des Ruhewasserspiegels und der Einfluss des Knickprofils können auf Basis der Modellversuche wie folgt zusammengefasst werden:

- Bermen reduzieren den Wellenauflauf signifikant,
- mit zunehmender relativen Bermenbreite B/L_0 nimmt der Wellenauflauf nur bis zu einer maximalen relativen Breite von $B/L_0 \approx 0,2$ ab (L_0 =Wellenlänge im Tiefwasser),
- die Höhenlage der Berme d_B bezüglich des RWS hat einen signifikanten Einfluss auf den Wellenauflauf,

- der Einfluss des Wasserstandes ist beim 1 : 3 geneigten Deich mit Berme deutlicher zu erkennen als beim 1 : 6 geneigten Deich mit Berme,
- das Verfahren zur Berücksichtigung einer Berme bei der Ermittlung der Wellenaufbauhöhe nach *Van der Meer et al. (1998)* ist am besten geeignet, um die vorliegenden Daten zu beschreiben,
- die Höhenlage des Knickes d_B bezüglich des Ruhewasserstandes hat einen signifikanten Einfluss auf die relative Wellenaufbauhöhe und
- die relative Wellenaufbauhöhe am Knickprofil entspricht bis zu einer Höhenlage des Knickes $d_B = -0,05\text{m}$ der am durchgehenden 1 : 6 Deich, steigt danach linear an und entspricht ab $d_B = 0,15\text{m}$ der am 1 : 3 geneigten Deich gemessenen Wellenaufbauhöhe.

Nachdem nun die Einflüsse der Berme und des Knickes für senkrechten Wellenangriff quantifiziert wurden, erfolgt im folgenden Abschnitt eine Darstellung der Ergebnisse der Versuche mit schräger Wellenangriffsrichtung. Einfluss von Bermen / Knicken bei schrägem Wellenangriff

Analog zum Vorgehen bei den durchgehenden Böschungen wurden zunächst für alle Varianten und Richtungen die a-Koeffizienten und anschließend der Reduktionskoeffizient γ_θ berechnet. Die a-Koeffizienten und die Reduktionskoeffizienten γ_θ sind in Abbildung 35 für die untersuchten Bauwerksgeometrien und Wellenangriffsrichtungen dargestellt.

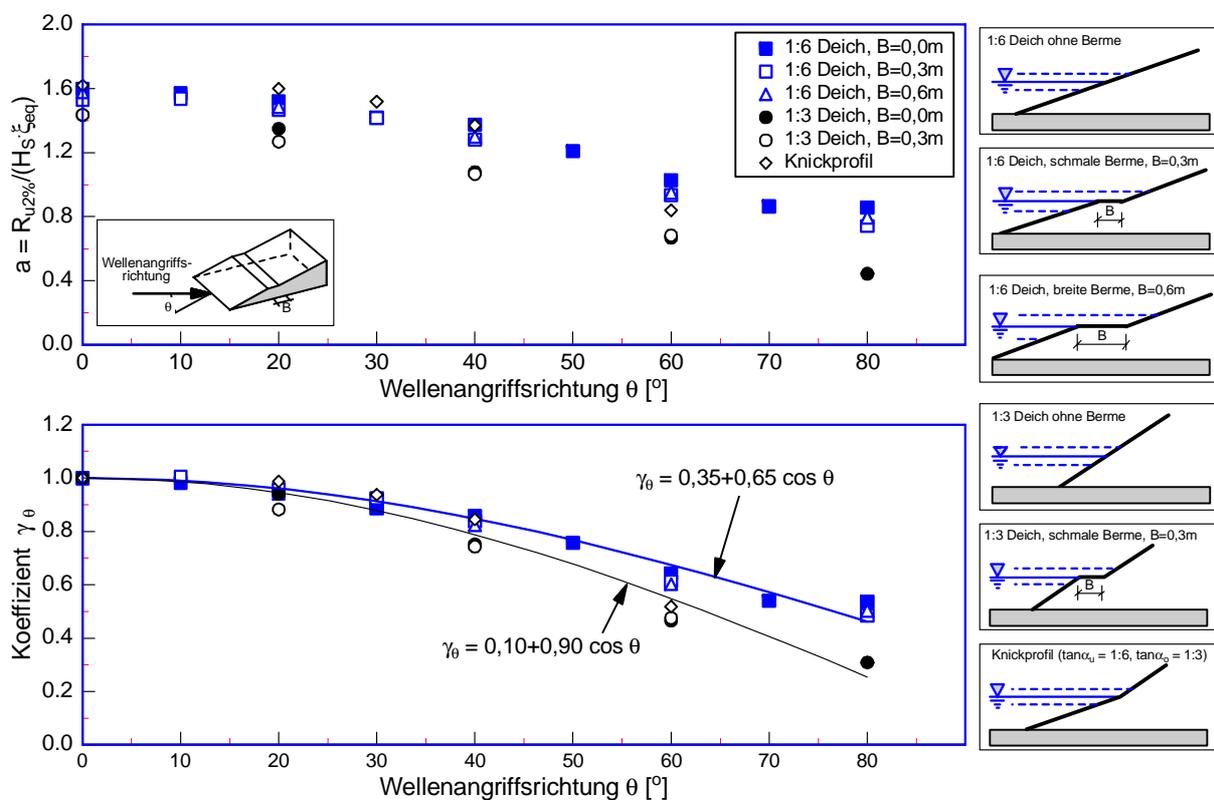


Abb. 35: a-Koeffizienten und Reduktionskoeffizient γ_θ für alle Bauwerksgeometrien ($\xi_{\text{eq}} = \gamma_b \cdot \xi_{\text{op}}$)

Im oberen Bild sind die mittleren a-Koeffizienten für alle Bauwerksgeometrien über die Richtungen dargestellt. Die mittleren Abweichungen bei der Ermittlung der a-Koeffizienten für alle Bauwerksgeometrien sind in Tab. 7 gegeben.

Tab. 7: a-Koeffizienten für Bauwerksvarianten mit Berme und Knick bei senkrechtem und schrägem Wellenangriff und Bandbreite der Streuungen

θ	1:6 Deich, B=0,30m a-Koeffizient	1:6 Deich, B=0,60m a-Koeffizient	1:3 Deich, B=0,3m a-Koeffizient	Knickprofil a-Koeffizient
0°	1,53 ±5,0%	1,58 ±4,1%	1,43 ±7,5%	1,62 ±4,8%
10°	1,53 ±4,4%	-	-	-
20°	1,47 ±3,7%	1,49 ±3,5%	1,27 ±6,5%	1,60 ±3,2%
30°	1,42 ±4,2%	-	-	1,52 ±4,7%
40°	1,28 ±3,8%	1,30 ±3,9%	1,07 ±7,4%	1,37 ±6,4%
60°	0,94 ±3,1%	0,95 ±3,5%	0,68 ±4,9%	0,84 ±9,6%
80°	0,74 ±5,5%	0,80 ±8,1%	-	-

Für fast alle Bauwerksgeometrien sind die Abweichungen bei senkrechtem Wellenangriff am größten, nehmen dann für kleine Angriffswinkel ab und für größere ($\theta = 60^\circ - 80^\circ$) wieder zu, wobei die maximale mittlere Abweichung bei 60° und 80° auftritt und ca. 15 % beträgt. Gerade für größere Wellenangriffsrichtungen ($\theta=60-80^\circ$) sind auch die Unterschiede in den a-Koeffizienten, die selbst in diesem Bereich schon großen Streuungen unterliegen, recht groß. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei gleichen Neigungen, d.h. den Versuchen am 1 : 6 Deich mit und ohne Berme kaum Unterschiede beim a-Koeffizienten und ebenso beim Reduktionskoeffizienten für schrägen Wellenangriff auftreten. D.h. die Berme und der schräge Wellenauflauf beeinflussen sich nicht gegenseitig, so dass die Funktion für die Richtungsabhängigkeit, die an einer durchgehenden Böschung ohne Berme ermittelt wurde auch für die Bermenprofile angewandt werden kann, um den schrägen Wellenangriff zu berücksichtigen. Auch die Ergebnisse für das Knickprofil entsprechen den Ergebnissen, die für die durchgehenden 1 : 6 und 1 : 3 geneigten Böschungen ermittelt wurden.

Die Reduktion der Wellenauflaufhöhe infolge schräger Wellenangriffsrichtung kann für den 1 : 6 Deich (mit und ohne Berme) und für das Knickprofil mit folgender Funktion berechnet werden:

$$(25) \quad \gamma_\theta = 0,35 + 0,65 \cdot \cos \theta$$

und für den 1:3 Deich (mit und ohne Berme):

$$(26) \quad \gamma_\theta = 0,10 + 0,90 \cdot \cos \theta$$

4.2.3.2 Überprüfung der Ergebnisse für naturähnliche Wellenspektren

Neben den bisher dargestellten Ergebnissen für theoretische Wellenspektren wurden zusätzlich Versuche zum Wellenauflauf für naturähnliche Wellenspektren durchgeführt. Dabei wurden zwei verschiedene in der Natur gemessene Wellenspektren beispielhaft im Wellenbecken untersucht. Ziel der Untersuchungen für die Naturspektren (Naturspektrum 1 und Naturspektrum 2) ist die Beschreibung der Wellenaufbauhöhe bei schräger Wellenangriffsrichtung und für Bermenprofile (s.a. *Bernhardt, 2002*). In Abb. 36 ist der Korrekturkoeffizient γ_θ für naturähnliche Wellenspektren und für theoretische Spektren für den 1:6 Deich mit schmaler Berme dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Richtungsfunktion für theoretische Wellenspektren $\gamma_\theta = 0,35 + 0,65 \cos \theta$ auch für die naturähnlichen Wellenspektren angewandt werden kann. Lediglich für die Versuche bei einer Wellenangriffsrichtung $\theta = 80^\circ$ weichen die Ergebnisse für theoretische Wellenspektren und naturähnliche Wellenspektren voneinander ab. Die Standardabweichung der Versuchsergebnisse gegenüber der Richtungsfunktion γ_θ ist mit $s' = 5\%$ gering. Es zeigt sich also, dass die ermittelte Richtungsfunktion für durchgehende Deichprofile und für Deichprofile mit Berme sowohl für theoretische Wellenspektren als auch für in der Natur gemessene Wellenspektren angewandt werden kann.

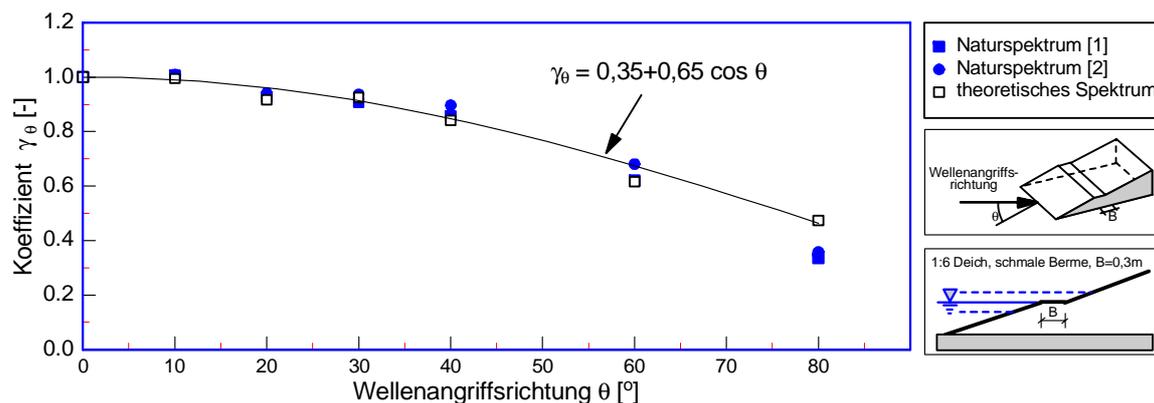


Abb. 36: Darstellung des Reduktionskoeffizienten γ_θ für in der Natur gemessene Wellenspektren am 1:6 Deich mit schmaler Berme

4.2.4 Bewertung der Ergebnisse der Projektphase 2

Der Vergleich der Versuchsergebnisse für senkrechten Wellenauflauf mit den derzeit empfohlenen Bemessungsverfahren ergab zunächst, dass die gemessenen relativen Wellenaufläufe $R_{u,2\%} / H_s$ nicht grundsätzlich von der Bemessungsformel

$$(27) \quad \frac{R_{u,2\%}}{H_s} = 1,6 \cdot \xi_{0p}$$

abweichen und die auftretenden Abweichungen denen im Schrifttum entsprechen.

