

Funktionale Bemessung künstlicher Riffe für aktiven und sanften Küstenschutz

von
Matthias Bleck

Kurzfassung

Aufgrund der vielfältigen Nutzung des Küstenraums aber auch wegen des zunehmenden Sturmflutpotenzials verändern sich die Ansprüche an den Küstenschutz. Insbesondere in sonst naturbelassenen Küstenabschnitten tendiert man dazu, auf massive Bauwerke zu verzichten. Oft genannte Stichworte sind die Begriffe „Nachhaltiger Küstenschutz“ und „Sanfte Methoden“. Eine Methode sanften Küstenschutzes ist dabei das Konzept der künstlichen Riffe.

Im vorliegenden Beitrag werden die Einsatzmöglichkeiten künstlicher Riffe aufgezeigt, sowie ein Konzept für die vollständige Erfassung der Wellenveränderung an künstlichen Riffen vorgestellt. Erstmals wird dabei auch die nachweislich stattfindende Veränderung der Wellenperiode am Riff berücksichtigt. Für die Abschätzung der Energieumwandlung wird zudem ein analytisches Modell vorgestellt, das neben den theoretischen Grundlagen die Ergebnisse physikalischer Modellversuche mit einbindet und so die am Riff ablaufenden Prozesse entsprechend ihrer Wirkung berücksichtigt. An einem Praxisbeispiel werden die Anwendungsmöglichkeiten künstlicher Riffe und des aufgezeigten Konzepts einschließlich des analytischen Modells zusammengefasst.

1 Bedeutung aktiver Küstenschutzmaßnahmen

Im Küstenraum treffen eine Vielzahl unterschiedlicher Interessen und Nutzungen aufeinander, die zu Konflikten führen können. Der wachsende Siedlungsdruck und die immer intensivere Nutzung der Küstenregionen in der Freizeitgestaltung sind mit dafür verantwortlich, dass immer intensivere und massivere Küstenschutzmaßnahmen gebaut werden. Die Aufgabe einer Siedlung und deren Neuerrichtung in mehreren Kilometern Entfernung entsprechend der von der Natur umgeformten Landschaft, wie sie auf den ostfriesischen Inseln häufig stattgefunden hat, ist heutzutage politisch nur schwer durchsetzbar. Sie wäre der Umsetzung ganzer Dörfer für den Braunkohletagebau vergleichbar, die immer wieder zu Protesten führt. Küstenschutzmaßnahmen werden dadurch zum Teil immer aufwendiger, da sie sich nicht nur den Naturgewalten sondern auch langfristigen morphodynamischen Prozessen entgegen stemmen. Nichtsdestotrotz werden Küstenschutzmaßnahmen wie Deckwerke, Ufermauern etc. immer mehr als störende Verfälschung der Küste empfunden. Auch die an sandigen Küsten häufig eingesetzten Bühnen stellen einen Eingriff in das optische Erscheinungsbild der Landschaft dar, was nicht immer im Einklang mit den Bedürfnissen der Tourismusindustrie und des Naturschutzes steht. Letztendlich hilft hier nur ein integriertes Küstenzonenmanagement, das die einzelnen, teilweise konkurrierenden Interessen berücksichtigt und dabei die Nachhaltigkeit der Entwicklung im Auge behält.

In der strategischen Ausrichtung eines Küstenschutzkonzeptes sind deshalb im Hinblick auf die technische Komponente des Küstenschutzes außer den bereits erwähnten „harten“ Küstenschutzmaßnahmen, die neben einer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes zumeist eine starke Auswirkung auf die Morphodynamik (Luvandlung, Lee-Erosion) sowie auf das Küstenvorfeld haben, „sanfte“ Methoden wie z.B. Sandvorspülungen, künstliche Riffe oder

Dünenbarrieren in ein ganzheitliches Konzept mit einzubinden. Aufgrund des erwähnten Siedlungsdrucks und der zu schützenden Werte stellen "harte" Maßnahmen manchmal die einzige Möglichkeit zum Schutz der betroffenen Objekte dar. Die Dimensionierung dieser Bauwerke kann dabei durch die sinnvolle Kombination mit sanften Maßnahmen eventuell reduziert werden.

Eine an sandigen Küsten bereits häufig eingesetzte "sanfte" Küstenschutzmaßnahme stellen Sandvorspülungen dar. Dabei werden die negativen Auswirkungen einer Sturmflut (Materialabtrag) innerhalb des betrachteten Küstenabschnitts im voraus kompensiert. Allerdings handelt es sich nur um eine eher kurzfristige Maßnahme, die in regelmäßigen Abständen wiederholt werden muss, da der angespülte Sand nach und nach von den Kräften der Natur wieder abgetragen wird. Das Zusammenfassen der einzelnen Sandkörner, die für sich allein diesen Kräften nicht widerstehen können, zu größeren Einheiten führt zu dem Konzept der geotextilen Sandcontainer, bei dem lokal vorhandenes Material in geotextile Container verpackt wird. Ohne einen hohen Transportaufwand lassen sich so dauerhafte Bauwerke schaffen, die bei Bedarf auch wieder einfach rückbaubar sind, da lediglich das zuvor verfüllte Material wieder "ausgepackt" werden muss. Neben dem Einsatz als Dünenbarriere z.B. an der mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste wurden geotextile Sandcontainer bereits als Kolkschutz am Eidersperrwerk oder als Baumaterial für eine Riffergänzung auf Sylt eingesetzt (KOHLMASE; 1999).

Während auf Sylt ein natürliche vorhandenes Sandriff durch eine künstliche Maßnahme verstärkt wurde, gibt es auch viele Beispiele, wo künstliche Riffe als zusätzliche Maßnahme errichtet wurden (BLECK; 1997). Während direkt an der Küste vorgenommenen Schutzmaßnahmen lediglich die schädlichen Auswirkungen der einlaufenden Seegangsenergie minimieren, und demzufolge als passive Maßnahmen zu bezeichnen sind, wird mit einem künstlichen Riff der Seegang im Küstenvorfeld aktiv beeinflusst, was aus technischer und ökologischer Hinsicht oftmals eine bessere Alternative zu einer massiven Verstärkung der passiven Maßnahmen an der Küste darstellt.

Eine sehr spektakuläre Anwendung künstlicher Riffe stellen dabei die „surfing reefs“ in Australien dar, wie zum Beispiel vor Narrow Neck an der Gold Coast (JACKSON et al.; 2002), wo als Baumaterial geotextile Sandcontainer einer Größe von ca. 20 × 4,80 m eingesetzt wurden (Abb.1). Durch das Riffbauwerk sollen die Wellen dabei so beeinflusst werden, dass Wellenreiter optimale Bedingungen zur Ausübung ihres Sports haben. Daneben wird durch das künstliche Riff die auf die Küste treffende Wellenenergie so reduziert, dass die Küstenschutzmaßnahmen an der Küste selbst nicht mehr so massiv ausfallen müssen, was im Sinne eines sanften Küstenschutzes ist.



Abb. 1: Riffelemente aus Geotextilen Sandcontainern (QUIRK et al.; 2001)

Die geotextilen Sandcontainer wurden dabei u.a. als Baumaterial gewählt, um die Verletzungsgefahr für die Sportler zu minimieren. Zusätzlich erkennt man, dass das künstliche Riff an der



Abb. 2: Reefball in der Ostsee als Ziel für Taucher
(Quelle: www.reefball.com)

Gold Coast auch von den Meeresbewohnern angenommen wird und schon nach mehreren Monaten besiedelt ist. Diese Anwendungsmöglichkeit künstlicher Riffe, die Schaffung zusätzlichen Lebensraums, wird teilweise auch mit speziellen Riffelementen angestrebt. So wurden in letzter Zeit z.B. in der Ostsee mehrfach sogenannte Reefballs installiert, um die Meeresfauna in diesen Bereichen zu verstärken. Was hier u.a. eine Attraktion für Taucher darstellt, wird jedoch auch gezielt in der Fischwirtschaft (siehe z.B. JOCHEM; 1997) bzw. im Umweltschutz z.B. zur Regeneration natürlicher Korallenriffe im Roten Meer eingesetzt (SCHUMACHER; 1996).

Man sieht, dass künstliche Riffe als Mehrzweckbauwerke mit unterschiedlichen Ausrichtungen entworfen werden können. Sie stellen dabei eine Komponente des technischen Küstenschutzes im Rahmen eines übergreifenden Küstenschutzkonzeptes dar, wobei in Zukunft in diesem Zusammenhang auch der globale Meeresspiegelanstieg und die Zunahme der Sturmfluthäufigkeit bedingt durch die globalen Klimaveränderungen zu berücksichtigen sind, die eine Verstärkung der Küstenschutzmaßnahmen erfordern, was aktiv oder passiv geschehen kann.

Es ist festzuhalten, dass Küstenschutz zukünftig nur im Rahmen eines Küstenzonenmanagements gesehen werden kann, bei dem die einzelnen Möglichkeiten des Küstenschutzes sinnvoll kombiniert werden. Aktive und „sanfte“ Küstenschutzmaßnahmen werden dabei eine immer größere Rolle spielen werden, da sie den Belangen des Tourismus sowie des Natur- und Landschaftsschutzes oftmals besser gerecht werden als die konventionellen harten Maßnahmen. Dieser Beitrag soll deshalb neue Erkenntnisse aus mehreren Forschungsprojekten zu künstlichen Riffen und ihrer wellendämpfenden Wirkung einem breiteren Fachpublikum näher bringen, wobei er sich auch an interessierte Laien richtet.

2 Hydraulische Wirkung künstlicher Riffe

Künstliche Riffe gehören wie beschrieben zu den aktiven Küstenschutzmaßnahmen, die das Wellenklima bereits im Küstenvorfeld beeinflussen. Ihr Vorbild sind die in der Natur vorkommenden Sand-, Felsen- bzw. Korallenriffe. Die an natürlichen Riffen beobachtete Artenvielfalt führte zu den ersten Anwendungen künstlicher Riffbauten im 18. Jahrhundert, die aus der traditionellen japanischen Fischerei überliefert sind (JOCHEM; 1997). Neben dieser hohen Artenvielfalt kann an natürlichen Riffen immer auch die Wirkung des Riffs auf den Seegang beobachtet werden. Auf vielen Atollen in der Südsee stellt das dort vorhandene Riff den einzigen Küstenschutz dar. Neben einer Abnahme der Wellenhöhe ist dabei auch das Entstehen höher harmonischer Wellen am Riff zu beobachten, was sich in zusätzlichen Wellenbergen hinter dem Riff ausdrückt (Abb.3). Diese Wellenperiodenänderung wird in den gängigen Bemessungskonzepten für künstliche Riffe nicht berücksichtigt, obwohl dies zur vollständigen Erfassung des Wellenverhaltens an Riffen unbedingt erforderlich ist, da die Belastung der

Bereiche hinter dem Riff sowohl von der Höhe der Wellen als auch von ihrer Periode und damit ihrer Geschwindigkeit abhängt.

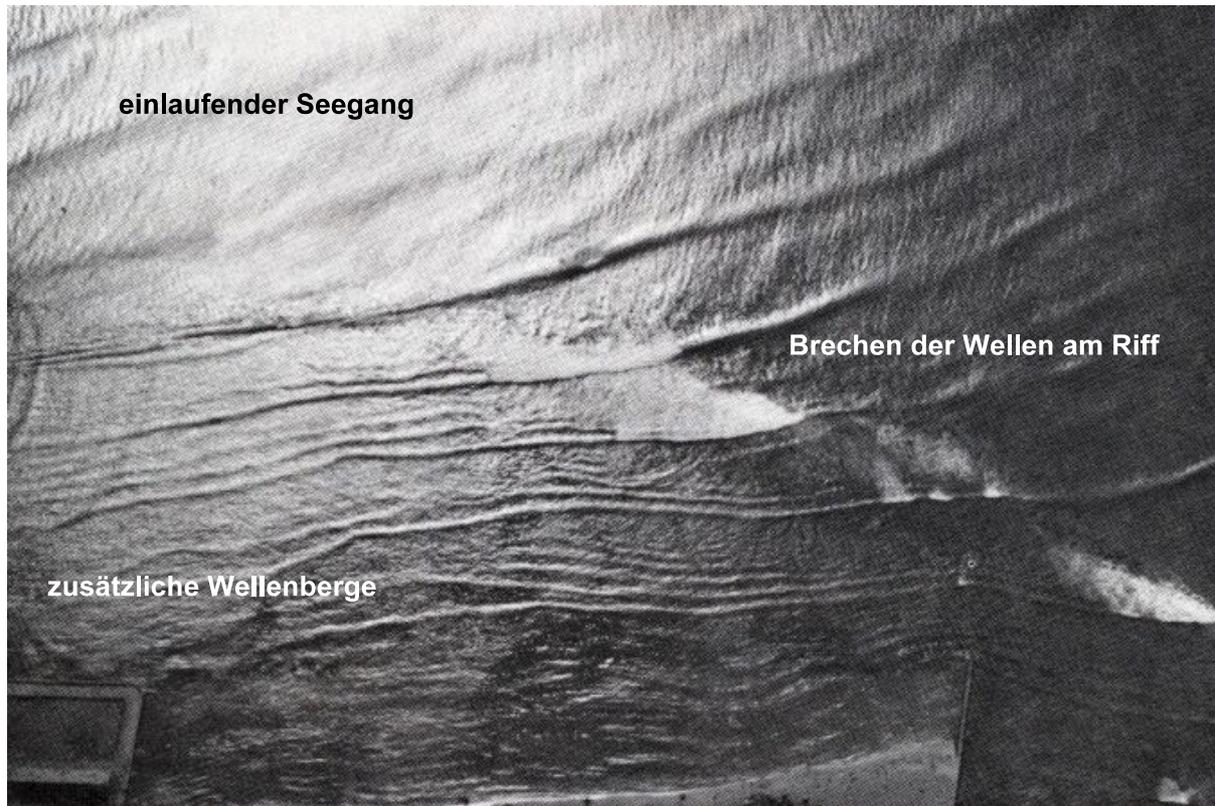


Abb. 3: Wellentransformation an Riffen (Waikiki, Hawaii) (GERRITSEN; 1981)

Als Küstenschutzmaßnahme beeinflussen künstliche Riffe den einlaufenden Seegang und somit indirekt die Morphologie der Küste. Man erhofft sich von den als Unterwasserschwelmen eingesetzten künstlichen Riffen u.a. ein Festhalten der Sedimente im ufernahen Bereich. In Kombination mit Buhnen kann die Bildung physiographischer Einheiten angestrebt werden. In sandigen Küstenabschnitten mit anhaltend negativer Sedimentbilanz, an denen in regelmäßigen Abständen Sandvorspülungen durchgeführt werden, läßt sich durch die sinnvolle Kombination dieser Sandvorspülungen mit Riffen und Buhnen deren Wirksamkeit erhöhen, da das angespülte Material länger festgehalten werden kann, und sich somit der zeitliche Abstand zweier Vorspülungen erhöht. In Deutschland werden künstliche Riffe vereinzelt an der Ostsee eingesetzt. Aber auch an der Nordsee wurde zum Beispiel das natürliche Sandriff vor Sylt künstlich verstärkt. Auch wirken die häufig noch vorhandenen Sommerdeiche, die dem Schutz der den Hauptdeichen vorgelagerten Salzwiesen vor kleineren Sturmfluten im Sommer dienen, als künstliches Riff, wenn sie bei den winterlichen Sturmfluten unterhalb des Sturmflutwasserstandes liegen. Durch das Verständnis der Funktion künstlicher Riffe können die Auswirkungen dieser Sommerdeiche bei der Bemessung der Hauptdeiche stärker berücksichtigt werden. Zudem wird die Bemessung und der Bau eines zusätzlichen Sommerdeiches (künstliches Riff) als Alternative zu Deichverstärkungen am Hauptdeich auf gesicherte Grundlagen gestellt.

3 Funktionale Bemessung künstlicher Riffe

3.1 Konzeptionelle Überlegungen

In Bezug auf die Seegangsbeeinflussung ist an Riffen (künstlichen wie natürlichen) eine generelle Abnahme der Wellenhöhe sowie eine Verformung der Wellen bis hin zur Entstehung

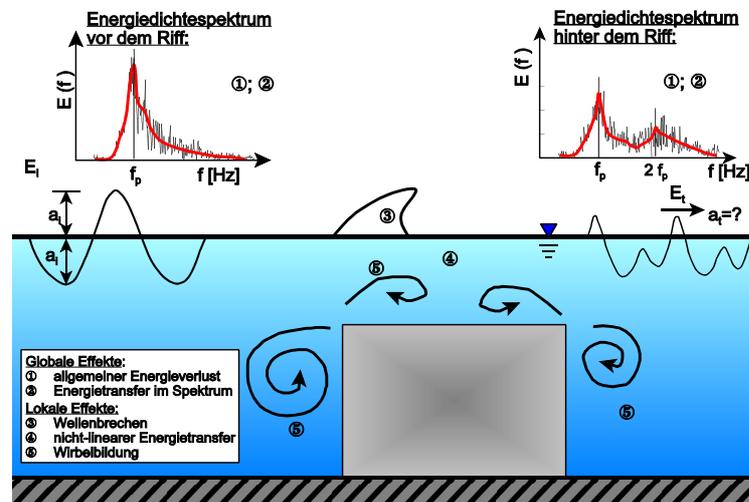


Abb. 4: Effekte an künstlichen Riffen

zusätzlicher Wellenberge zu beobachten (vgl. Abb.3), wodurch sich die Periode der transmittierten Wellen ändert. Im Wellenspektrum drücken sich diese beiden *globalen Effekte* in einer Abnahme der Fläche des Spektrums (Wellenhöhenreduzierung) und in dessen Verformung (Periodenänderung) aus (Abb.4).

Die gängigen Verfahren für die funktionale Bemessung künstlicher Riffe konzentrieren sich im wesentlichen auf die Wellenänderung am Riff (BLECK;

1997), die zumeist über Energiekoeffizienten erfasst wird. Zu diesen Energiekoeffizienten zählen der Transmissions-, der Reflexions- und der Dissipationskoeffizient, die das jeweilige Verhältnis der transmittierten, reflektierten bzw. dissipierten Wellenenergie (E_t , E_r bzw. E_d) zur einlaufenden Wellenenergie E_i beschreiben:

$$\text{Transmissionskoeffizient:} \quad C_t = H_t/H_i = \sqrt{E_t/E_i} \quad (1)$$

$$\text{Reflexionskoeffizient:} \quad C_r = H_r/H_i = \sqrt{E_r/E_i} \quad (2)$$

$$\text{Dissipationskoeffizient:} \quad C_d = H_d/H_i = \sqrt{E_d/E_i} \quad (3)$$

mit: H_i = Höhe der einlaufenden Welle [m], H_t = transmittierte Wellenhöhe [m],
 H_r = reflektierte Wellenhöhe [m],
 H_d = der dissipierten Wellenenergie entsprechende Wellenhöhe [m].

Die Änderung der Wellenperiode wird in den gängigen Bemessungsansätzen, wenn überhaupt, nur qualitativ erwähnt. Die Beschreibung der Veränderung der Wellen ohne Berücksichtigung der Wellenperiodenänderung ist jedoch unvollständig, da durch die Periodenänderung die Wellenlänge und damit sowohl deren Steilheit als auch die Wellenschnelligkeit und die Gruppengeschwindigkeit, mit der die in der Welle enthaltene Energie transportiert wird, beeinflusst werden. Die Tatsache, dass die Periodenänderung in den meisten Bemessungsansätzen nicht berücksichtigt wird, mag darauf zurückzuführen sein, dass für die in der Praxis eingesetzten Bemessungsverfahren für andere Küstenschutzbauwerke zumeist die Peakperiode des Wellenspektrums als Eingangsparameter herangezogen wird. Diese ändert sich am Riff nicht, jedoch unterscheidet sich die Form des Spektrums vor und hinter dem Riff signifikant. Dass die Form des Spektrums allerdings nicht vernachlässigt werden kann, zeigen SCHÜTTRUMPF et al. (2002) am Beispiel der Bemessung von Seedeichen auf Wellenüberlauf.

Weiterhin wird das Riff durch die alleinige Verwendung der Energiekoeffizienten als „Black Box“ betrachtet, d.h. die Veränderung der Wellen wird global erfaßt. Globale Erfassung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die maßgeblichen Größen des Riffs und der Wellen wie z.B. die Riffhöhe und -breite, der Wasserstand sowie Wellenperiode und -höhe über einfache mathematische Beziehungen mit den Energiekoeffizienten verknüpft werden. Diese mathematischen Beziehungen beruhen zumeist auf der Auswertung einzelner Feldmessungen oder Modellversuche. Da die untersuchte Bandbreite der einzelnen Parameter dabei beschränkt ist, ist die vollständige Erfassung der Wechselwirkungen schwierig, was z.B. bei Betrachtung der Wellenlänge deutlich wird, deren Verhältnis zur Riffbreite aufgrund von Resonanzerscheinungen eine besondere Bedeutung für das Wellenverhalten am Riff hat. Da die Wellenlänge sowohl von der Wellenperiode als auch von der Wassertiefe abhängig ist, ist hier eine Wechselwirkung zur relativen Wassertiefe über dem Riff d_r/H_i zu erkennen, die allgemein als eine sehr wichtige Größe zur Beschreibung der hydraulischen Wirksamkeit künstlicher Riffe angesehen wird, da sie das Brechverhalten der Wellen maßgeblich bestimmt. Ein zusätzlicher Nachteil ist die Tatsache, dass bei dieser rein globalen Betrachtung nicht auf die lokalen physikalischen Prozesse und kausalen Zusammenhänge eingegangen wird, die zu den beobachteten globalen Effekten führen. Zu diesen lokalen Effekten an künstlichen Riffen zählen insbesondere: (i) Wellenbrechen, (ii) Wirbelbildung und (iii) „nicht-lineare Effekte“ infolge der abnehmenden Wassertiefe im Riffbereich. Während die Abnahme der Wellenhöhe vorwiegend auf das Wellenbrechen und die Wirbelbildung am Riff zurückgeführt wird, werden nicht-lineare Effekte im wesentlichen für die Veränderungen der Wellenperiode verantwortlich gemacht. Mit mathematisch/numerischen Modellen wird versucht die Generierung zusätzlicher Wellenkomponenten, die sich dann in einer veränderten Periode ausdrücken, durch die harmonische Interaktion zweier Wellenkomponenten zu erfassen. Eine Erklärung des Phänomens auf physikalischer Grundlage erfolgt jedoch nicht. Der zum Standard avancierte Begriff „nicht-lineare Effekte“ besagt lediglich, dass die am Riff auftretenden globalen Effekte mit den vereinfachenden Ansätzen der Linearen Wellentheorie nicht erklärbar sind. Die einzelnen physikalischen Prozesse, die der Wellenperiodenänderung zugrunde liegen, sind weder deutlich identifiziert noch richtig verstanden.

Am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig wurde deshalb aufbauend auf den bis dato vorhandenen Erkenntnissen und den aufgezeigten Schwachpunkten ein durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Grundlagenforschungsprojekt initiiert. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Projekts (OUMERACI und BLECK; 2001) wurde ein analytisches Modell entwickelt, das die einzelnen Effekte an künstlichen Riffen entsprechend ihrer Wirkung getrennt voneinander berücksichtigt (BLECK; 2003). Zudem wurde ein einfaches Verfahren zur Erfassung der Verformung der Wellen aufgestellt. Neben den theoretischen Überlegungen bei der Modellbildung fließen die Erkenntnisse physikalischer Modellversuche mit ein, bei denen ein auf die speziellen Bedürfnisse der Versuchseinrichtung angepaßtes optisches Meßverfahren eingesetzt wurde, das nicht nur eine qualitative Strömungsvisualisierung ermöglicht sondern auch die Geschwindigkeitsverteilung um das Riff herum großflächig erfassen kann. Durch diese Technik war es dabei möglich, einen detaillierten Einblick in die Prozesse am Riff zu bekommen.