Dies gilt für die Untersuchungen mit den beiden Deichneigungen. Eine etwas detailliertere Betrachtung der Ergebnisse aus den Versuchen mit der Neigung 1 : 6 zeigte jedoch, dass die Abweichungen nicht notwendigerweise als Streuungen im Sinne von Modelleinflüssen gese-

hen werden müssen. Vielmehr zeigen Messsätze mit gleichen Wellenhöhen und unterschiedlichen Wellenperioden durchaus einen tendenziell anderen Verlauf der von der Form her eher der von *Mase (1989)* gegebenen Funktion der Abhängigkeit des relativen Auflaufs von der Brecherzahl entspricht. Weiterhin zeigte der Vergleich der Datensätze mit unterschiedlichen signifikanten Höhen, dass der relative Wellenauflauf mit größer werdender Wellenhöhe bei gleicher Brecherkennzahl abnimmt. Dies könnte als grundsätzlicher Maßstabseffekt gedeutet werden. Modellbedingte Streuungen in den Versuchsergebnissen werden nicht ausgeschlossen, die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass die derzeit empfohlene Bemessungsformel eine vereinfachte Charakterisierung des Auflaufvorgangs darstellt.

Wie ebenfalls gezeigt wurde ist für den Koeffizienten der Bemessungsformel auch die Bezugswassertiefe von Bedeutung. Die Richtungsfunktion γ_θ für die Deichneigung 1 : 6 wurde in den Versuchen in Kanada und in Hannover übereinstimmend mit im Mittel etwa

$$(28) \quad \gamma_\theta = 0,35 + 0,65 \cdot \cos \theta$$

bestimmt. Grundsätzlich sollte eine Abhängigkeit von Wassertiefen am Deichfußpunkt und Wellenparametern bestehen. Im untersuchten Parameterbereich konnten aber keine signifikanten Abhängigkeiten aufgezeigt werden.

Die Untersuchungen am 1 : 3 geneigten Deich ergaben eine deutlich stärkere Abnahme der Richtungsfunktion γ_θ mit dem Anlaufwinkel. Durch Regressionsrechnungen wurde die Funktion zu

$$(29) \quad \gamma_\theta = 0,10 + 0,90 \cdot \cos \theta$$

ermittelt.

Für den Bereich $\theta = 0^\circ$ bis 60° wäre nach den Messungen aber durchaus eine reine Kosinusabhängigkeit gerechtfertigt:

$$(30) \quad \gamma_\theta = \cos \theta$$

Bei den Messergebnissen für die Anlaufrichtung $\theta > 70^\circ$ kann derzeit nicht völlig ausgeschlossen werden, dass sie durch Modellrandeffekte beeinflusst sind oder auch tatsächlich physikalisch bedingt sind. Dennoch werden zur Bemessung die angegebenen Richtungsfunktionen empfohlen, da üblicherweise bei Bemessungen eine Richtungsunsicherheit von $\pm 20^\circ$ bis 30° angenommen werden muss, und damit Wellenangriffsrichtungen $\theta > 70^\circ$ praktisch auszuschließen sind. Ergebnisse aus diesem Bereich können jedoch für die Bewertung von eingetretenen Ereignissen in der Natur von Bedeutung sein.

Die Analyse der Versuchsergebnisse für senkrechten Wellenangriff bei Bermenprofilen zeigte, dass auch hier die derzeit zur Bemessung verwendeten Ansätze nach *Van der Meer et al. 1998* am besten geeignet sind, um den Einfluss einer Berme auf den Wellenauflauf bei senkrechtem Wellenangriff zu quantifizieren. Dabei wurde ein deutlicher Einfluss des Wasserstandes und der Bermenbreite auf den Wellenauflauf festgestellt. Für das untersuchte konkave Knickprofil (untere Neigung 1 : 6 und obere Neigung 1 : 3) konnte für senkrechten Wellenangriff gezeigt werden, dass die relative Wellenauflaufhöhe für niedrige Wasserstände dem Wellenauflauf am 1 : 6 Deich entspricht, dann linear ansteigt und bei einem Wasser-

stand von 0,15 m oberhalb des Knickes dem Wellenauflauf am 1 : 3 geneigten Deich entspricht. Beim schrägen Wellenangriff konnte für die untersuchten Geometrien festgestellt werden, dass die Richtungsfunktion unabhängig von eingebauten Bermen im Deichquerschnitt ist und dass für den 1:6 Deich mit und ohne Berme folgende Richtungsfunktion verwendet werden kann:

$$(31) \quad \gamma_{\theta} = 0,35 + 0,65 \cos \theta$$

und für den 1:3 Deich mit und ohne Berme die folgende Funktion, die auch für die durchgehende 1:3 geneigte Böschung ermittelt wurde.:

$$(32) \quad \gamma_{\theta} = 0,10 + 0,90 \cos \theta$$

Insgesamt kann also auf der Basis der Modellversuche festgestellt werden, dass bei schrägem Wellenangriff bei Bermenprofilen hinsichtlich der Berücksichtigung der schrägen Wellenangriffsrichtung keine Unterschiede zu durchgehenden Böschungen beobachtet wurde, bzw. dass die gemessenen Unterschiede im Rahmen der Streuungen der Messergebnisse lagen. Eine Multiplikation der Korrekturkoeffizienten für die gleichzeitige Berücksichtigung von Bermen und schrägem Wellenangriff wie sie bisher bei der Bemessung verwendet wurde, konnte somit durch die Modellversuche bestätigt werden.

5 Theoretische Untersuchungen und Überlegungen zum schrägem Wellenauflauf

5.1 Anmerkung zur Bemessungsformel für Wellenauflauf

Die Form der heute gebräuchlichen Bemessungsformel für Wellenauflauf an gleichmäßig geneigten Seedeichen wurde erstmals von *Hunt (1959)* für regelmäßige Wellen auf der Grundlage hydraulischer Modellversuche veröffentlicht. Nach Umrechnung in das metrische System lautet die Formel:

$$(33) \quad R = 1,27 \cdot \sqrt{H} \cdot T \cdot \tan \alpha$$

Die Umrechnung der Formel von *Hunt* in die derzeit gebräuchliche Form mit dem Brecherparameter

$$(34) \quad \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}$$

wird üblicherweise in folgender Form angegeben:

$$(35) \quad \frac{R}{H} = \xi \quad (\text{Gültigkeitsbereich } \xi < 2,3)$$

Auch in hydraulischen Modellversuchen mit gleichmäßigen Wellenbedingungen (regelmäßige Wellen) treten Streuungen im Wellenauflauf auf. Hinweise dazu finden sich bei *Vinje*, der

für $R_{u2\%}$ in regelmäßigen Wellen einen Faktor 1,2 gegenüber dem Beiwert von *Hunt* ermittelt (nach *Tautenhain*, 1981). Die mündlich übermittelten Aussagen von *Vinje* lassen auch die grundsätzlich andere Interpretation dieses Faktors als Umrechnungsfaktor in Verbindung mit entsprechenden Wellenparametern für unregelmäßigen Seegang zu. Da aber auch *Tautenhain* (1981) solche Ergebnisse erzielte, soll die Auswirkung überprüft werden.

Tautenhain (1981) gibt ebenfalls eine Verteilung seiner Ergebnisse mit regelmäßigen Wellen an (Abb. 37). Weiterhin liegen die Ergebnisse von *Tautenhain* aus Messungen mit regelmäßigen Wellen um etwa 10% über den Ergebnissen von *Hunt*, wobei *Tautenhain* nicht ausschließt, daß dies an unterschiedlichen Modellrauhigkeiten liegen kann.

Für unregelmäßigen Seegang wird derzeit ausschließlich der Parameter $R_{u2\%}$ zur Charakterisierung des unregelmäßigen Wellenaufbaus verwendet.

Von *De Waal und Van Der Meer* (1992) wird die Verwendung der Bemessungsformel

$$(36) \quad \frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.5 \cdot \xi_{0p}$$

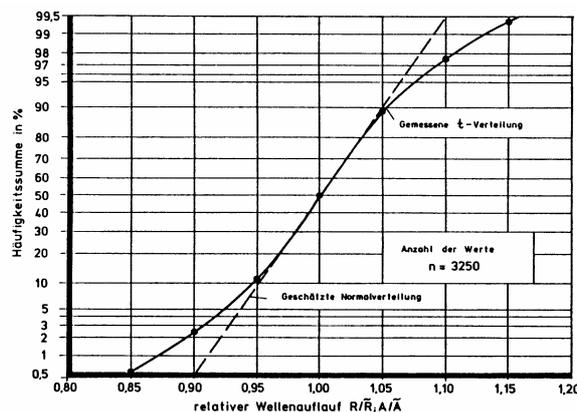


Abb. 37 Unterschreitungshäufigkeit des relativen Wellenaufbaus in regelmäßigen Wellen (*Tautenhain*, 1981)

empfohlen, deren Beiwert aus Modellmessungen ermittelt wurde und auf die Wellenparameter signifikante Wellenhöhe und Peakperiode bezogen sind (Abb. 38).

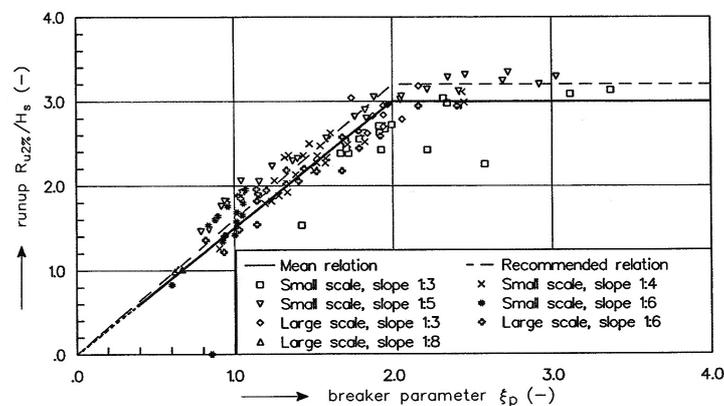


Abb. 38 Relativer Wellenaufbau in Abhängigkeit vom Brecherparameter ξ_p (*De Waal und Van Der Meer*, 1992)

Auch andere Autoren haben diese lineare Abhängigkeit (teilweise in anderer Formulierung) auf ihre Messergebnisse angewandt, allerdings meist auf die mittlere Wellenperiode \bar{T} bezogen.

Da das Verhältnis \bar{T}/T_p u.a. auch von der Form des Spektrums abhängig ist und stark schwanken kann (*Goda, 2000*, gibt z. B. aus numerischen Simulationen einen Bereich von 1,1 bis 1,72 für verschiedenen Spektrumsformen an) muss prinzipiell eine erhebliche Unsicherheit in der Anwendung bestehen.