3.2 Theoretische Grundlagen

Aufbauend auf der Linearen Wellentheorie (vgl. Abb.5) ergibt sich für Bereiche konstanter Wassertiefe folgende allgemeine Lösung für das Geschwindigkeitspotenzial unter einer Welle:

$$\Phi(x, z, t) = -\frac{i \cdot g}{\omega} \cdot a_1 \cdot \exp(ik_1 x) \cdot \frac{\cosh(k_1 [d+z])}{\cosh(k_1 d)} \cdot \exp[-i\omega t] + \sum_{i=2}^{\infty} \left(-\frac{i \cdot g}{\omega} \cdot a_i \cdot \exp(-|k_i| x) \cdot \frac{\cos(|k_i| [d+z])}{\cos(|k_i| d)} \cdot \exp[-i\omega t] \right) \quad (4)$$

mit: $\omega = (2 \cdot \pi) / T$ - Kreisfrequenz der Welle [Hz], T - Wellenperiode [s],
 $k = (2 \cdot \pi) / L$ - Wellenzahl [m^{-1}], L - Wellenlänge [m],
 d - Wassertiefe [m], t - Zeitvariable [s], x - Ortsvariable [-],
 a - komplexe Wellenamplitude [m],
 g - Erdbeschleunigung [m/s^2] und
 i - imaginäre Einheit¹ [-].

Für die zu beobachtende Wasserspiegelauslenkung η folgt daraus:

$$\eta(t) = \exp[-i\omega t] \cdot \left(a_1 \cdot \exp(ik_1 x) + \sum_{i=2}^{\infty} a_i \cdot \exp(-|k| x) \right) \quad (5)$$

Als physikalische Größe wird dabei immer nur der Realteil der Lösung betrachtet. Die Darstellung mit komplexen Zahlen hat jedoch den Vorteil, dass die Phasen der einzelnen Wellen bei der Überlagerung einzelner Wellen in der Phase der komplexen Zahlen berücksichtigt sind, was die mathematische Behandlung wesentlich vereinfacht. So ist auch eine Anfangsphasenverschiebung in der Phase der komplexen Wellenamplitude a berücksichtigt.

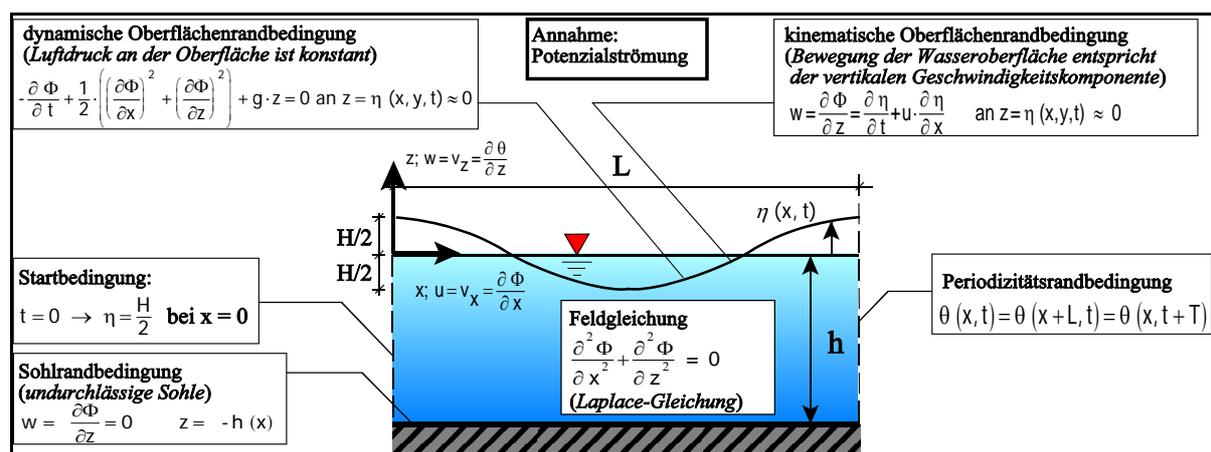


Abb. 5: Überblick über Annahmen und Randbedingungen der Linearen Wellentheorie (nach OUMERACI; 2001)

¹i - imaginäre Einheit: $i^2 = -1$; $\sinh(ix) = i \cdot \sin(x)$; $\cosh(ix) = \cos(x)$

Die Wellenzahl k , die eine Konstante zur Trennung der Variablen darstellt, ergibt sich aus der Dispersionsgleichung, die die kinematische Oberflächenrandbedingung widerspiegelt:

$$\omega^2 = gk \cdot \tanh(kd) \quad (6).$$

Für reelle Werte von k spiegelt sich hierin die allgemein bekannte Lösung einer fortschreitenden, räumlich wie zeitlich periodischen Welle (erster Term in Gl.4 und 5) wieder, während es sich für imaginäre Werte von k um eine örtlich begrenzte Störwelle (zweiter Term (Summenterm) in Gl.4 und 5) handelt. Die reale Wellenzahl k_1 muß dabei der Dispersionsgleichung gemäß Gl.6 genügen, während sich die Dispersionsgleichung zur Ermittlung der imaginären Wellenzahlen k_i auch in folgender Form schreiben läßt:

$$\omega^2 = -g|k| \cdot \tan(|k|d) \quad (7).$$

Man erkennt, dass es zu einer vorgegebenen Wellenperiode und Wassertiefe eine fortschreitende Welle als Lösung der Differentialgleichungen der Linearen Wellentheorie gibt sowie eine Vielzahl lokal begrenzter Störwellen.

Am in Abb.6 skizzierten vereinfachten Riff erkennt man drei Teilbereiche, in denen sich jeweils eine Lösung gemäß Gl.4 für das Geschwindigkeitspotenzial angeben läßt: (i) eine reflektierte Wellengruppe vor dem Riff (a_i), (ii) eine über das Riff fortlaufende Wellengruppe (b_i), (iii) eine am zweiten Tiefensprung reflektierte Wellengruppe (c_i) und (iv) eine hinter dem Riff fortlaufende Wellengruppe (d_i). Zusätzlich ist im Bereich I vor dem Riff die einlaufende Welle (a_{inc}) zu berücksichtigen, die die Startbedingung darstellt.

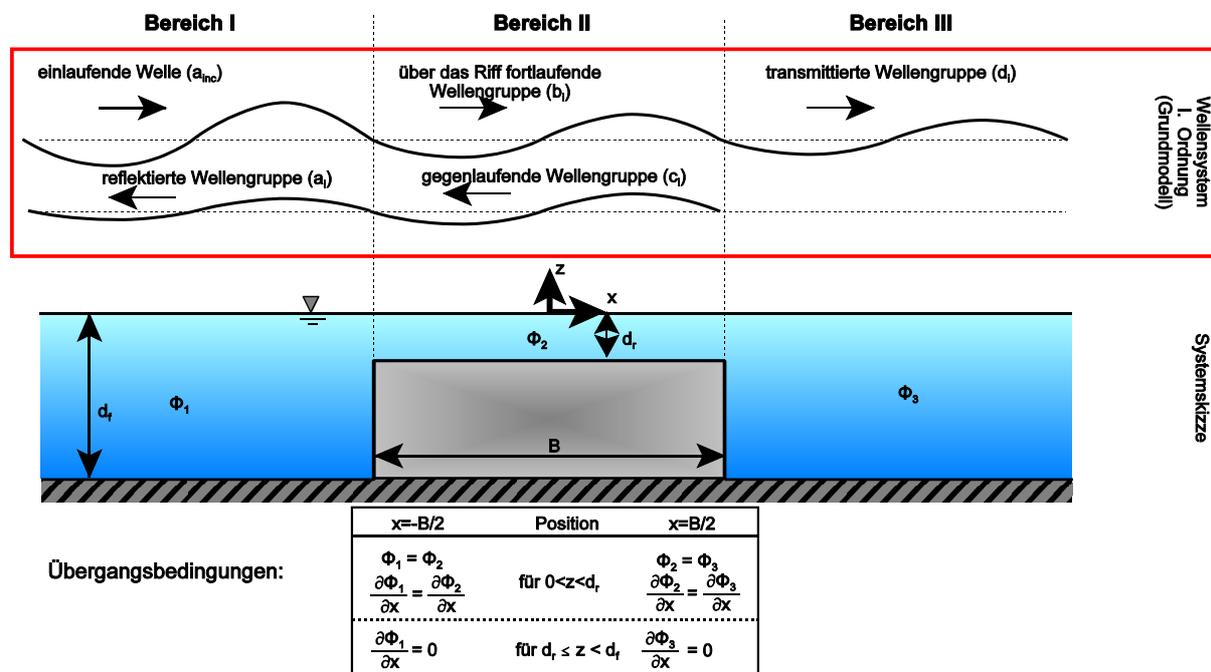


Abb. 6: Systemskizze (Grundwellen)

Die einzelnen komplexen Amplituden, durch die auch der Phasenunterschied zwischen den einzelnen Wellenkomponenten berücksichtigt wird, ergeben sich durch die Anwendung der Übergangsbedingungen zwischen den jeweiligen Bereichen I, II und III (Abb.6), die die Kontinuität der Geschwindigkeit und des Potentials fordern.

An der vorderen Riffkante ($x = -B/2$) folgt als Bedingung für die Geschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe d_f :

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_I = \begin{cases} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{II} & \text{für } -d_r \leq z \leq 0 \\ 0 & \text{für } -d_f \leq z < -d_r \end{cases} \quad (8).$$

Die erste Zeile bedeutet dabei eine Kontinuitätsbedingung für die Geschwindigkeit im Bereich über dem Riff ($-d_r \leq z \leq 0$), wo die Bereiche I und II eine gemeinsame Trennfläche haben. Die zweite Zeile drückt die Undurchlässigkeit der Riffoberfläche aus.

Für das Geschwindigkeitspotential muß die Kontinuität nur im Bereich über dem Riff erfüllt sein. Es folgt:

$$\Phi_I = \Phi_{II} \quad \text{für } -d_r \leq z \leq 0 \quad (9).$$

An der hinteren Riffkante ($x = B/2$) folgt analog:

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{III} = \begin{cases} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{II} & \text{für } -d_r \leq z \leq 0 \\ 0 & \text{für } -d_f \leq z < -d_r \end{cases} \quad (10)$$

bzw.:

$$\Phi_{III} = \Phi_{II} \quad \text{für } -d_r \leq z \leq 0 \quad (11).$$

Zur Bestimmung der Amplituden der vier fortlaufenden Wellen und der unbestimmten Anzahl der Störwellen in den einzelnen Wellensystemen stehen demzufolge nur vier Übergangsbedingungen zur Verfügung, die über einen bestimmten Bereich ($-d_r \leq z \leq 0$ bzw. $-d_f \leq z \leq 0$) erfüllt sein müssen. Die Lösung erfolgt durch Anwendung der "Potential Matching Technique" von IJIMA und SASAKI (1971), die einem Näherungsverfahren nach Galerkin (BRONSTEIN und SEMENDJAJEW; 1989; Abschnitt 7.1.2.2) entspricht.

Dazu werden die einzelnen Geschwindigkeitspotenziale entsprechend Gl.4 für die jeweiligen Bereiche I, II bzw. III in die Übergangsbedingungen eingesetzt, die über die Wassertiefe gewichtet werden. Die Wichtungsfunktionen werden durch die tiefenabhängigen cosh- bzw. cos-Terme der einzelnen Wellensysteme gebildet. Die im Galerkin-Verfahren geforderte Orthogonalitätsbedingung für die Wichtungsfunktionen ist somit durch die Dispersionsgleichung (Gl.6 bzw. 7) erfüllt. Jede Welle bedeutet auch eine Wichtungsfunktion, so dass sich ein bestimmtes Gleichungssystem ergibt. Entsprechend der Wassertiefe in der sich die Wellen

befinden und ihrem Ursprungsort sind die einzelnen Wellen als Wichtungsfunktion jeweils einer der Übergangsbedingungen (Gl.8-11) zugeordnet.

Geht man von n_s Störwellen in jedem der vier Wellensysteme aus, so ergibt sich das in Tafel 1 gegebene Gleichungssystem. Gl.12 entspricht dabei Gl.8, und Gl.13 ergibt sich aus Gl.9. Ebenso ist die Beziehung zwischen Gl.14 und Gl.10 bzw. Gl.15 und Gl.11. Die physikalische Bedeutung der einzelnen Gleichungen sowie die Struktur und die Belegung der Koeffizientenmatrix sind in Abb.7 zur besseren Veranschaulichung nochmal grafisch dargestellt.

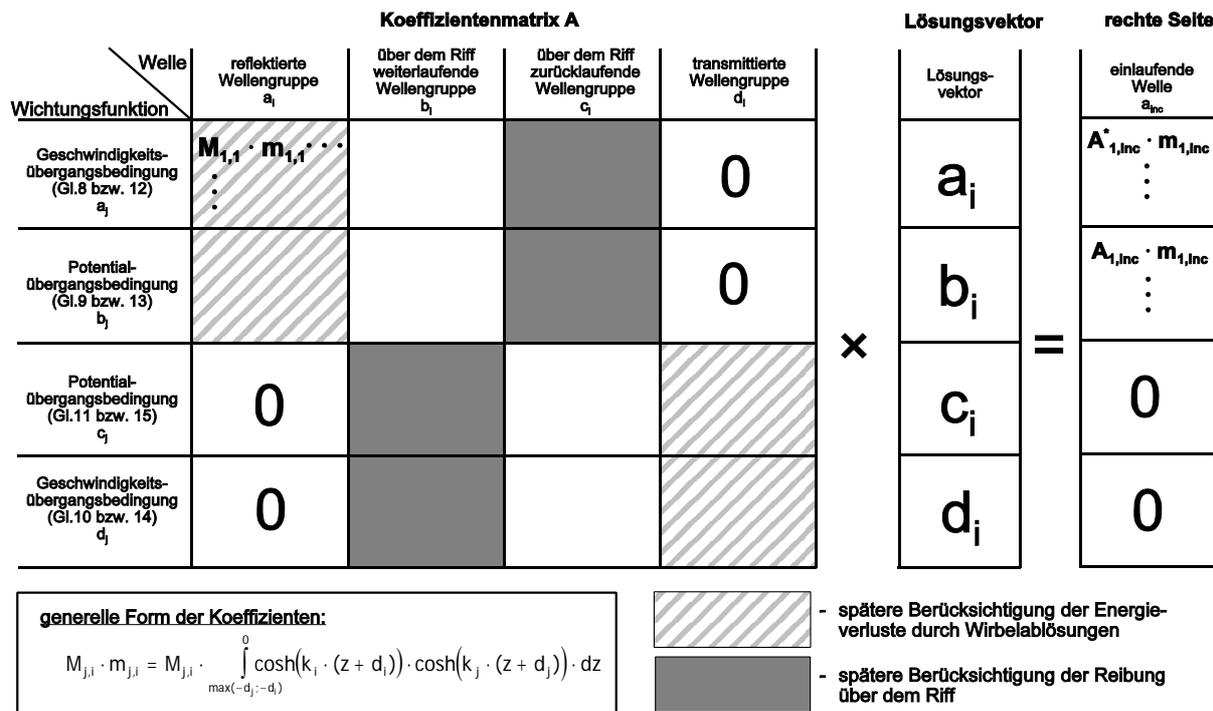


Abb. 7: Struktur des resultierenden Gleichungssystems und Bedeutung der einzelnen Koeffizienten

Die Lösung wurde durch ein Rechnerprogramm umgesetzt. Die Lösung für die fortlaufenden Wellen konvergiert mit steigender Zahl n_s der berücksichtigten Störwellen. Während ISAACSON et al. (1998) maximal $n_s = 50$ Wellenkomponenten für die Berechnung von dünnen Riffen verwenden, berichtet KOETHER (2002) für Unterwasserfiltersysteme von einer Konvergenz erst ab einer Wellenanzahl von $n_s \geq 120$. Im vorliegenden Fall zeigt sich eine sehr schnelle Konvergenz der Lösung ($n_s < 10$; Abb.8), wobei diese auch von den Wellenparametern abhängig ist. Für die in Abb.8 dargestellte 5s-Welle geht die Lösung für die Koeffizienten wesentlich eher in eine horizontale Gerade über als für die 1s-Welle, bei der im Bereich von $n_s < 5$ leichte Schwankungen der Lösung zu bemerken sind. Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchung werden $n_s = 10$ Störwellen verwendet, was das Gleichungssystem reduziert, und so die Rechenzeit optimiert.

$x = -B/2$:

$$\sum_{i=1}^{n_s} A_i^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz + A_{inc}^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_1 \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz = \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} B_i^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz + \sum_{i=1}^{n_s} C_i^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} A_i \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz + A_{inc} \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_1 \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz = \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_s} B_i \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz + \sum_{i=1}^{n_s} C_i \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz$$

$x = B/2$:

$$\sum_{i=1}^{n_s} B_i^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz + \sum_{i=1}^{n_s} C_i^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz \quad (14)$$

$$= \sum_{i=1}^{n_s} D_i^* \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j \cdot (z + d_r)] \cdot dz$$

an $x = B/2$

$$\sum_{i=1}^{n_s} B_i \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz + \sum_{i=1}^{n_s} C_i \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i^* \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz \quad (15)$$

$$= \sum_{i=1}^{n_s} D_i \cdot \int_{-d_r}^0 \cosh[k_i \cdot (z + d_r)] \cdot \cosh[k_j^* \cdot (z + d_r)] \cdot dz$$

mit:

$$A_{inc}^* = \frac{k_1 \cdot g \cdot \exp[i k_1 (x + B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_1 d_r)} \cdot a_{inc} ; \quad A_{inc} = \frac{-i \cdot g \cdot \exp[i k_1 (x + B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_1 d_r)} \cdot a_{inc} ;$$

$$A_i^* = \frac{k_i \cdot g \cdot \exp[i k_i (x + B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i d_r)} \cdot a_i ; \quad A_i = \frac{-i \cdot g \cdot \exp[i k_i (x + B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i d_r)} \cdot a_i ;$$

$$B_i^* = \frac{k_i^* \cdot g \cdot \exp[i k_i^* (x + B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i^* d_r)} \cdot b_i ; \quad B_i = \frac{-i \cdot g \cdot \exp[i k_i^* (x + B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i^* d_r)} \cdot b_i ;$$

$$C_i^* = \frac{k_i^* \cdot g \cdot \exp[i k_i^* (x - B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i^* d_r)} \cdot c_i ; \quad C_i = \frac{-i \cdot g \cdot \exp[i k_i^* (x - B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i^* d_r)} \cdot c_i ;$$

$$D_i^* = \frac{k_i^* \cdot g \cdot \exp[i k_i^* (x - B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i^* d_r)} \cdot d_i ; \quad D_i = \frac{-i \cdot g \cdot \exp[i k_i^* (x - B/2)] \cdot \exp(-i \omega t)}{\omega \cdot \cosh(k_i^* d_r)} \cdot d_i ;$$

$j = 1; 2; 3; \dots; n_s$

Tafel 1: Gleichungssystem des Grundmodells

3.3 Experimentelle Untersuchungen

Bis jetzt sind in dem beschriebenen Modell keinerlei Energieverluste berücksichtigt. Diese entstehen u.a. durch Wirbelablösungen, Reibung und den Strömungswiderstand des Riffs sowie durch Wellenbrechen. Auch tragen Interferenzerscheinungen über dem Riff zur wellendämpfenden Wirkung des Riff bei, die bereits teilweise berücksichtigt sind. Um die verbleibenden Effekte zu untersuchen, wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, bei denen neben herkömmlichen Meßgeräten (Wellenpegel, Druckmeßdosen und Strömungssonden) ein auf den Prinzipien der Particle-Image-Velocimetry (PIV) basierendes optisches Meßsystem zum Einsatz kam (Abb.9). Dazu wurde die Strömung rund um das Riff mit Hilfe spezieller Kunststoff-

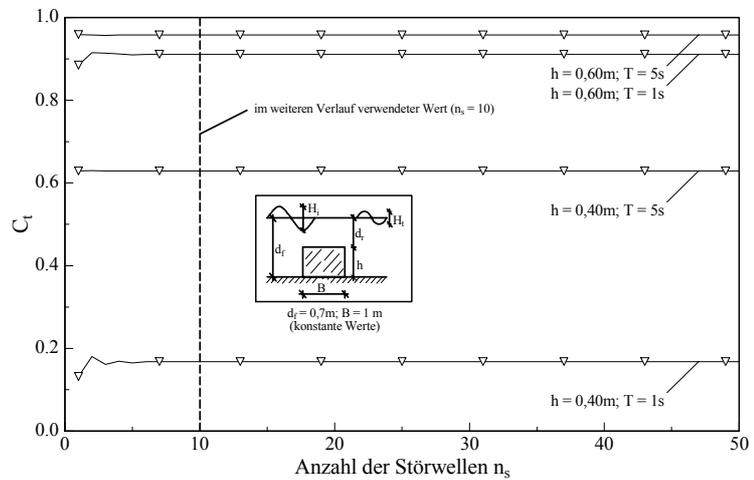
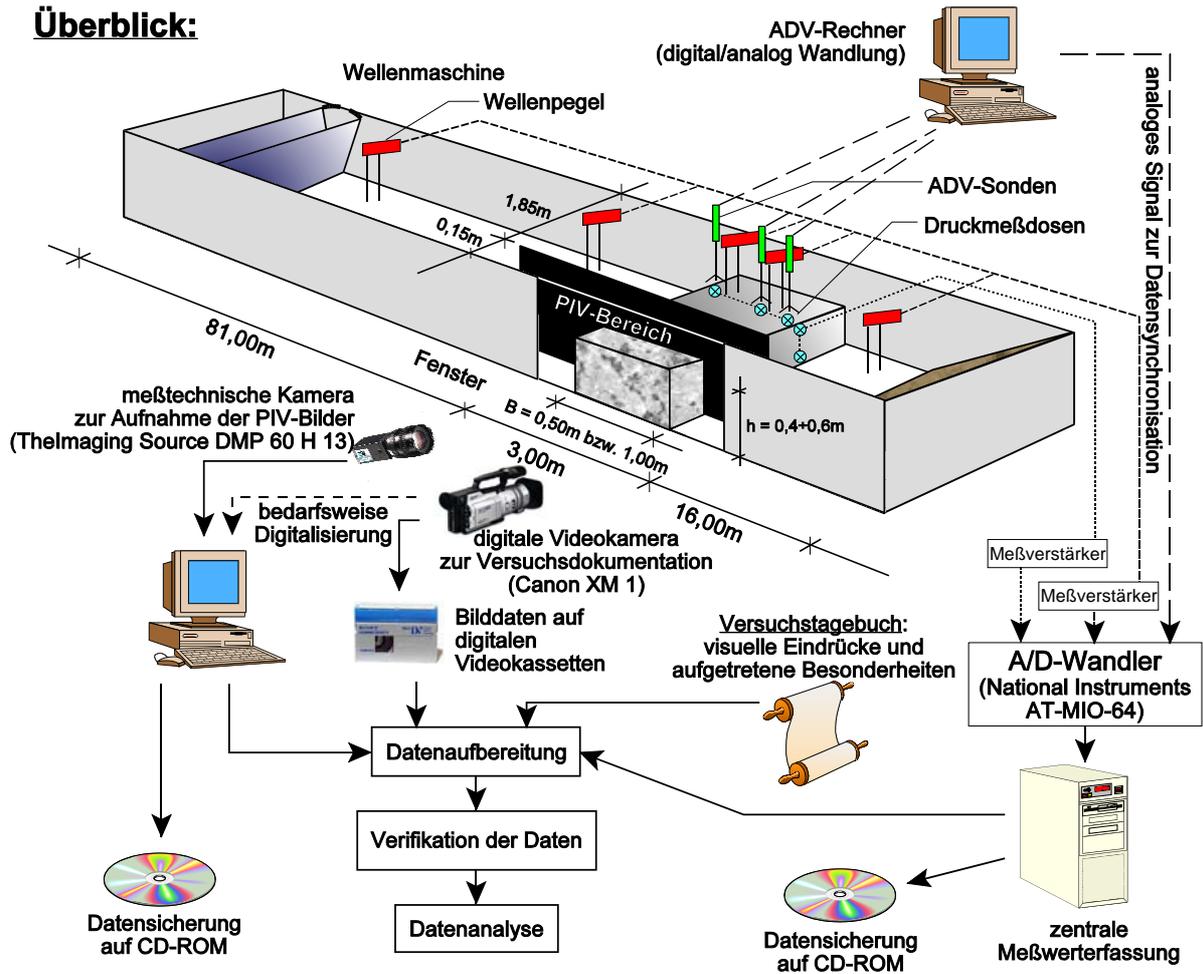