Grundsätzlich könnte die Unsicherheit bei der Verwendung unabhängiger charakteristischer Parameter bei einer Bemessungsformel auf der Grundlage der *Hunt*-Formel

$$(37) \quad \text{Schreibweise im folgenden} \quad R = 1,27 \cdot \sqrt{H} \cdot T \cdot \tan \alpha$$

vermieden werden, wenn $R_{u2\%}$ direkt aus dem Parameter $(\sqrt{H} \cdot T)_{2\%}$ berechnet würde. Dies wäre die konsequente Vorgehensweise, wenn man voraussetzt, dass jede individuelle Welle einen Wellenauflauf entsprechend ihrer Höhe und Periode erzeugt.

Wenn diese Voraussetzungen zulässig sind, sollte bei der Verwendung des Parameters $(\sqrt{H} \cdot T)_{2\%}$ (bei deterministischer Betrachtung) der gleiche Beiwert (1,27) wie für regelmäßige Wellen gemessen werden. Abweichungen könnten u.a. aus Vorwelleneinflüssen erwartet werden (siehe dazu Kapitel 5.3).

Die Auswertung der eigenen Messungen mit signifikanten Wellenparametern $H_s = H_{m0}$ und T_p ergab Werte von rd.

$$(38) \quad \frac{R_{2\%}}{H_{m0}} = 1,47 \text{ bis } 1,51 \cdot \xi_{0p}$$

mit einem absoluten Streubereich des Beiwertes von rd. 1,4 bis 1,6 und stimmt damit sehr gut mit den von *De Waal und Van Der Meer* gegebenen Werten überein.

Die Auswertung der eigenen Messungen mit dem signifikantem Parameter $(\sqrt{H} \cdot T)_{2\%}$ ergab

$$(39) \quad R_{u2\%} = 1,65 \cdot (\sqrt{H} \cdot T)_{2\%} \cdot \tan \alpha$$

Der Beiwert liegt im Vergleich zum Beiwert von *Hunt* (1,27) um rd. 30% höher.

Auch wenn man den von *Tautenhain (1981)* gemessenen um rd. 10% höheren Beiwert als Bezugswert ansetzen würde, erklärt dies nicht die vorhandenen Abweichungen.

Ergebnisse von Untersuchungen hierzu, die die Unsicherheiten des Beiwertes von *Hunt* und den Vorwelleneinfluß nach *Tautenhain* berücksichtigen, sind im Kapitel 5.3 zusammengestellt.

5.2 Anmerkungen zum Einfluss von Shoaling und Refraktion bei der Interpretation von Messungen zum Wellenauflauf an Seedeichen

5.2.1 Theoretische Grundlagen

Legt man für Berechnungen des Wellenaufbaus die Formel von *Hunt (1959)*

$$(40) \quad R = 1,25 \cdot \sqrt{H} \cdot T \cdot \tan \alpha$$

zugrunde, bei der vorausgesetzt ist, dass $H = H_0$ ist, müsste bei hydraulischen Modellversuchen, bei denen nicht Tiefwasserbedingungen an der Referenzmessstelle vorliegen, prinzipiell eine entsprechende Umrechnung auf Tiefwasserwerte erfolgen. Bezieht man die Formel auf die Wellenhöhe an einer bezüglich der Wassertiefe beliebigen Messstelle gilt somit

$$(41) \quad R = \frac{1,25}{\sqrt{K_s}} \cdot \sqrt{H} \cdot T \cdot \tan \alpha$$

Weiterhin tritt durch Refraktion bei schrägem Wellenangriff an ebenen Stränden grundsätzlich eine kontinuierliche Abnahme der Wellenhöhe bis zum Brechpunkt ein und gleichzeitig eine Richtungsänderung. Inwieweit allerdings an steileren Böschungen Shoaling und Refraktion entsprechend einer Wellentheorie (hier lineare Wellentheorie) auftreten, kann derzeit nur durch hydraulische Modelluntersuchungen geprüft werden.

Geht man von der Gültigkeit der linearen Wellentheorie aus, ist also herzuleiten, dass die Angaben von Wellenrichtungen bei hydraulischen Modellversuchen ohne Rückrechnung auf Tiefwasserwerte (bzw. auf eine innerhalb der Messungen gleichwertige Wassertiefe) nicht eindeutig sind und bei Messungen in unterschiedlichen Wassertiefen, bzw. mit unterschiedlichen Wellenperioden, unterschiedliche Refraktionseinflüsse in den Richtungsfunktionen enthalten sein können. Da alle diese Veränderungen von der Wellenperiode abhängen, sind auch Versuche mit unterschiedlichen Wellenperioden vom Grundsatz her nicht vergleichbar, wenn sie nicht auf Tiefwasserwerte (bzw. auf eine innerhalb der Messungen gleichwertige Wassertiefe) bezogen werden.

Ausgehend von der Vorstellung, dass die Wellenaufbauhöhe R vom Energiefluss und vom Anlaufwinkel im Brechpunkt abhängig ist, wird für die hier durchgeführte theoretischen Untersuchungen die folgende Vorgehensweise angewendet:

- i) Eingangswellenhöhe:
Rückrechnung der Tiefwasserwellenhöhe aus der Wellenhöhe am Messpunkt unter Berücksichtigung der Refraktion zwischen Messpunkt (Index m) und Brechpunkt (Index b) der Welle

$$H_0' = H_0 \cdot K_{R_{m,b}} = \frac{H_m}{K_{S_m}} \cdot K_{R_{m,b}}$$

- ii) Eingangswellenrichtung:
Durch Refraktion veränderte Wellenrichtung im Brechpunkt.

Grundsätzlich ist der signifikante Brechpunkt keine sehr sicher zu ermittelnde Größe. Von daher wäre grundsätzlich die Wahl der Tiefwasserwerte auch für die Refraktionsgrößen die beste Wahl.

Da jedoch nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Seegang immer im Tiefwasser erzeugt wird und die Auswirkung der Refraktion auch nicht immer der an ebenen Stränden entspricht, ist es notwendig, den Refraktionseinfluss gesondert zu betrachten und auf den Brechpunkt zu beziehen. Dadurch wird auch der Richtungseinfluss unabhängig von der Wellenperiode, was bei jeder anderen Bezugswassertiefe nicht zu vermeiden wäre.

Für die im weiteren durchgeführten Berechnungen wird der signifikante Brechpunkt näherungsweise als Brechpunkt einer regelmäßigen Wellen der Höhe $H_{2\%} = 1,4 \cdot H_{m0}$ nach den Diagrammen des *Shore Protection Manual (1984)* bestimmt.

Für die in den Modelluntersuchungen verwendeten Wellenhöhen und Wellenperioden ergaben sich danach Wassertiefen zwischen 0,168 m und 0,182 m. Den folgenden Ausführungen liegen Ergebnisse von Rechnungen in einheitlich 0,18 m Wassertiefe zugrunde. Grundsätzlich wäre aber auch der Refraktionseinfluss zu berücksichtigen.

Für die durchgeführten Messungen werden die Einflüsse aus Refraktion und Shoaling für Spektren (auch Richtungsspektren) nach der linearen Superpositionsmethode und nach der linearen Wellentheorie berechnet. Dabei wurden TMA-Spektren für 0,5 m Wassertiefe mit 32 Frequenzstützstellen und $\Delta\theta = 10^\circ$ mit einem Grenzwinkel der Richtungsfunktion von $\theta_{\max} = \pm 50^\circ$ zugrunde gelegt.

Neben Wellenhöhen und -richtungen wird durch die Refraktion auch die Richtungsbandbreite verändert. Bei ebenen Stränden ist im Brechpunkt eine geringere Bandbreite vorhanden. Als Wellen- und Wellenauflaufparameter wurden für die Berechnungen der vorgenannten Einflüsse die derzeit üblichen in der Bemessungsformel verwendeten Parameter $R_{u2\%}$, H_{m0} und T_p ausgewählt. Die Bemessungsformel für unregelmäßigen Seegang bei senkrechtem Wellenangriff

$$(42) \quad \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1,5 \cdot \xi_{0p}$$

läßt sich für die in den Versuchen verwendete gleichmäßige Deichneigung 1 : 6 in folgender Form schreiben:

$$(43) \quad R_{u2\%} = 0,312 \cdot \sqrt{H_{m0}} \cdot T_p \quad \text{a oder} \quad \frac{R_{u2\%}}{\sqrt{H_{m0}} \cdot T_p} = 0,312$$

Für schrägen Wellenangriff ist der Beiwert richtungsabhängig.

Ohne Berücksichtigung der Einflüsse aus Shoaling und Refraktion ergibt sich die in Abb. 39 dargestellte Richtungsabhängigkeit.

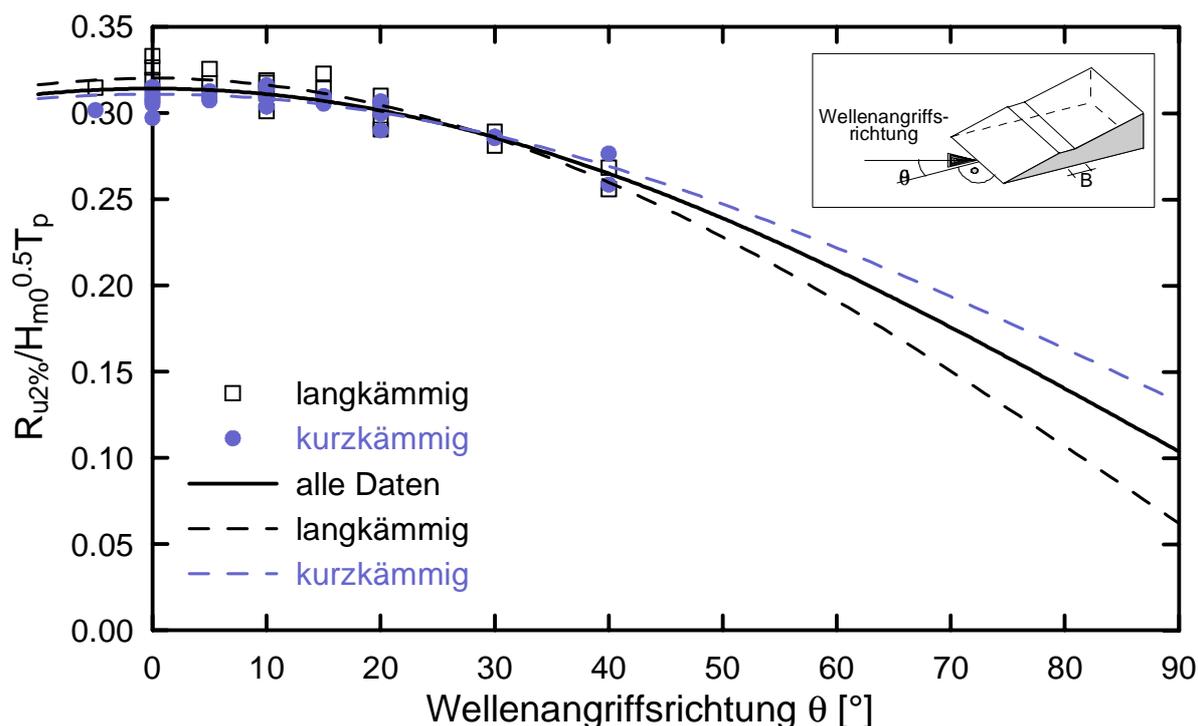


Abb. 39: Abhängigkeit des Beiwertes von der Wellenanlaufsrichtung ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell

Durch nichtlineare Regressionsrechnungen wurden Funktionen der Form $y = a \cdot \cos(x) + b$ für die Versuchsergebnisse berechnet. Diese Funktionen sind in Abb. 39 den Messungen gegenübergestellt. Die berechneten Faktoren und die Regressionskoeffizienten R sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 8: Berechnete Faktoren für die Versuchsergebnisse ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell

	a	b	R
Alle Daten	0,21	0,10	0,88
Langkämmig	0,2583	0,0620	0,9258
Kurzkämmig	0,1786	0,1324	0,8973

Für die Wellenanlaufsrichtung 0° ergibt sich nach diesen Rechnungen der Beiwert berechnet aus allen Versuchsdaten zu

$$(44) \quad \frac{R_{u2\%}}{\sqrt{H_{m0}} \cdot T_p} = 0,314$$

und liegt damit sehr genau bei dem Wert der Bemessungsformel (0,312). Die reine Richtungsfunktion γ_θ ergibt sich dann zu:

$$(45) \quad \gamma_\theta = 0,67 \cdot \cos \theta + 0,33$$

Die Umrechnung der Bezugswellenhöhe H_{m0} und der Wellenrichtung θ unter Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion ergab die in Abb. 40 dargestellte Richtungsabhängigkeit.