Abb. 8: Einfluß der Anzahl der berücksichtigten Störwellen

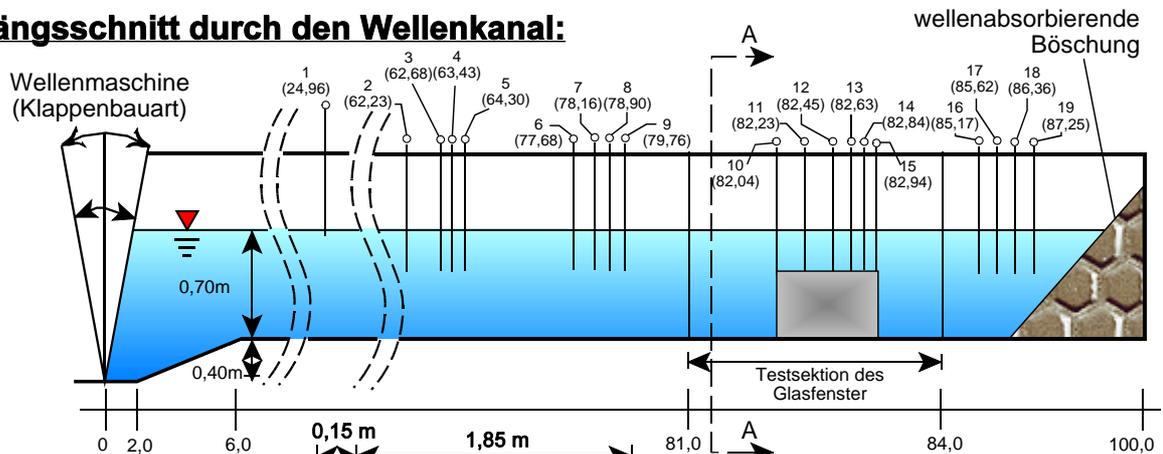
partikel visualisiert, wodurch ein qualitativer Einblick in die ablaufenden Prozesse ermöglicht wird. Durch die Aufzeichnung dieser Strömungsvorgänge mit einer meßtechnischen Kamera und eine anschließende Bildauswertung konnte das gesamte Geschwindigkeitsfeld rund um das Riff quantitativ erfaßt werden. Diese neuartige Meßtechnik wurde mit Hilfe der simultan durchgeführten punktuellen Geschwindigkeitsmessungen (ADV-Sonden) verifiziert (BLECK und OUMERACI; 2001)

Neben diesen Einblicken in das Strömungsgeschehen um das Riff, konnten die existierenden empirischen Verfahren zur globalen Beschreibung des Wellenverhaltens an künstlichen Riffen für den untersuchten Bereich der Bauwerks- und Wellenparameter im Prinzip bestätigt werden. Während sich hinter dem Riff bei den zur Untersuchung der lokalen Prozesse verwendeten Versuchen mit regelmäßigen Wellen lokal unterschiedliche Wellenhöhen einstellten, was auf die Eigenschaften der zusätzlich am Riff generierten Wellen zurückgeführt werden kann (BLECK; 2003), war dieser Effekt bei den Versuchen mit Wellenspektren nicht zu beobachten. Die am Riff generierten freien Oberwellen bewegen sich mit der ihnen eigenen Geschwindigkeit fort. Da diese sich von der Fortschrittgeschwindigkeit der Grundwellen unterscheidet, kommt es abhängig vom Abstand zum Riff zu destruktiver bzw. konstruktiver Interferenz. Aufgrund der Vielzahl der in den Wellenspektren enthaltenen Wellenkomponenten und aufgrund der zufällig verteilten Phasen im einlaufenden Spektrum ist dieser Effekt für die Versuche mit Wellenspektren zwar auch vorhanden, jedoch gleichen sich die Auswirkungen aus, so dass es gerechtfertigt ist, die transmittierte Welle durch eine lokale Messung hinter dem Riff zu beschreiben (BLECK; 2003).

Überblick:



Längsschnitt durch den Wellenkanal:



Querschnitt (A-A): (im Modellbereich)

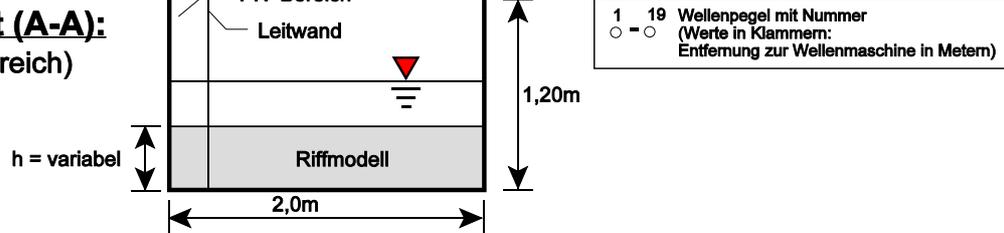
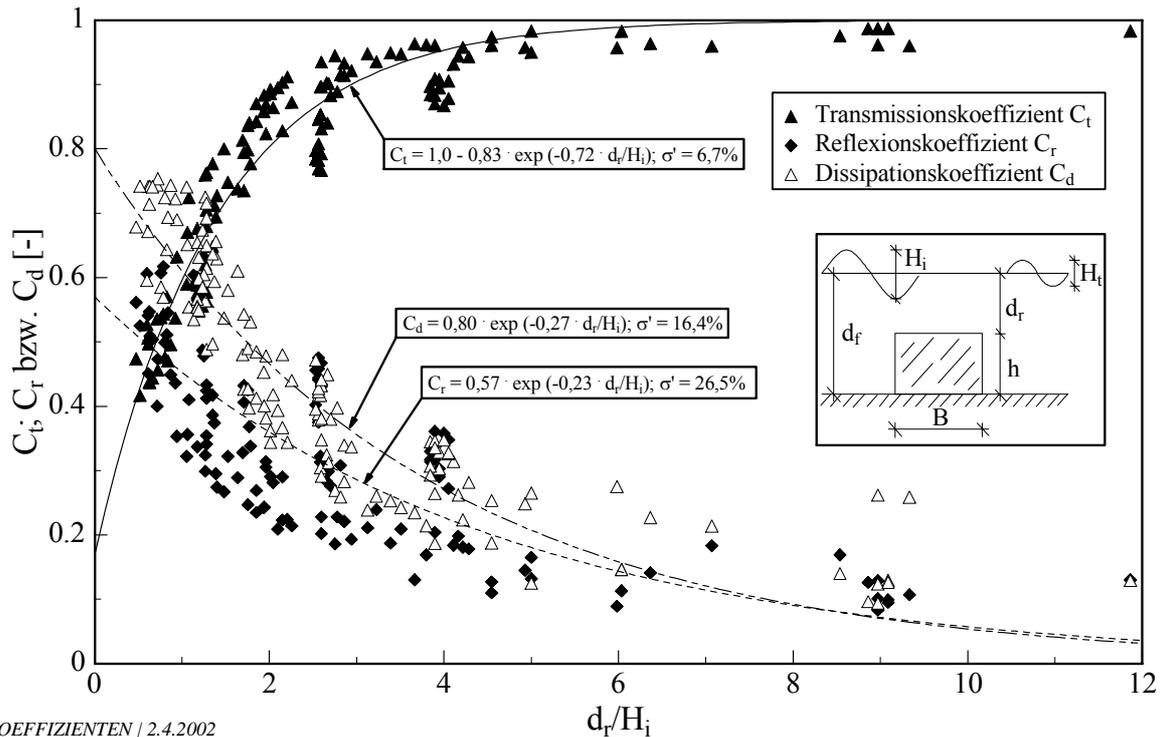


Abb. 9: Überblick über Versuchsaufbau, Meßkette und Datenfluß

Im Hinblick auf die globale Beschreibung des Wellenverhaltens an künstlichen Riffen wurde neben der Bestätigung der vorhandenen Verfahren eine Regressionsanalyse der eigenen Ergebnisse vorgenommen (Tab.1). Dabei konnte, unterstützt durch eine Dimensionsanalyse, die relative Wassertiefe über dem Riff d_r/H_i als entscheidender Parameter zur Charakterisierung des Wellenverhaltens an Riffen identifiziert werden (Abb.10). Die Genauigkeit der empirischen Bemessungsformeln ausgedrückt durch die relative Standardabweichung σ' (zur Definition siehe: BLECK; 2003) ist insbesondere für den Transmissionskoeffizienten C_t bei der alleinigen Verwendung der relativen Wassertiefe d_r/H_i nicht wesentlich schlechter als bei Berücksichtigung aller Einflußparameter.



KOEFFIZIENTEN | 2.4.2002

Abb. 10: Einfluß der relativen Wassertiefe d_r/H_i auf die Energiekoeffizienten

Zusätzlich zur üblichen Beschreibung der Energieumwandlung mit Hilfe der Energiekoeffizienten wurde die Verformung des Spektrums durch die Verschiebung des Schwerpunkts des Spektrums erfaßt (BLECK und OUMERACI; 2001). Physikalische gesehen ist dieser Schwerpunkt nichts anderes als die mittlere Wellenperiode T_{01} bzw. T_{-10} des Spektrums:

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} = \frac{\int S(f) \cdot df}{\int S(f) \cdot f \cdot df} \quad (16)$$

bzw.

$$T_{-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int S(f) \cdot f^{-1} \cdot df}{\int S(f) \cdot df} \quad (17).$$

Tab.1: Ermittelte Zusammenhänge zwischen den untersuchten Einflußparametern und den Energiekoeffizienten bei Wellenspektren

	Multiple Regression (d_r/H_i ; H_i/L_i ; B/L_i)	einfache Regression (d_r/H_i)
Transmission	$C_t = 0,5 + 0,5 \cdot \cos \left(0,48 \left(\frac{B}{L_i} \right)^{0,15} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^{-0,35} \left(\frac{d_r}{H_i} \right)^{-0,7} \right) \quad (18)$ $\sigma'_{ct} = 4,6 \%$	$C_t = 1,0 - 0,83 \cdot \exp[-0,72 \cdot d_r/H_i] \quad (21)$ $\sigma'_{ct} = 6,7 \%$
Reflexion	$C_r = 0,5 + 0,5 \cdot \cos \left(2,66 \left(\frac{B}{L_i} \right)^{0,01} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^{0,125} \left(\frac{d_r}{H_i} \right)^{0,2} \right) \quad (19)$ $\sigma'_{cr} = 12,3 \%$	$C_r = 0,57 \cdot \exp[-0,23 \cdot d_r/H_i] \quad (22)$ $\sigma'_{cr} = 26,5 \%$
Dissipation	$C_d = 0,5 + 0,5 \cdot \cos \left(1,77 \left(\frac{B}{L_i} \right)^{-0,1} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^{0,14} \left(\frac{d_r}{H_i} \right)^{0,45} \right) \quad (20)$ $\sigma'_{cd} = 10,5 \%$	$C_d = 0,80 \cdot \exp[-0,27 \cdot d_r/H_i] \quad (23)$ $\sigma'_{cd} = 16,4 \%$

Die Formänderung wird über das Verhältnis der mittleren Wellenperiode hinter dem Riff zur mittleren Wellenperiode vor dem Riff über den Periodenkoeffizienten ausgedrückt:

$$C_{T01} = \frac{T_{01,t}}{T_{01,i}} = \frac{m_{0,t} \cdot m_{1,i}}{m_{1,t} \cdot m_{0,i}} \quad (24)$$

bzw.

$$C_{T-10} = \frac{T_{-10,t}}{T_{-10,i}} = \frac{m_{-1,t} \cdot m_{0,i}}{m_{0,t} \cdot m_{-1,i}} \quad (25).$$

Wie schon bei den Energiekoeffizienten zeigt sich eine starke Abhängigkeit von der relativen Wassertiefe über dem Riff (vgl. Abb. 11 und Tab.2). Die Verwendung anderer kennzeichnender Wellenperioden mit höheren spektralen Momenten (z.B. T_{02}) stellte sich aufgrund der mathematischen Instabilität dieser höheren Momente als nicht sinnvoll heraus. Ebenso wurde auf die Verwendung mittlerer Wellenperioden der Zeitreihenanalyse (z.B. T_m) verzichtet, da kleinere Wellen z.T. nicht in die Analyse mit eingehen (OUMERACI und BLECK; 2001)

Tab.2: Regressionsgleichungen für die Periodenkoeffizienten

	Multiple Regression (d _r /H _i ; H _i /L _i ; B/L _i)	einfache Regression (d _r /H _i)
C _{T01}	$C_{T01} = 0,9 \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^{-0,07} \cdot \left(\frac{H_i}{L} \right)^{0,07} \cdot \left(\frac{d_r}{H_i} \right)^{0,16} \quad (26)$ $\sigma'_{CT01} = 4,2 \%$	$C_{T01} = 1 - 0,36 \cdot \exp \left(-0,58 \cdot \frac{d_r}{H_i} \right) \quad (28)$ $\sigma'_{CT01} = 4,7 \%$
C _{T-10}	$C_{T-10} = 0,9 \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^{-0,04} \cdot \left(\frac{H_i}{L} \right)^{0,04} \cdot \left(\frac{d_r}{H_i} \right)^{0,11} \quad (27)$ $\sigma'_{CT-10} = 2,9 \%$	$C_{T-10} = 1 - 0,24 \cdot \exp \left(-0,63 \cdot \frac{d_r}{H_i} \right) \quad (29)$ $\sigma'_{CT-10} = 3,0 \%$

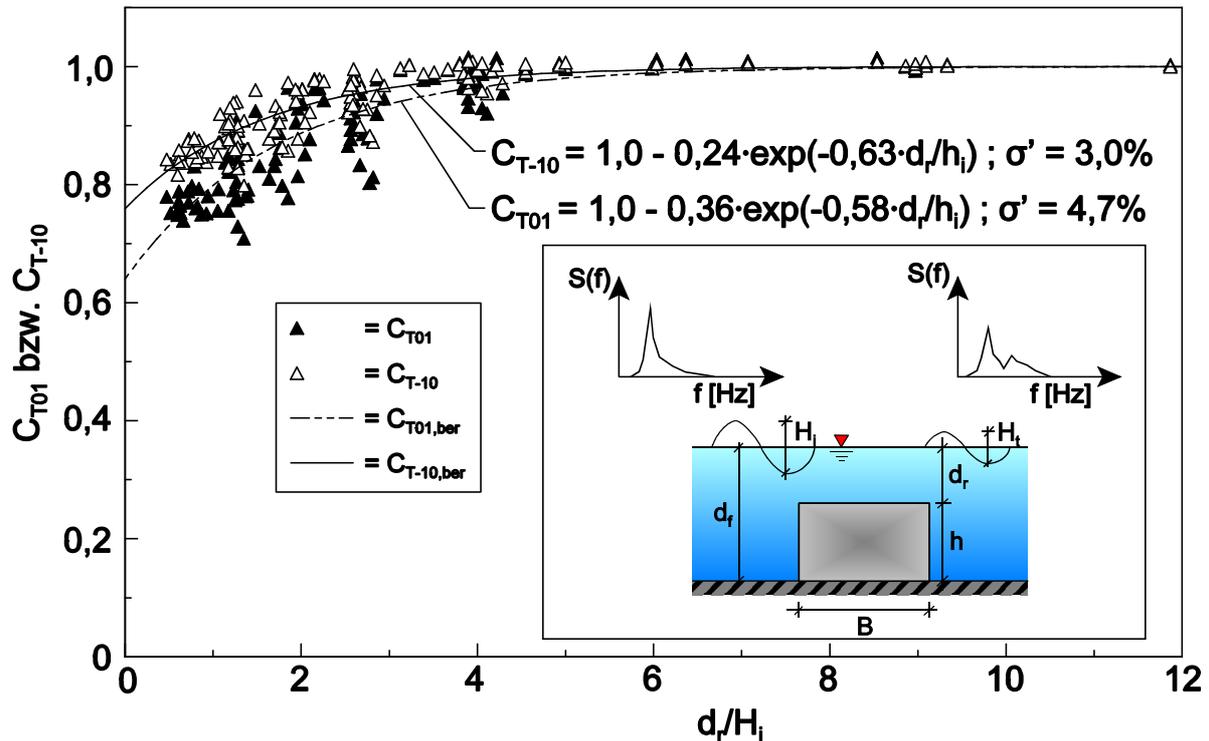


Abb. 11: Einfluß der relativen Wassertiefe d_r/H_i auf die Formänderung des Spektrums

Die Bedeutung der relativen Wassertiefe d_r/H_i zeigt sich auch bei der Betrachtung des Wellenbrechens an Riffen (BLECK und OUMERACI; 2002). Neben den bekannten Brechertypen Reflektionsbrecher, Schwallbrecher und Sturzbrecher treten dabei die in Abb.12 skizzierten Brechertypen auf. Ausgehend von einem modifizierten Brechkriterium nach MICHE (1951) läßt sich für den Flachwasserbereich am Riff eine Grenzwassertiefe festlegen (Abb.13):

$$\left(\frac{d_r}{H_i} \right)_{\text{grenz}} = 1,51 \quad (30).$$

Bei weiter abnehmender Wassertiefe treten dann Fallbrecher auf, wobei sich hier die Grenzwassertiefe zu:

$$\left(\frac{d_r}{H_i} \right)_{\text{Fallbrecher}} = 0,7 \quad (31)$$

ergibt.

Auch im Hinblick auf die Wirbelbildung und die Beeinflussung der Form der Wellen sind die Auswirkungen des Riffs mit abnehmender Wassertiefe immer ausgeprägter. Eine quantitative Erfassung der Wirbelstärke war nicht möglich, da das eingesetzte optische Meßsystem keine Erfassung der Dichteänderung des Wassers durch Lufteinschlüsse vor allem beim Wellenbrechen ermöglichte. Qualitative Zusammenhänge und Anregungen diese Wissenslücke zu schließen finden sich bei BLECK (2003).

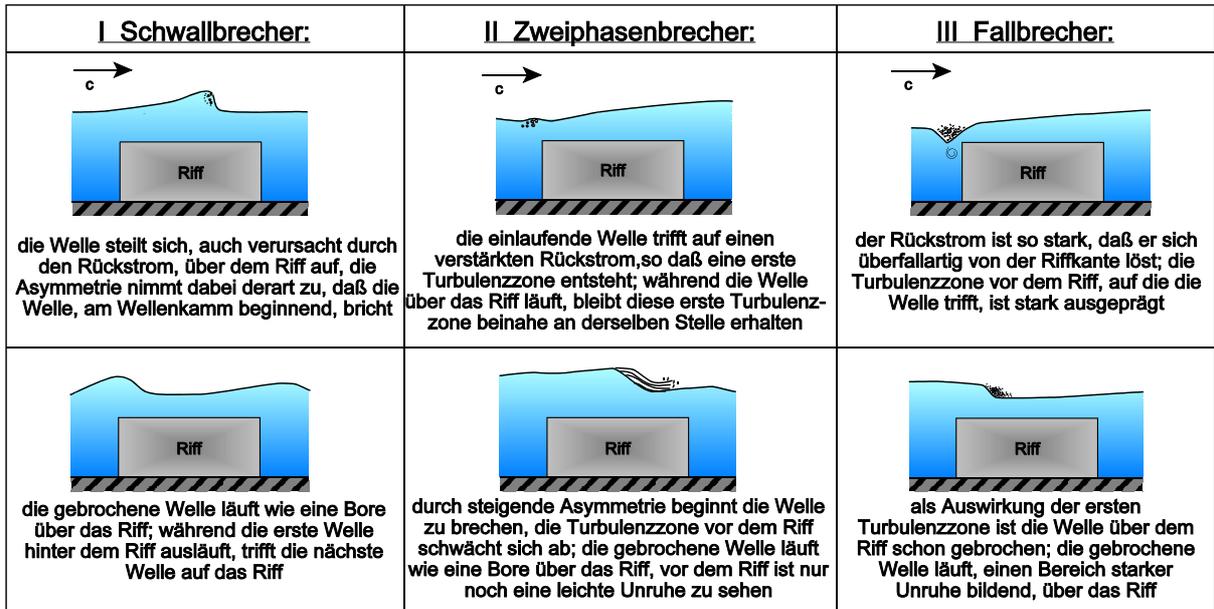


Abb. 12: Schematische Übersicht der Brechertypen an rechteckigen Unterwasserhindernissen nach BLECK et al. (2003)

Letztendlich wurden die durch die Modellversuche gewonnenen Erkenntnisse schrittweise entsprechend den physikalischen Zusammenhängen in das analytische Modell eingearbeitet, um dessen Güte zu steigern und den Anwendungsbereich des Modells zu erweitern.

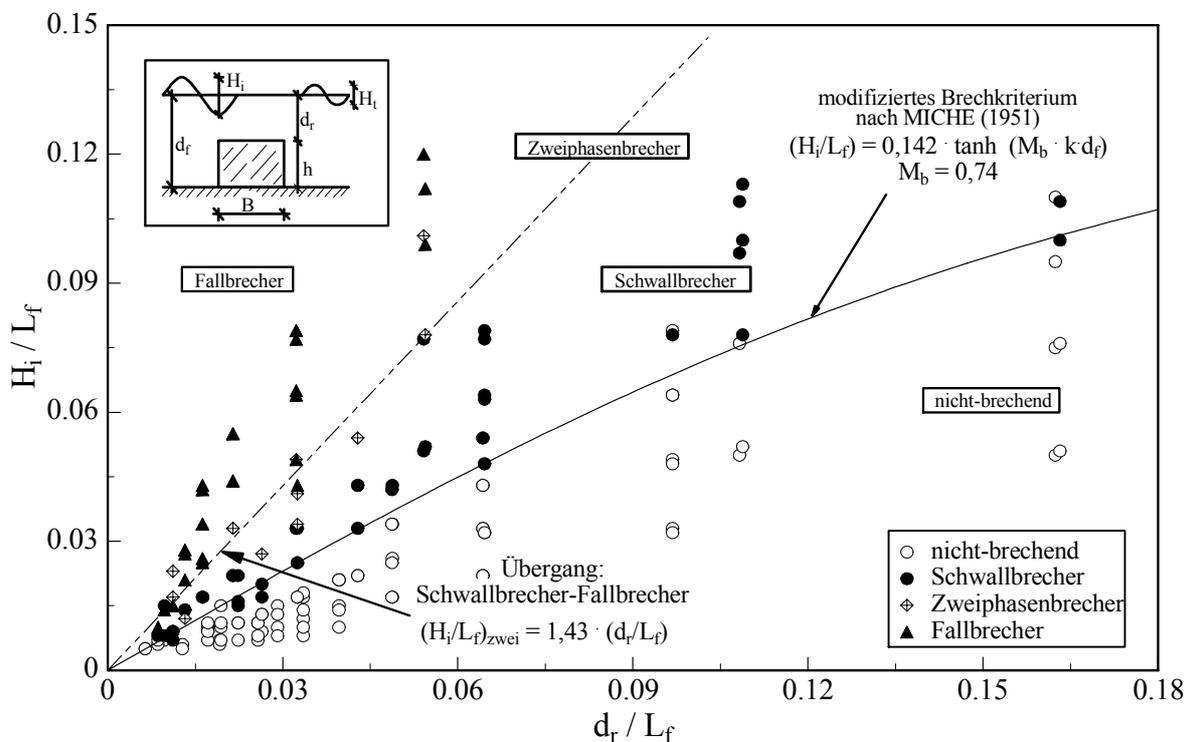


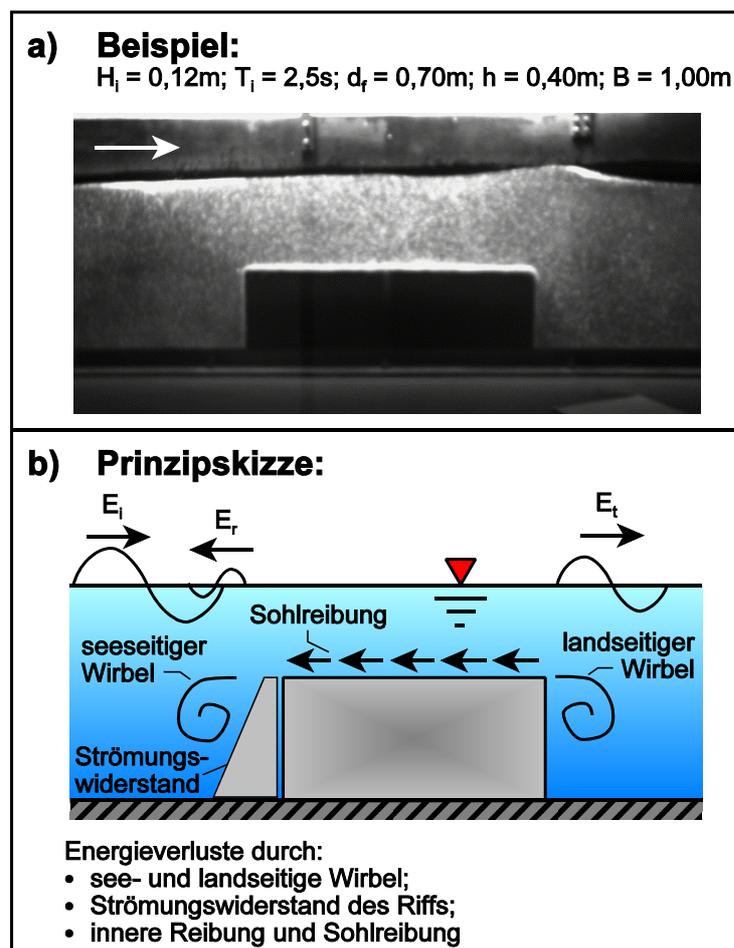
Abb. 13: Auftreten der einzelnen Brechertypen am Riff (regelmäßige Wellen)