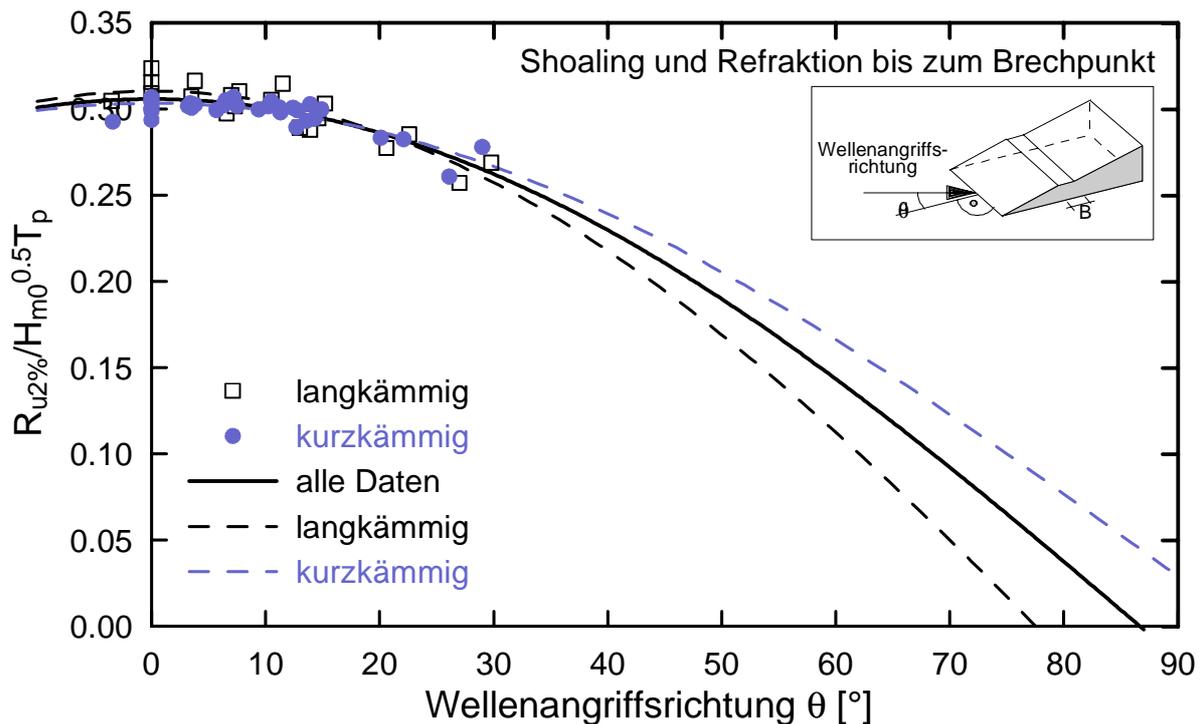


Abb. 40: Abhängigkeit des Beiwertes von der Wellenanlaufrichtung mit Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell

Die Anpassungsfunktionen wurden wiederum für den Funktionstyp $y = a \cdot \cos(x) + b$ berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 9 zusammengestellt.

Tab. 9: Berechnete Faktoren für die Versuchsergebnisse ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell

	a	b	R
Alle Daten	0,3247	-0,0189	0,8434
Langkämmig	0,3958	-0,0853	0,8850
Kurzkämmig	0,2744	0,0290	0,8475

Für die Wellenanlaufrichtung 0° ergibt sich der Beiwert berechnet aus allen Versuchsdaten zu

$$(46) \quad \frac{R_{u2\%}}{\sqrt{H_{m0}} \cdot T_p} = 0,306$$

und liegt damit rund 2 % niedriger als bei der Auswertung ohne Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion. Die reine Richtungsfunktion γ_θ ergibt sich zu

$$(47) \quad \gamma_\theta = 1,06 \cdot \cos\theta - 0,06$$

und kann damit mit genügender Genauigkeit durch eine reine Kosinusfunktion beschrieben werden.

Bei Anpassung einer reinen Kosinusfunktion $y = a \cdot \cos(x)$ ergaben sich die folgenden Beiwerte und Regressionskoeffizienten (Tab. 10). Die Anpassungsfunktionen sind in Abb. 41 den Versuchswerten gegenübergestellt.

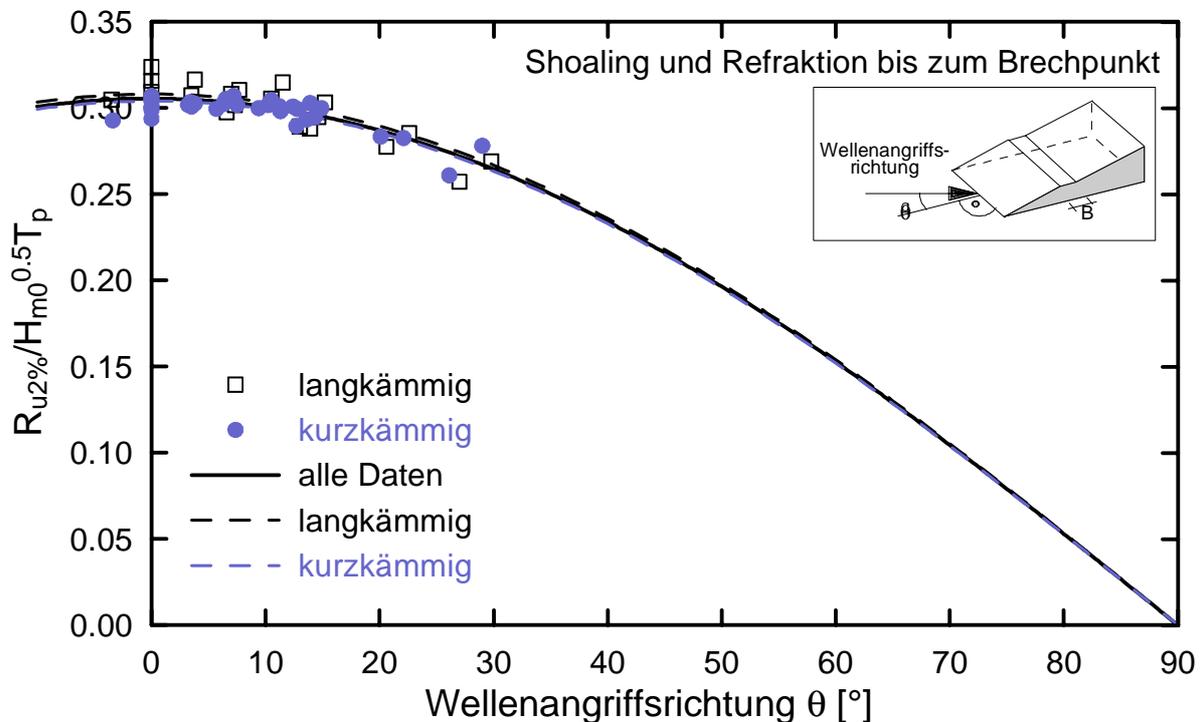


Abb. 41: Abhängigkeit des Beiwertes von der Wellenanlaufsrichtung mit Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell

Tab. 10: Berechnete Faktoren für die Versuchsergebnisse mit Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion im Modell

	a	R
Alle Daten	0,3054	0,8420
Langkämmig	0,3080	0,8629
Kurzkämmig	0,3039	0,8425

Für die Wellenanlaufsrichtung 0° ergibt sich der Beiwert berechnet aus allen Versuchsdaten zu

$$(48) \quad \frac{R_{u2\%}}{\sqrt{H_{m0} \cdot T_p}} = 0,305$$

und entspricht damit nahezu exakt dem Ergebnis für den Funktionstyp $y = a \cdot \cos(x) + b$.

5.2.2 Abschätzung des theoretischen Verlaufs der Richtungsfunktion

Unter Annahme eines kosinusförmigen Verlaufs der Richtungsfunktion γ_θ im Brechpunkt soll im folgenden der theoretisch zu erwartende Verlauf der Richtungsfunktion bezogen auf die Wellenrichtung am Deichfuß, die allen bisherigen Auswertungen zugrunde liegt, abgeschätzt werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass Refraktion entsprechend der linearen Theorie eintritt.

Shoaling wird nicht berücksichtigt, da damit keine Änderung der Richtungsfunktion verbunden ist.

Wie zuvor wird die Abschätzung nur für Wellenhöhen $H_s = 0,10$ m vorgenommen und es wird zunächst bei senkrechtem Wellenanlauf von einer signifikanten Wassertiefe im Brechpunkt von $d_b = 0,18$ m unabhängig von der Wellenperiode ausgegangen. Für schrägen Wellenanlauf wird zusätzlich angenommen, dass mit der durch Refraktion bis zum Brechpunkt hervorgerufenen Abminderung der Wellenhöhe eine proportionale Abminderung der signifikanten Wassertiefe im Brechpunkt stattfindet. Der Winkel im Brechpunkt kann daher nur iterativ ermittelt werden.

Die theoretisch erwartete Richtungsfunktion bezogen auf den Deichfuß wird wie folgt ermittelt: Iterativ wird der Refraktionskoeffizient $K_{r,b}$, der das Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe H_s im Brechpunkt zur signifikanten Wellenhöhe H_s am Deichfuß angibt, berechnet, sowie die zugehörige Richtung θ_b . Da der Wellenaufbau bei unveränderter Deichneigung und Wellenperiode proportional zu $\sqrt{H_s}$ ist, wird der sich aus der Richtungsfunktion im Brechpunkt ergebende Wert $\cos \theta_b$ noch mit $\sqrt{K_{r,b}}$ multipliziert und dann der Wellenrichtung am Deichfuß zugeordnet.

Die Ergebnisse für die kürzeste und längste Periode der untersuchten Wellenspektren sind in Abb. 42 aufgetragen, zusammen mit der gemessenen Richtungsfunktion für die Deichneigung 1 : 6.

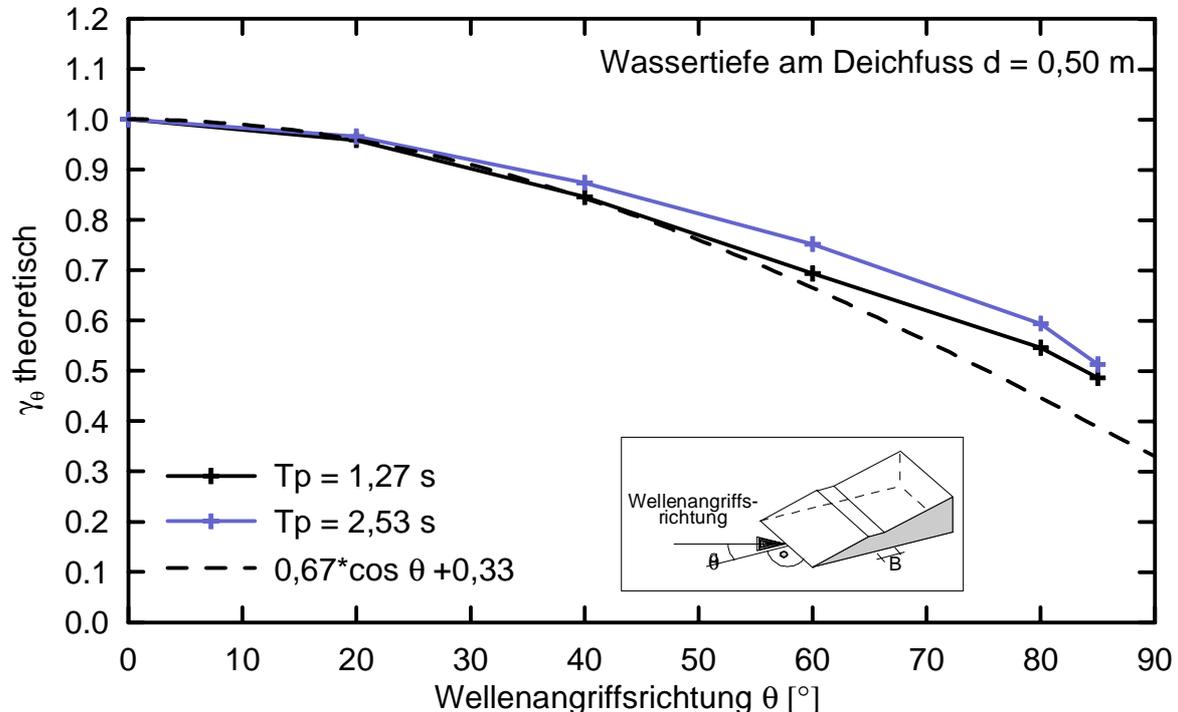


Abb. 42: Theoretisch erwartete Richtungsfunktionen und gemessene Richtungsfunktion für eine Deichneigung 1 : 6

Die gemessene Richtungsfunktion liegt etwas niedriger als die theoretisch erwartete. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Refraktionseffekte wegen der Deichneigung (die

lineare Theorie gilt strenggenommen nur für sehr geringe Neigungen) nicht mehr voll entsprechend der linearen Wellentheorie auftreten. Für diese Interpretation spricht auch, dass die gemessene Richtungsfunktion für die steilere Deichneigung 1 : 3 noch niedriger gemessen wurde und sich der reinen Kosinusform nähert.

5.3 Einflüsse aus Unsicherheiten die aus Messungen in regelmäßigen Wellen bekannt sind und dem Vorwelleneinfluss nach TAUTENHAIN

(a) Unsicherheiten aus Messungen in unregelmäßigen Wellen

Nach den bereits erwähnten Angaben von *Vinje* liegen 2 % der in regelmäßigen Wellen gemessenen Aufläufe 20 % bis 25 % höher als der mittlere Auflauf. Legt man die Normalverteilung zugrunde entspricht dies einer Standardabweichung von $\sigma = 0,097$ bis $\sigma = 0,122$. Um den Einfluss auf den Wellenauflaufparameter $R_{u2\%}$ in unregelmäßigen Wellen zu ermitteln wurde zunächst ein Datensatz von 10.000 zufälligen $\sqrt{H} \cdot T$ -Ereignissen mit RAYLEIGH-Verteilung nach der MONTE-CARLO-Methode erzeugt. Diese Werte wurden mit einem entsprechenden zweiten Datensatz mit zufälligen normalverteilten Faktoren mit dem Mittelwert 1 und $\sigma = 0,1$ multipliziert und so ein neuer zweiter Datensatz erzeugt, der damit Streuungen der von *Vinje* angegebenen Art enthält. In Abb. 43 sind zunächst die beiden Datensätze als Einzelwerte gegenübergestellt. Abb. 44 zeigt das Verhältnis der Quantilen der beiden Datensätze, aus denen das Verhältnis des 2 %-Ereignisses (entsprechend der aus diesem Einfluss zu erwartenden Veränderung des Parameters $R_{u2\%}$) zu rund 1,025 entnommen werden kann.

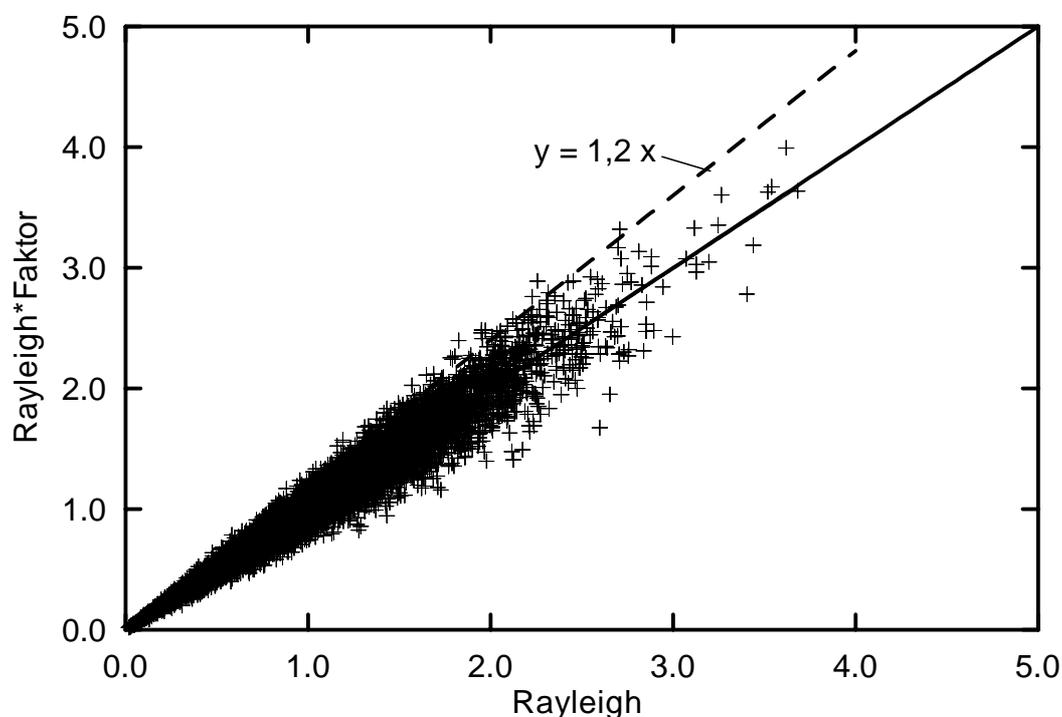


Abb. 43: Vergleich der Datensätze mit und ohne Streuung nach *Vinje*

Der Einfluss der Unsicherheit im Beiwert nach *Hunt* (1959) wirkt sich zwar nicht sehr stark aus, ist aber durchaus nicht zu vernachlässigen.

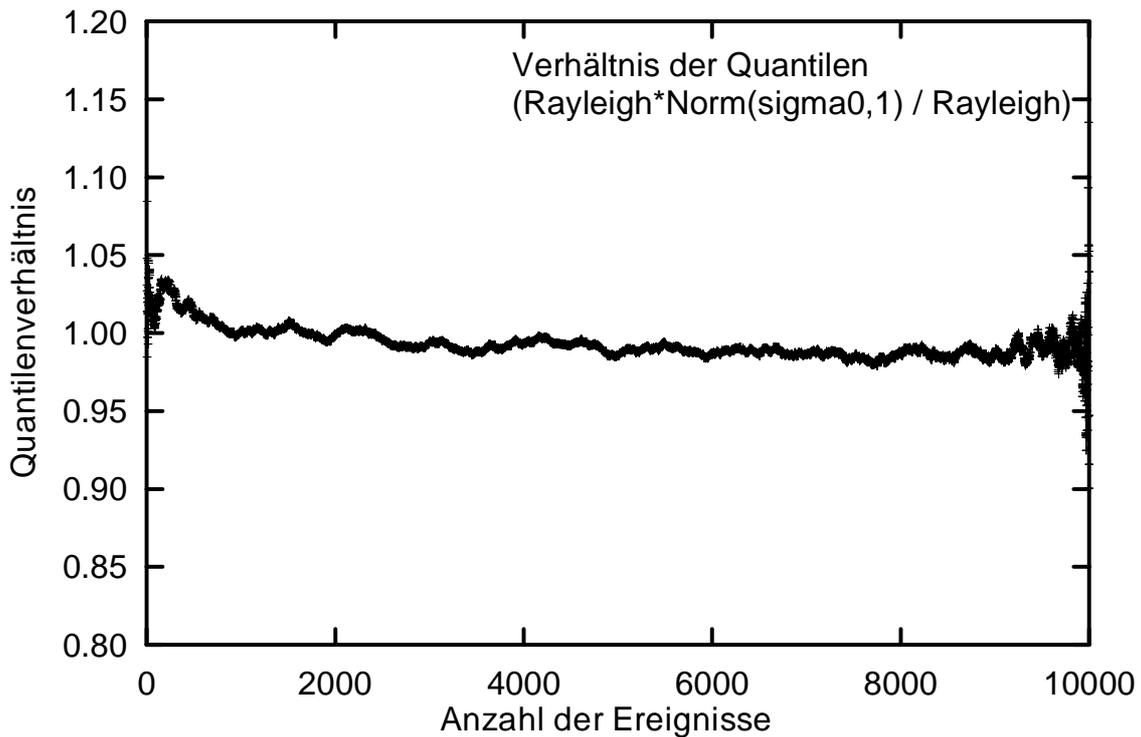


Abb. 44: Verlauf des Verhältnisses der Quantilen der Datensätze mit und ohne Streuung nach *Vinje*

(b) Unsicherheiten aus dem Vorwelleneinfluss

In einer weiteren Simulation wurde der Einfluss der Vorwellen auf den Wellenauflauf nach *Tautenhain (1981)* untersucht. Danach kann der Wellenauflauf A_n in unregelmäßigen Wellen wie folgt unter Berücksichtigung einer Vorwelle A_{n-1} berechnet werden:

$$(49) \quad A_n = \tilde{A}_n \cdot \sqrt[3]{2 \cdot \psi - \left(\frac{A_{n-1}}{\tilde{A}_n}\right)^3}$$

mit: \tilde{A}_n = der sich ohne Einfluss der Vorwelle ergebende Wellenauflauf
 ψ = ein aus Messungen zu verifizierender Beiwert
(in erster theoretischer Näherung $\psi = 1$).

In Abb. 45 sind die mit dem sich theoretisch in erster Näherung zu 1 ergebenden Beiwert ψ berechneten Wellenaufläufe mit Berücksichtigung einer Vorwelle den Aufläufen ohne Berücksichtigung einer Vorwelle gegenübergestellt. Abb. 46 zeigt wiederum den Verlauf des Verhältnisses der Quantilen.