3.4 Erweiterung des analytischen Modells

Hinsichtlich der Energieverluste ist zu unterscheiden, ob die Wellen über dem Riff brechen oder nicht, da durch den Brechvorgang zusätzliche Mechanismen der Energiedissipation aktiviert werden, die bei nicht-brechenden Wellen nicht zum Tragen kommen. Da das verwendete Potenzialmodell prinzipiell keine Energieverluste berücksichtigt, wird zunächst für den Bereich der nicht-brechenden Wellen ein empirischer Ansatz zur Erfassung der Energieverluste erarbeitet. Anschließend werden die brechenden Wellen gesondert behandelt.

3.4.1 Energieverluste bei nicht-brechenden Wellen

Bei nicht-brechenden Wellen ($H_i \leq 0,66 \cdot d_r$) sind mehrere Ursachen für Energieverluste zu nennen (Abb.14). Zum einen verliert die Welle beim Fortschreiten Energie durch innere Reibung aber auch durch Reibungseffekte an der Sohle. Zum anderen lösen sich Wirbel von der Riffstruktur ab, die eine weitere Energieabnahme bewirken. Auch ist der Strömungswiderstand des Riffs zu berücksichtigen.



Reibung aber auch durch Reibungseffekte an der Sohle. Zum anderen lösen sich Wirbel von der Riffstruktur ab, die eine weitere Energieabnahme bewirken. Auch ist der Strömungswiderstand des Riffs zu berücksichtigen.

Das Geschwindigkeitspotenzial unter einer Welle hängt linear von der Wellenhöhe ab (Lineare Wellentheorie), die wiederum quadratisch in die Energie unter einer Welle eingeht. Aus der Kenntnis der Energieabnahme bzw. der Wellenhöhenänderung kann also direkt auf die Veränderung des Potenzials unter einer Welle geschlossen werden.

Für die Wellendämpfung durch Reibung an der Sohle und innerhalb der Strömung folgt nach KEULEGAN (1950 a und b) auf einer Lauflänge Δx eine Abnahme der Wellenhöhe und damit des Potenzials auf:

Abb. 14: Quellen des Energieverlusts am Riff bei nicht-brechenden Wellen

$$\delta_{\text{reib}}(\Delta x) = \frac{\Phi(\Delta x)}{\Phi_0} = \frac{H(\Delta x)}{H_0} = \exp[(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \Delta x] \quad (32),$$

mit: $\alpha_1 = -k^3 \cdot v \cdot T$ - Beiwert zur Berücksichtigung der inneren Reibung [m^{-1}],
 $\alpha_2 = -\frac{4 \cdot \pi^{3/2} \cdot (v \cdot T)^{0,5}}{L^2(\sinh(2kd) + 2kd)}$ - Beiwert zur Erfassung der Sohlreibung [m^{-1}],
 v - kinematische Viskosität [m^2/s],
 T - Wellenperiode [s],
 d - lokale Wassertiefe [m],
 L - lokale Wellenlänge [m] und
 $k = 2 \cdot \pi / L$ - Wellenzahl [-].

Zusätzlich müssen Energieverluste durch Strömungsablösungen an den Bauwerkskanten berücksichtigt werden. Da die meßtechnische, quantitative Erfassung dieser Energieverluste aufgrund der geschilderten Probleme (zu geringe räumliche Auflösung und fehlende Erfassung der Lufteinschlüsse in den brechenden Wellen) nur eingeschränkt möglich war, wird hier auf den theoretischen Ansatz von STIASSNIE (1984) zurückgegriffen, mit dem KOETHER (2002) gute Ergebnisse für die Berechnung der Energieverluste an Unterwasserfiltersystemen erzielte. Der für Tauchwände hergeleitete Ansatz wird unter Berücksichtigung der veränderten Geometrie entsprechend den exakten Lösungen für das Wellenpotenzial für eine Tauchwand bzw. ein dünnes Riff nach URSELL (1947) angepaßt. Die Ergebnisse für eine Tauchwand (Einschränkung des oberen Strömungsquerschnitts) bzw. ein Riff (Einschränkung des unteren Strömungsquerschnitts) unterscheiden sich nach URSELL demzufolge nur durch die Ordnung der einfließenden Bessel-Funktionen. Der theoretische Energieanteil der Wirbel am Riff bezogen auf die Energie der einlaufenden Welle ergibt sich demzufolge zu:

$$\frac{E_{\text{wirbel}}}{E_i} = 1,75 \cdot \frac{(k \cdot H_i)^{2/3}}{\left[k \cdot d_r \cdot \left(K_0^2(k \cdot d_r) + \pi^2 I_0^2(k \cdot d_r) \right) \right]^{4/3}} \quad (33),$$

mit: I_0 - modifizierte Bessel-Funktion erster Gattung null-ter Ordnung;
 K_0 - modifizierte Bessel-Funktion zweiter Gattung null-ter Ordnung.

Die relative Abnahme der Wellenenergie und damit des Potenzials ergibt sich zu:

$$\delta_{\text{wirbel}} = \frac{E_x}{E_i} = \frac{H_x^2}{H_i^2} \left(\propto \frac{\Phi_x^2}{\Phi_i^2} \right) = \frac{E_i - E_{\text{wirbel}}}{E_i} = 1 - \frac{E_{\text{wirbel}}}{E_i} \quad (34).$$

Weiterhin übt das Wasser eine Kraft auf das Riff aus, wodurch weitere Energieverluste verursacht werden. Die auf das Riff einwirkende Kraft ergibt sich laut BOLLRICH (1996) zu:

$$F_{\text{riff},1} = \int_{-d_f}^{-d_r} c_w \cdot \rho_w \cdot \frac{v_x(z)^2}{2} \cdot dz \quad (35)$$

mit: v_x - horizontale Orbitalgeschwindigkeit unter der Welle [m/s] und
 $c_w = 2,0$ - Widerstandsbeiwert nach BOLLRICH (1996).

Die so dissipierte Energie folgt zu:

$$E_{\text{kraft}} = \int_{t_0}^{t_0+T} F_{\text{riff}} \cdot v_x(z) \cdot dt \quad (36)$$

und wird mit der Energie der einlaufenden Welle ins Verhältnis gesetzt, wodurch man die anteilige Reduktion der Wellenenergie durch die Kraftentwicklung erhält:

$$\delta_{\text{kraft}} = \frac{E_i - E_{\text{kraft}}}{E_i} = 1 - \frac{E_{\text{kraft}}}{E_i} \quad (37),$$

die in die Koeffizienten für die reflektierte Welle eingeht.

Die entsprechenden Abminderungsfaktoren δ werden im Gleichungssystem in der Koeffizientenmatrix berücksichtigt. Explizit bedeutet dies, daß in Gl.14 und 15 die Koeffizienten C_i und C_i^* mit einem Beiwert δ_{reib} multipliziert werden, um zu berücksichtigen, dass diese Wellen auf ihrem Weg über das Riff Energie durch Reibung verloren haben, und somit weniger Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitspotenzial haben. Gleiches gilt für die Koeffizienten B_i bzw. B_i^* in Gl.12 und 13. In Abb.7 sind diese Koeffizienten grau hinterlegt. Im einzelnen folgt:

$$B_{i,v}^{(*)} = \delta_{\text{reib}}(x+B/2) \cdot B_i^{(*)} \quad (38).$$

bzw.
$$C_{i,v}^{(*)} = \delta_{\text{reib}}(x-B/2) \cdot C_i^{(*)} \quad (39).$$

Die Wirbelverluste treten land- bzw. seeseits des Riffs auf und werden in den entsprechenden Koeffizienten für die für die reflektierte bzw. transmittierte Welle berücksichtigt (in Abb.7 grau schraffiert). Da diese Wellenkomponenten ohne die Energieverluste einen stärkeren Einfluß hätten als die zu berechnenden abgeschwächten Wellen, werden die entsprechenden Koeffizienten entsprechend der Verluste erhöht. Zusätzlich zu den Verlusten aufgrund der Wirbelablösungen fließt auf der Seeseite des Bauwerks der Strömungswiderstand des Riffs in die Berechnung mit ein:

$$A_{i,v}^{(*)} = \frac{A_i^{(*)}}{\delta_{\text{kraft}} \cdot \delta_{\text{wirbel}}} \quad (40)$$

und:
$$D_{i,v}^{(*)} = \frac{D_i^{(*)}}{\delta_{\text{wirbel}}} \quad (41).$$

Für den Vergleich mit den gemessenen Daten wird zudem die Wellenhöhenreduktion durch Reibung berücksichtigt, die die einlaufenden Wellen von dem Wellenpegel, an dem sie gemessen werden, bis zum Riff erfahren. Gleiches gilt für die transmittierte bzw. reflektierte Welle, deren Lauflänge bis zum Meßpunkt entsprechend berücksichtigt werden muß.

3.4.2 Energieverluste bei brechenden Wellen

Die Unterschiede im Verhalten brechender und nicht-brechender Wellen werden im Modell dadurch berücksichtigt, dass für die brechenden Wellen genau wie in den Modellversuchen beobachtet zusätzliche Mechanismen der Energiedissipation aktiviert werden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Welle über dem Riff bzw. schon im Bereich vor dem Riff bricht, wo sie auf den Turbulenzbereich des seeseitigen Ablösewirbels trifft. Letztendlich kommt es in der Brecherzunge im Bereich über dem Riff zur hochturbulenten Durchmischung von Luft und Wasser (Abb.15a), was letzten Endes die gesteigerte Energiedissipation herbeiführt. Während der seeseitige Wirbel sehr markant ist (insbesondere beim Fallbrecher), spielen die landseitigen Wirbel eine im Vergleich zum seeseitigen Wirbelsystem und zur Brecherzunge geringe Bedeutung in Bezug auf die Energiedissipation (Abb.15b).