Entsprechend dem Berechnungsschema ergeben sich teilweise negative Aufläufe, die als Vorwellenereignis für die Berechnungen des nächsten Auflaufs wie ein Auflauf der Höhe 0 zu werten sind. Bei Vorwellenhöhe 0 kann ein Wellenauflauf maximal folgenden den Wert annehmen:

$$(50) \quad A_n = \tilde{A}_n \cdot \sqrt[3]{2} = 1,26 \cdot \tilde{A}_n$$

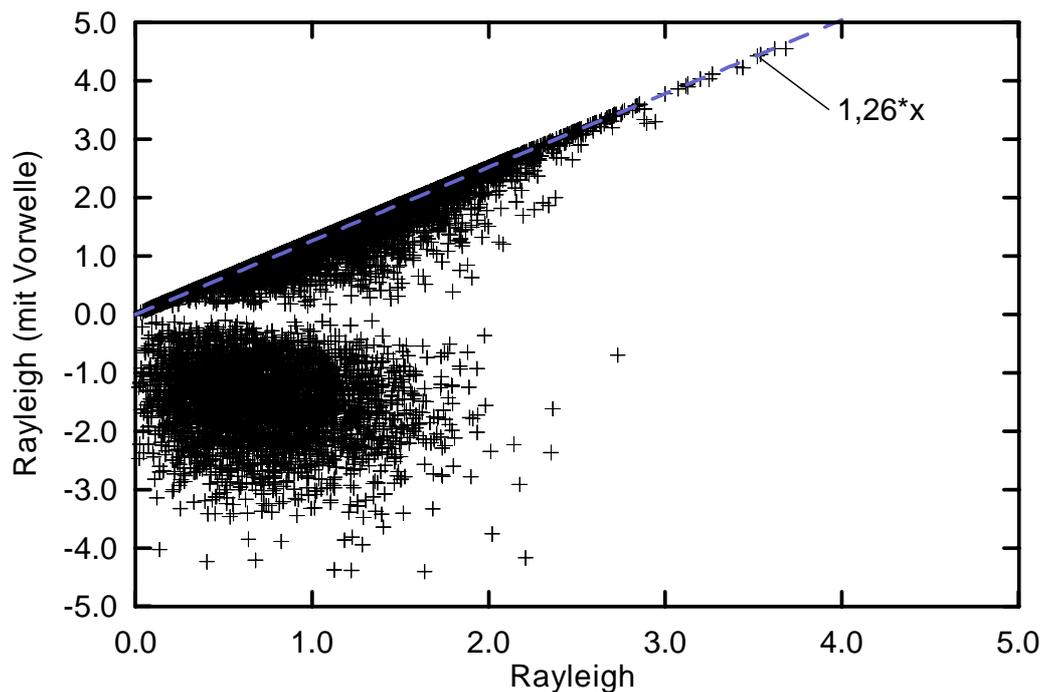


Abb. 45: Vergleich der Datensätze mit und ohne Berücksichtigung der Vorwelle

Abb. 46 zeigt zum einen, dass durch Vorwelleneinfluss (mit einem Beiwert $\psi = 1$) das Verhältnis des 2 %-Ereignisses nun bei rund 1,22 liegt, aber auch, dass nur rund 65 % der Wellenereignisse zu einem Auflaufereignis führen, was sehr genau dem von *Tautenhain (1981)* aus Messungen ermittelten Mittelwert des Verhältnisses der Anzahl der Aufläufe zur Anzahl der Wellenereignisse entspricht.

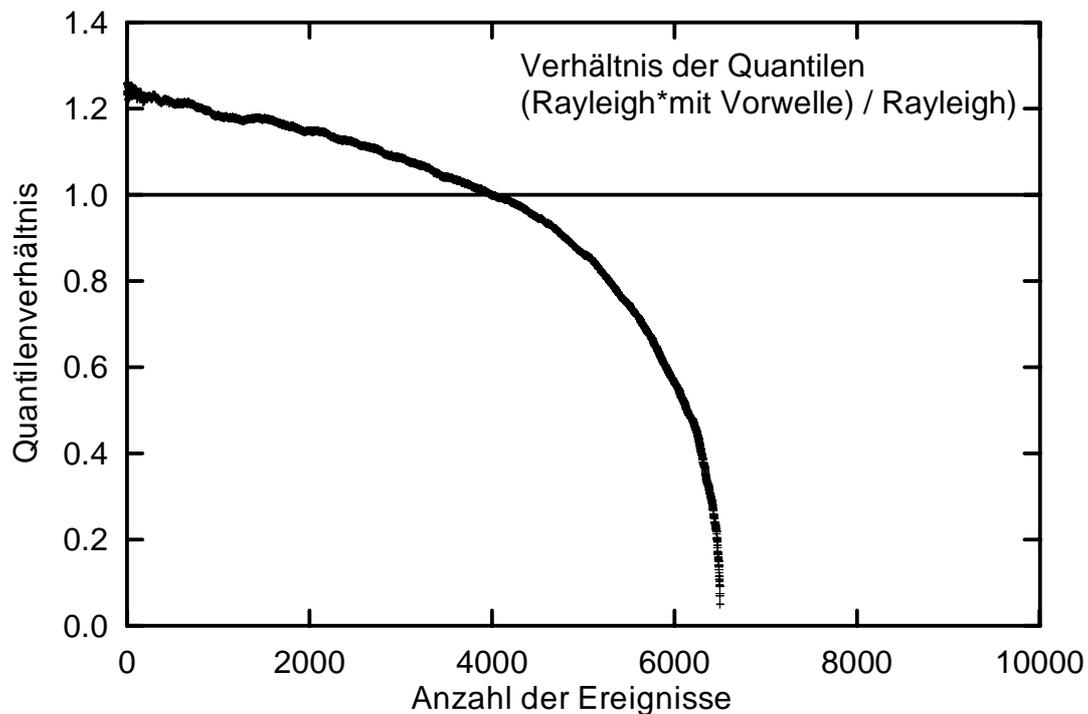


Abb. 46: Verlauf des Verhältnisses der Quantilen der Datensätze mit und ohne Berücksichtigung der Vorwelle ($\psi = 1$)

Berücksichtigt man nun die Auswirkung beider Einflüsse auf das 2 %-Ergebnis ergibt sich die Bemessungsformel zu

$$(51) \quad R_{u2\%} = 1,27 \cdot 1,025 \cdot 1,22 \cdot (\sqrt{H} \cdot T)_{2\%} \cdot \tan \alpha = 1,5981 \cdot (\sqrt{H} \cdot T)_{2\%} \cdot \tan \alpha$$

und entspricht damit sehr genau dem Ergebnis der Auswertung der Messungen am NRC (1,65 ohne Berücksichtigung von Refraktion und Shoaling, 1,61 mit Berücksichtigung von Refraktion und Shoaling).

Die Berechnungen wurden zunächst mit einer RAYLEIGH-Verteilung der $(\sqrt{H} \cdot T)$ -Werte durchgeführt. Sie müssen für die tatsächlich gemessenen Verteilungen überprüft werden.

5.4 Anmerkungen zum Einfluss von Reflexionen bei Messungen zum Wellenauflauf an Seedeichen

Zur Einschätzung der Auswirkung von Reflexionen auf die gemessenen Wellenhöhen an den Referenzpegeln wurden Berechnungen unter Berücksichtigung von Diffraktionseinflüssen durchgeführt. Dabei wurden gleichmäßige Reflexionskoeffizienten ($K_r \approx 0,17$ für Deichneigung 1 : 6, nach Tautenhain, 1981) und gleiche Reflexionsstelle für alle Frequenzkomponenten vorausgesetzt. Die Seegangsspektren sind JONSWAP / TMA-Spektren für 0,5 m Wassertiefe.

Für einen Querschnitt in Deichmitte (10 m vom Bauwerksende) und senkrechten Wellenauflauf sind die Ergebnisse von Berechnungen mit regelmäßigen Wellen der Periode $T = 1,27$ s, langkämmigem unregelmäßigem Seegang und kurzkämmigem unregelmäßigem Seegang ($\sigma = 30^\circ$) in Abb. 47 als relative (signifikante) Wellenhöhen gegenübergestellt.

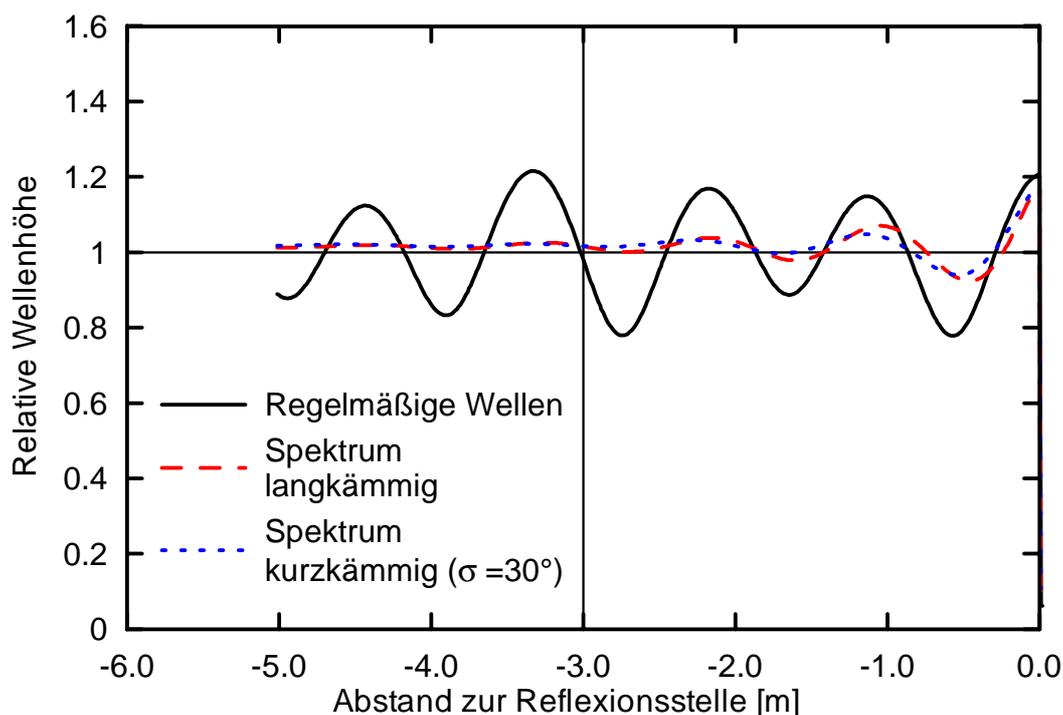


Abb. 47 Relative Wellenhöhen vor einem Bauwerk (Reflexionsgrad 17 %, $T, T_p = 1,27$ s)

Geht man näherungsweise von einem Reflexionspunkt, wiederum für alle Frequenzkomponenten gleich, am Schnittpunkt der Wasserlinie mit dem Deich aus, liegt die Position der Wellenpegel rund 3 m von der Reflexionsstelle entfernt. In diesem Bereich sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Berechnungen mit langkämmigem und kurzkämmigem Seegang vorhanden (zumal die Richtungsbandbreite σ in diesem Bereich bereits deutlich geringer ist), so dass die Berechnungen für die anderen untersuchten Wellenperioden nur mit langkämmigem Seegang durchgeführt wurden (Abb. 48).

Die Veränderung der Wellenhöhe über den Ort ist bei unregelmäßigen Wellen recht gering, zumal die Annahme des gleichen Reflexionspunktes für alle Frequenzen in dieser Hinsicht ungünstiger ist. Die nicht abklingende Höhenvariation in regelmäßigen Wellen gibt einen Hinweis auf die Problematik der Bezugswellenhöhe bei Untersuchungen in regelmäßigen Wellen. Danach ergeben sich durch Reflexion die folgenden relativen Wellenhöhen am Pegelstandort (siehe Tab. 11):

Tab. 11 Veränderung der relativen Wellenhöhe durch Reflexionen (s.a. Abb. 47 und Abb. 48) (Reflexionsstelle Ruhewasserspiegel)

Wellenperiode T_p [s]	Wellenlänge in 0,5 m Wassertiefe L [m]	Veränderung der relativen Wellenhöhe H_{m0} durch Reflexion
1,27	2,23	1,016
1,46	2,73	1,016
1,79	3,55	1,010
2,53	5,31	1,044

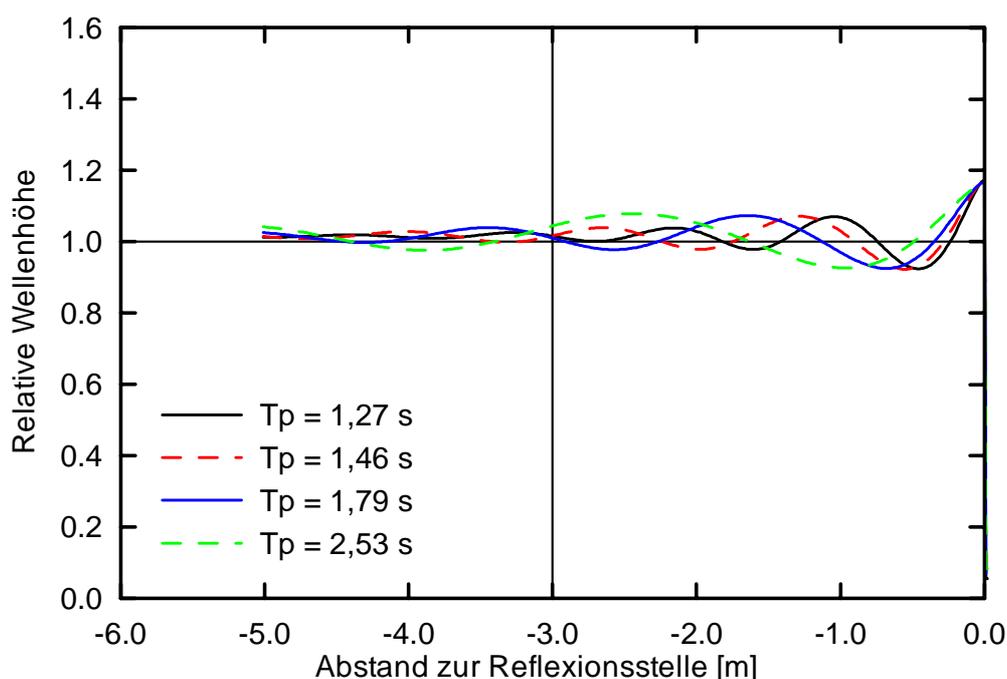


Abb. 48 Relative Wellenhöhen vor einem Bauwerk (Reflexionsgrad 17%, langkämmige JONSWAP / TMA-Spektren)

Da sich der Wellenauflauf bei sonst gleichen Bedingungen mit $\sqrt{H_s}$ ändert sind die Auswirkungen gering und können vernachlässigt werden. Grundsätzlich geht die reflexionsbeeinflusste signifikante Wellenhöhe $H_{s,r}$ mit zunehmender Entfernung von der Reflexionsstelle gegen einen Wert.

$$(52) \quad H_{s,r} = H_s \cdot \sqrt{1 + K_r^2} .$$

Dieser Wert liegt für einen Reflexionsgrad von $K_r = 0,17$ bei $1,014 H_s$.

Zur prinzipiellen Prüfung der theoretischen Rechnungen wurden Messungen im WBM durchgeführt. Die Messungen am 1 : 6 geneigten Deich mit regelmäßigen Wellen bestätigten den geringen Reflexionsgrad.

Die am Knickprofil (untere Neigung 1 : 6, obere Neigung 1 : 3) bei einem Wasserstand von 50 cm durchgeführten Messungen ergaben einen höheren Reflexionsgrad um $K_r = 0,30$ ($T_p = 1,27$ s) bis $0,40$ ($T_p = 1,79$ s).

In den folgenden Abb. 49 und Abb. 50 sind die in unterschiedlichen Abständen von der Wasserlinie gemessenen signifikanten Wellenhöhen aus den Messungen am Knickprofil aufgetragen (Deichfuß bei 3 m) aus denen deutlich wird, dass auch bei höheren Reflexionsgraden keine ausgeprägten Variationen der Wellenhöhen mit dem Abstand vom Deich auftreten.

Die Messungen enthalten jedoch grundsätzlich die Reflexionsenergie, die sich theoretisch in einer Erhöhung der gemessenen signifikanten Wellenhöhe gegenüber der tatsächlich einlaufenden Wellenhöhe (rund 4,4 % bei $K_r = 0,30$). Wegen der geringen Auswirkung auf den Wellenauflauf und weil kein Einfluss auf die Richtungsverteilung vorliegt, wurden keine Korrekturen der gemessenen Werte vorgenommen.

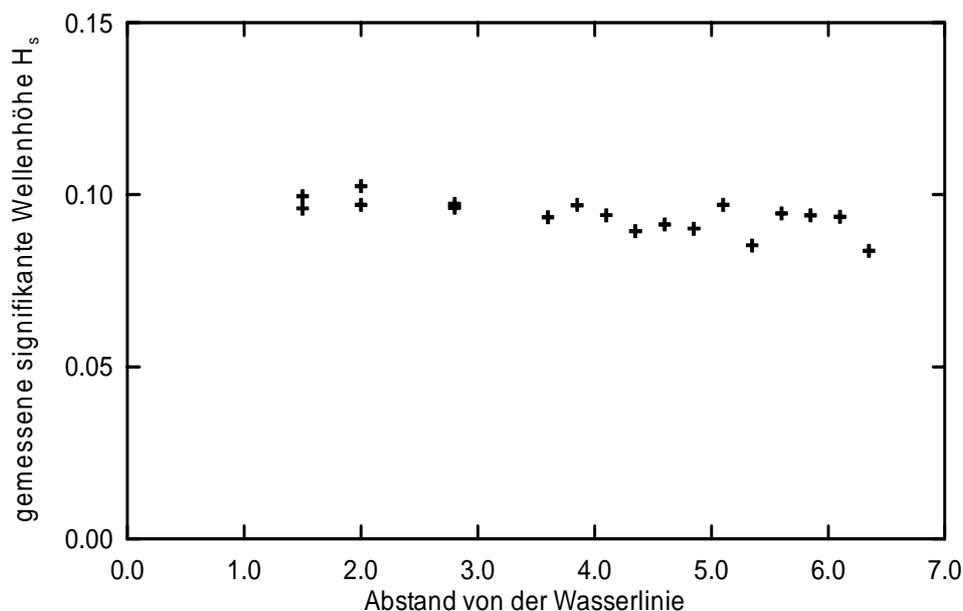


Abb. 49 Gemessene signifikante Wellenhöhen vor dem Deich mit Knickprofil ($T_p = 1,27$ s)

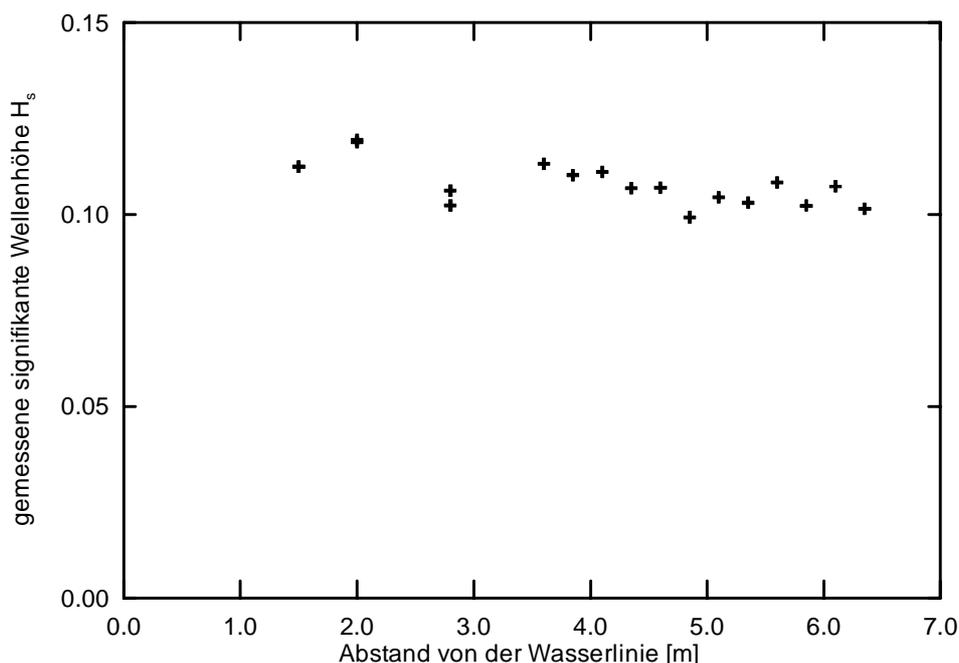


Abb. 50 Gemessene signifikante Wellenhöhen vor dem Deich mit Knickprofil ($T_p = 1,79$ s)

6 Zusammenfassung, Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

Im Forschungsprojekt ist es gelungen, Grundlagen für die Bemessung von Seedeichen unter schrägem Wellenangriff zu verbessern. Die Ergebnisse können im einzelnen wie folgt kurz zusammengefasst werden:

In den Modellversuchen der ersten Projektphase wurden Modellversuche sowohl mit langkämmigem als auch mit kurzkämmigem Seegang durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Unterschiede beim schrägen Wellenauflauf zwischen Versuchen mit kurzkämmigem Seegang und Versuchen mit langkämmigem Seegang im Bereich der natürlichen Streuungen der Messergebnisse lagen. Ein signifikanter Einfluss auf den Wellenauf- und Wellenüberlauf konnte daher ausgeschlossen werden.

Die Richtungsfunktion für schrägen Wellenauflauf wurde zunächst aufgrund der Versuchsergebnisse der ersten Projektphase am 1:6 geneigten Deich ermittelt. Insbesondere durch Messung des Wellenaufbaus an mehreren Positionen entlang des Deichs konnten die Streuungen der Messergebnisse, die in früheren Untersuchungen zum schrägen Wellenauflauf sehr groß waren, sehr gering gehalten werden. Größere Wellenaufbauhöhen für kleine Wellenangriffsrichtungen $\theta < 30^\circ$, wie sie zuvor in einigen Untersuchungen beobachtet wurden, konnten ausgeschlossen werden. Es wurde eine Richtungsfunktion für den schrägen Wellenauflauf ermittelt, die im Gegensatz zu vorherigen Untersuchungen nur mit geringen Streuungen behaftet ist.

In der zweiten Versuchsphase im Wellenbecken in Hannover wurde die zuvor ermittelte Funktion für weitere Versuchsparameterkombinationen am 1:6 geneigten Deich überprüft. Anschließend wurden Versuche mit einer weiteren Deichneigung (1:3) durchgeführt, für die ebenfalls eine Richtungsfunktion ermittelt wurde.

Untersuchungen an Bermenprofilen und einem konkaven Knickprofil haben die zuvor ermittelten Funktionen bestätigt. Dabei wurde zunächst der Einfluss der Bermen im Deichquerschnitt bei senkrechtem Wellenangriff untersucht und anschließend für schräge Wellenangriffsrichtungen erweitert. Die bisherige Vorgehensweise bei der Berücksichtigung von Bermen und schrägem Wellenangriff, bei der die Einflussfaktoren zunächst getrennt voneinander ermittelt werden und anschließend als Korrekturkoeffizienten multipliziert werden, konnte durch die Modellversuche bestätigt werden.