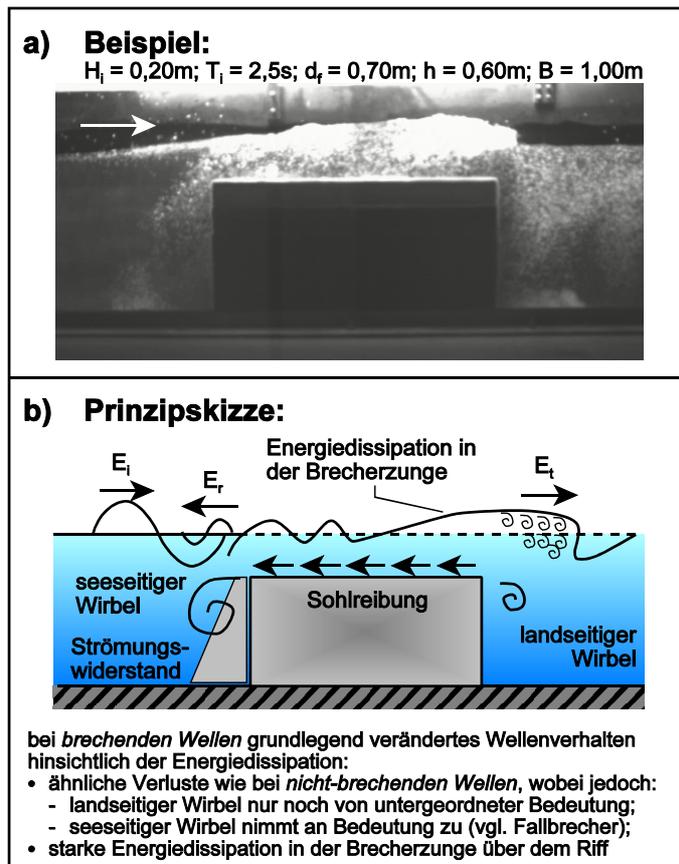


Abb. 15: Wellenverhalten brechender Wellen

Mit kleiner werdender Wassertiefe d_r über dem Riff nimmt die Intensität des durch das Wellenbrechen initiierten Schwall über der Riffkrone zu. Dieser erinnert dabei immer mehr an einen Wellenüberlaufschwaller, was er für ein aufgetauchtes Riff letztendlich auch ist. Die Energietransmission über das Riff geschieht nur noch in eine Richtung in Wellenfortschrittrichtung. Der Einfluß der Prozesse an der landseitigen Kante des Riffs geht zurück.

Im analytischen Modell erfolgt die Anpassung der Berechnungsalgorithmen entsprechend der beschriebenen Phänomene. Alle Mechanismen der Energiedissipation bei den nicht-brechenden Wellen bleiben prinzipiell erhalten. Dies gilt insbesondere für die Reibung und den Strömungswiderstand. Hinsichtlich des Energieverlustes durch Wirbelbildung wird dieser allerdings nur noch in den Koeffizienten für das reflektierte Wellensystem berücksichtigt, da der

landseitige Wirbel gegenüber den Energieverlusten im Brecherschwall in den Hintergrund tritt. Gl.41 reduziert sich zu:

$$D_{i,v}^{(*)} = D_i^{(*)} \quad (42)$$

und in Gl.40 ist bei der Berechnung des Beiwerts δ_{wirbel} nach Gl.34 in der Berechnung lediglich die kritische Wellenhöhe für das Wellenbrechen ($H_{\text{grenz}} = 0,66 \cdot d_r$) einzusetzen.

Wie beschrieben haben die an der Landseite des Riffs generierten Wellen keinerlei Auswirkung mehr auf das Geschehen auf der Seeseite. Im Gleichungssystem durch Nullsetzen der C_i^* in Gl.14 bzw. der C_i in Gl.15 erfaßt.

Der Energieverlust in der Brecherzunge selbst wird durch einen zusätzliche Dämpfungsfaktor δ_{brech} für die B_i^* bzw. B_i in Gl. 14 und 15 erfaßt:

$$B_{i,v,\text{brech}}^{(*)} = \delta_{\text{brech}}(x+B/2) \cdot B_{i,v}^{(*)} \quad (43).$$

Nach MUTTRAY et al. (2001) gilt für den Wellenhöhenverlauf nach dem Brechen, das in diesem Fall im Bereich der seeseitigen Riffkante geschieht, und damit für den Dämpfungsfaktor δ_{brech} :

$$\delta_{\text{brech}}(\Delta x) = \frac{H(x)}{H_{\text{crit}}(x)} = p + (1 - p) \cdot \exp\left(-0,15 \cdot \frac{\Delta x}{d(x)}\right) \quad (43)$$

mit: p - Anteil der kritischen Wellenhöhe, auf den die Welle bei unendlicher Lauflänge reduziert wird gemäß Gl. 44 [-],
 $d(x)$ - Wassertiefe als Funktion des Ortes [m],
 $H_{\text{crit}}(x)$ - kritische Wellenhöhe am Punkt x [m],
 Δx - Lauflänge nach dem Brechen [m].

MUTTRAY et al. (2001) ermitteln die kritische Wellenhöhe nach dem Ansatz von GODA (1975) und setzen den Prozentsatz dieser Wellenhöhe, auf den die Welle letztendlich durch den Brechvorgang reduziert wird, als konstant zu $p = 0,6$ an. Aus den beschriebenen Untersuchungen zum Wellenverhalten an künstlichen Riffen folgt die kritische Wellenhöhe zu $H_{\text{crit}} = 0,66 \cdot d_r$ (Gl.30). Zudem zeigt sich, dass ein variabler, von der bis jetzt in der Beschreibung des Wellenbrechens unberücksichtigten Wellensteilheit abhängiger Reduktionssatz wesentlich geeigneter für die Erfassung der vorliegenden Prozesse ist, da steilere Wellen stärker reduziert werden als flachere Wellen. Der Reduktionsfaktor p folgt zu:

$$p = 0,8 - H/L \quad (44).$$

3.5 Modellverifizierung und -überprüfung

Die Güte des vorgestellten, erweiterten analytischen Modells zeigt sich durch den Vergleich mit den Daten der beschriebenen Modellversuche (Abb.16). Bezüglich der Wellentransmission beträgt die Abweichung zwischen den Berechnungen und den Messungen $\sigma'_{\text{ct}} = 9,8\%$. Hinsichtlich der Energiedissipation ergibt sich die relative Standardabweichung bezüglich des Vergleichs zu $\sigma'_{\text{cd}} = 19,4\%$ und die Genauigkeit in der Erfassung des Reflexionsverhaltens beträgt $\sigma'_{\text{cr}} = 26,8\%$. Dabei ist die Güte des Modells für den Bereich der nicht-brechenden Wellen tendenziell zuverlässiger als für den Bereich der brechenden Wellen, was auf die zunehmende Abweichung von den ursprünglichen Annahmen der Linearen Wellentheorie zurückzuführen ist. Generell liegt die Genauigkeit aber im selben Bereich wie die Genauigkeit der von OUMERACI und BLECK (2001) für dieselben Versuche mit regelmäßigen Wellen hergeleiteten empirischen Beziehungen ($\sigma'_{\text{ct}} = 9,8\%$; $\sigma'_{\text{cr}} = 26,3\%$ und $\sigma'_{\text{cd}} = 21,6\%$).

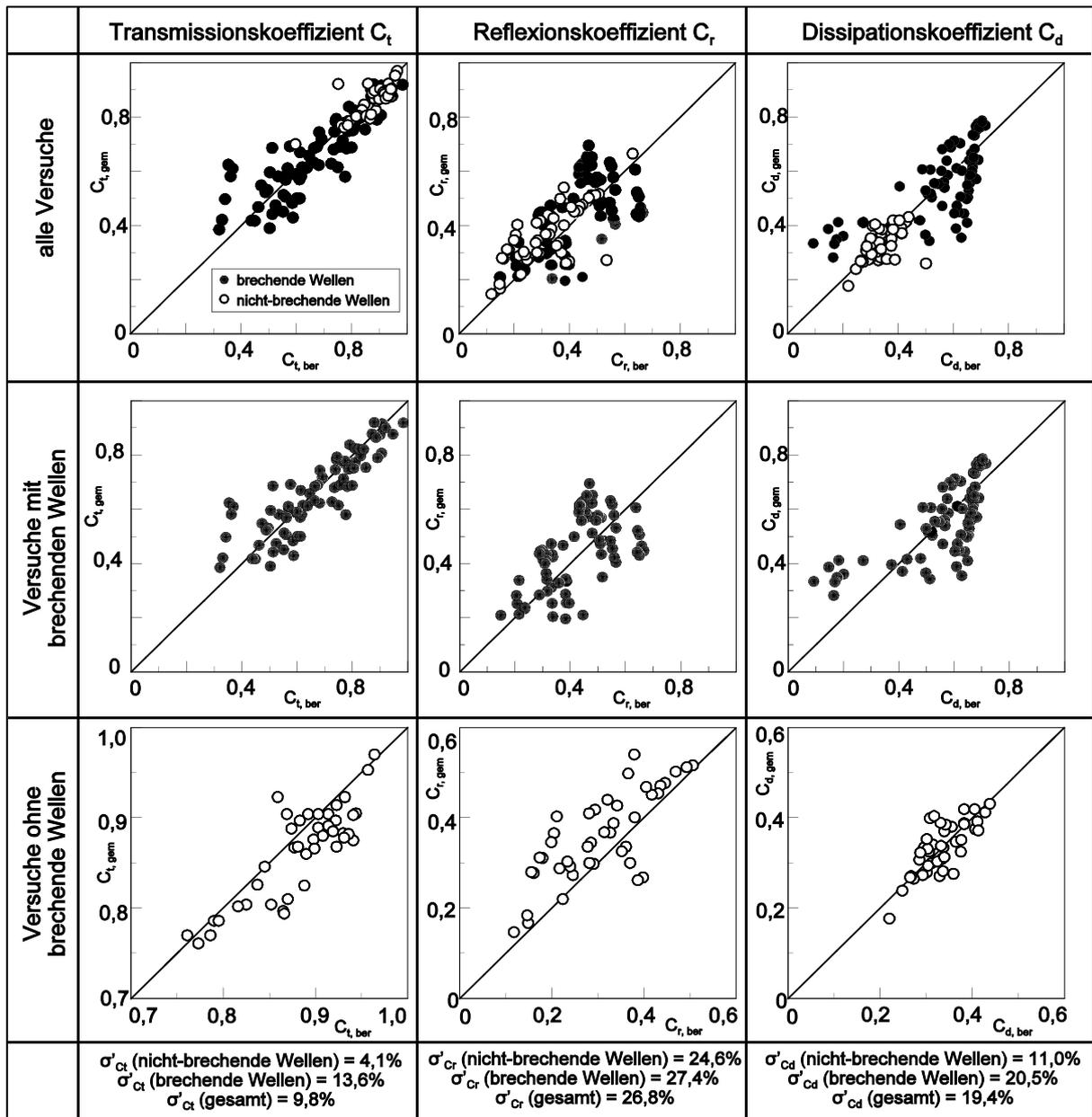


Abb. 16: Güte des entwickelten Modells unter Berücksichtigung aller Energieverluste

Die Anwendung des entwickelten Modells auf Versuche mit unregelmäßigem Seegang kann unter Verwendung der kennzeichnenden Welleparameter (H_{m0} und T_p bzw. T_{01} oder T_{-10}) als Eingangsgrößen für das Modell oder aber über eine mehrfache Anwendung des analytischen Modells auf die einzelnen Komponenten des Wellenspektrums (Gaussian-Random-Wave-Model; SOBEY, 1999) erfolgen. Die Güte entspricht dabei der für regelmäßige Wellen (BLECK; 2003)

Der Vorteil des analytischen Modells gegenüber empirischen Verfahren liegt darin, dass das Zusammenspiel der einzelnen Größen wesentlich besser erfaßt wird als mit den empirischen Bemessungsformeln. Zudem deckt das Modell eine wesentlich größere Parameterbandbreite ab, während eine Extrapolation eines empirischen Bemessungsansatzes außerhalb des ihm zugrundeliegenden Datenmaterials oftmals physikalisch sinnleere Ergebnisse liefert. Abb.17 zeigt

den Einfluss der einzelnen Parameter für das aufgestellte Modell, wohingegen Abb.18 die gleichen Daten in dimensionloser Darstellung enthält. Der Vorteil des analytischen Modells wird offensichtlich, da die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessen durch einen empirischen Ansatz mit dimensionslosen Größen nicht zu erfassen sind. Lediglich für die relative Wassertiefe ist ein den Erkenntnissen aus den Modellversuchen entsprechender Zusammenhang in Form einer Untergrenze für die Transmission ableitbar. Der in den beschriebenen Modellversuchen für die relative Wassertiefe d_r/H_i ermittelte klare Zusammenhang läßt sich auf die eingeschränkte Parameterbandbreite in den Modellversuchen erklären. Insbesondere die Rifflänge wurde dabei nur in einen kleinen Bereich variiert, so dass der Einfluss der beobachteten Resonanz nicht so stark zu erkennen ist.