Der Einfluss von in der Natur gemessenen Wellenspektren auf den schrägen Wellenauflauf wurde ebenfalls untersucht. Erstmals wurden Modellversuche mit in der Natur gemessenen Wellenspektren an Bermenprofilen mit schrägem Wellenangriff durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Richtungsfunktion unabhängig von der Art und Form des einlaufenden Wellenspektrums ist.

Der Einfluss von Refraktion und Shoaling auf den schrägen Wellenauflauf wurde anhand von theoretischen Betrachtungen untersucht. Dabei wurde deutlich, dass Einflüsse aus Refraktion umso stärker zu erwarten sind, je flacher die Neigung ist. Die Bemessungsformeln für den Wellenauflauf wurden auch in Hinblick auf den Vorwelleneinfluss diskutiert

Es ist vorgesehen die im Rahmen der Modellversuche ermittelten umfangreichen Daten zur weiteren grundsätzlichen Verbesserung der Bemessungsverfahren im Küsteningenieurwesen hinsichtlich

- probabilistischer Bewertungen
- Klärung der Unsicherheiten aus den verschiedenen möglichen Eingangsparametern
- Bewertung von Streuungen der statistischen Ergebnisparameter

zu nutzen.

7 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern und Institutionen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde mit verschiedenen Stellen im In- und Ausland zusammengearbeitet, diese Stellen sind im folgenden aufgelistet:

- i) NRC / CHC (National Research Council - Canadian Hydraulic Centre) in Ottawa, Kanada (Durchführung von Modellversuchen im dortigen Wellenbecken)
- ii) Niedersächsisches Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste – auf Norderney (Austausch von Daten der 3D Modellversuche im Rahmen des KFKI geförderten Projektes „Optimierung von Deichprofilen“)
- iii) Einbeziehung der niederländischen Erfahrungen (Numerische Berechnungen zu Deichen mit Bermen *Van Gent*) von Delft Hydraulics
- iv) Besichtigung der Modellversuche in Hannover von mit J.W. van der Meer mit Austausch von Erfahrungen zum Einfluss von Bermen auf den Wellenauflauf

8 Schrifttum

- ALLSOP, N.W.H.; FRANCO, L. and HAWKES, P.J. (1985)** Wave Run-up on Steep Slopes - A literature review; HR Wallingford; Report No. SR 1
- BATTJES, J. A. (1971)** Run-up Distribution of Waves Breaking on Slopes. Proc. ASCE, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, Vol. 97, No. WW1, 1971
- DE WAAL, J. P., VAN DER MEER, J.W (1992)** Wave Run-up and Overtopping on Coastal Structures. Proc. ICCE, 1992
- DAEMRICH, K.-F. (1991)** Modellversuche zum Wellenüberlauf an Polderwänden; Mitteilungen des Franzius-Instituts; Heft 72, pp. 323-336
- DRAGOSZ-WAWRZYNIAK, L. (1965)** Calculation of height of wave rushing up the slopes and the range of slope revetments; Archivium Hydrotechniki No. 4; pp. 323-336
- EAK (1993)** Empfehlungen für Küstenschutzwerke; EAK 1993; Westholsteinische Verlagsanstalt Boysen & Co. Heide.; (Sonderausgabe Zeitschrift "Die Küste"; Heft 55)
- ERCHINGER, H.F. (1977)** Naturmessungen des Wellenaufbaus mit neuentwickelten Geräten; Die Küste; Heft 31; pp. 59-71
- FRANCO, C.; FRANCO, L.; RESTANO, C. and VAN DER MEER, J.W. (1995)** The effect of Wave obliquity and short crestedness on the Overtopping Rate and Volume Distribution on Caisson Breakwaters; Final Project Proceedings; MAST II-MCS.
- GODA, Y. (1985)** Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokio Press, 1985
- HEBSGAARD, M.; SLOTH, P. and JUHL, J. (1998)** Wave Overtopping of Rubble Mound Breakwaters; Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering; Copenhagen
- HIRAISHI, T.; MOCHIZUKI, N.; SATO, K; MARUYAMA, H.; KANAZAWA, T. and MASUMOTO, T. (1996)** Effect of wave directionality on overtopping at seawalls; Report of Port and Harbour Research Institute; Vol. 35.; No. 1
- HOSOI and SHUTO (1964)** Run-up height on a single slope dike due to waves coming obliquely; Coastal Engineering in Japan; Vol. 7; pp. 95-99

- HUNT, I. A. (1959)** Design of Seawalls and Breakwaters. Proc. ASCE, Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol. 85, No. WW3, 1959
- ISHIHARA, T.; INAGAKI, Y. and MITSUI, H. (1960)** Wave Overtopping on Seawalls; Coastal Engineering in Japan; Vol. III; pp. 53-62
- JUHL, J. and SLOTH, P. (1994)** Wave Overtopping of Breakwaters under Oblique Waves; Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering; Kobe; pp. 1182-1196
- MASE, H. (1989)** Random Wave Runup height on gentle slope; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 115, No. 5, 1989
- MILES, M.D. (1989)** A Note on Directional Random Wave Synthesis by the Single-Summation Method; Proceedings of the 23rd IAHR Congress, Ottawa, Vol. C, pp. 243-250
- SAKAKIYAMA, T. and KAJIMA, R. (1996)** Wave Overtopping and Stability of Armour Units under multidirectional Waves; Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering; Orlando; pp. 1862-1875
- SAND, S.E. and MYNETT, A.E. (1987)** Directional Wave Generation and Analysis, Proceedings of the IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins; Lausanne
- SHIDOROWA, A.G. (1960)** The heights reached by waves on banks; Summary in Applied Mechanics; Rev. 13.; No. 1551
- SCHIJF, J.B. (1972)** Wave Run-up and Overtopping, Technical Advisory Committee on Protection against inundation, The Hague
- SCHÜTTRUMPF, H. (2001)** Wellenüberlaufströmung an Seedeichen – Experimentelle und Theoretische Untersuchungen. Dissertation
- TAUTENHAIN, E. (1981)** Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus – Ein Beitrag zur Bemessung. Mitteilungen des Franzius-Instituts f. Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Heft 53, 1981
- TAUTENHAIN, E.; KOHLHASE, S. and PARTENSCKY, H.W. (1982)** Wave run-up at Sea Dikes under oblique Wave Approach Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering; Cape Town, pp. 804-810

- VAN DER MEER, J.W. and DE WAAL (1990)** Invloed van scheve inval en richtingspreiding op golfoploop en overlag; Delft Hydraulics; Report No. 638
- VAN DER MEER, J.W. and DE WAAL (1993)** Waterbeweging op taluds; Invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve langen kortkammige golfaanval; Delft Hydraulics; Report No. 1256
- VAN DER MEER, J.W. and JANSSEN, P.F.M (1995)** Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes; ASCE book on "Wave Forces on inclined and vertical wall structures"; Editor: Z. Demirbilek
- VINJÉ, J.J. (1972)** Investigation for Coastal Protection with Concrete Mats. North Sea Coastal Engineering Group, 1972 (es gibt von den Angaben Vinjés unseres Wissens nur mündliche Überlieferungen)
- WAGNER, H. and BÜRGER, W. (1973)** Kennwerte zur Seedeichbemessung; Wasserwirtschaft und Wassertechnik (WWT); 23. Jahrgang; Heft 6; pp. 204-207
- WASSING, F. (1957)** Model Investigations of Wave Run-up carried out in the Netherlands during the last twenty years; Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Engineering; Gainesville, Florida.

9 Zusammenstellung der Veröffentlichungen, Berichte und Vorträge zum Forschungsprojekt

Nachfolgend sind die Veröffentlichungen zu diesem Forschungsprojekt, sowie die Berichte der beiden Institute, öffentliche Vorträge und an den Instituten zum Forschungsthema erstellte Diplomarbeiten aufgelistet.

Veröffentlichungen

- Möller, J.; Ohle, N.; Schüttrumpf, H.; Daemrich, K.-F.; Oumeraci, H.; Zimmermann, C.* (2001) Einfluß der Wellenangriffsrichtung auf Wellenauflauf und Wellenüberlauf. Proceedings 3. FZK-Kolloquium. 29.3.2001. Hannover
- Möller, J.; Ohle, N.; Schüttrumpf, H.; Daemrich, K.-F.; Oumeraci, H.; Zimmermann, C.* (2001) Einfluß der Wellenangriffsrichtung auf Wellenauflauf und Wellenüberlauf. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau. Heft 149
- Ohle, N.; Möller, J.; Schüttrumpf, H.; Daemrich, K.-F.; Oumeraci, H.; Zimmermann, C.* (2002) The Influence of Refraction and Shoaling on Wave Runup under Oblique Waves. International Conference on Coastal Engineering 2002
- Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H.* (2002) Wellenauflauf und Wellenüberlauf – Neue Berechnungsansätze -. Tagungsband HTG-Sprechtage: Vorstellung der Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzbauwerken (EAK 2002). 28.02.2002

Schüttrumpf, H. (2002); *Oumeraci, H.* (2002) Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzbauwerken, Abschnitte 4.1 und 4.2 (Ansätze für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken - Geböschte Bauwerke) in EAK 2002, Die Küste. Heft 65

Öffentliche Vorträge (ohne Paper)

Möller, J.; Ohle, N.; Oumeraci, H.; Zimmermann, C. (2001) Schräger Wellenauflauf an Seedeichen. Vortrag beim 6. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 17. Oktober 2001 in Bremerhaven

Schüttrumpf, H. (2002) Sturmfluten und Seedeiche. Seminarvortrag im Rahmen der Veranstaltung „Sea the Future“ am Institut für Land- und Seeverkehr. TU Berlin. 31.05.2002

Berichte (unveröffentlicht)

Teilbericht 1: *Oumeraci, H.; Zimmermann, C.; Schüttrumpf, H.; Daemrich, K.-F.; Möller, J.; Ohle, N.* (2001) Influence of oblique wave attack on wave run-up and wave overtopping – 3D model tests at NRC/Canada with long- and shortcrested waves -

Teilbericht 2: *Zimmermann, C.; Oumeraci, H.; Ohle, N.; Möller, J.; Daemrich, K.-F.* (2002) Untersuchungen zum Einfluss von Wellenparametern, Wasserständen und Deichneigungen auf den schrägen Wellenauflauf

Teilbericht 3: *Oumeraci, H.; Zimmermann, C.; Möller, J.; Daemrich, K.-F.; Kübler, S.; Ohle, N.* (2002) Einfluss von Bermen und Knicken im Deichquerschnitt auf den schrägen Wellenauflauf – Ergebnisse der Modellversuche -

Teilbericht 4: *Zimmermann, C.; Oumeraci, H.; Daemrich, K.-F.; Möller, J.; Ohle, N.* (2002) Theoretische Untersuchungen und Überlegungen zum schrägen Wellenauflauf

Diplomarbeiten

Bernhardt, H. (2002) Einfluss von Bermen auf den Wellenauflauf unter Berücksichtigung schräger Wellenangriffsrichtungen. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig

Eilts, M. (2002) Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Wellenangriffsrichtung auf den Wellenauflauf an Seedeichen. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig

Mirau, A. (2002) Wellenauflauf an Deichen mit Berme. Diplomarbeit am Franzius-Institut der Universität Hannover

Smid, R. (2001) Experimentelle Untersuchungen zum schrägen Wellenauflauf an Seedeichen. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig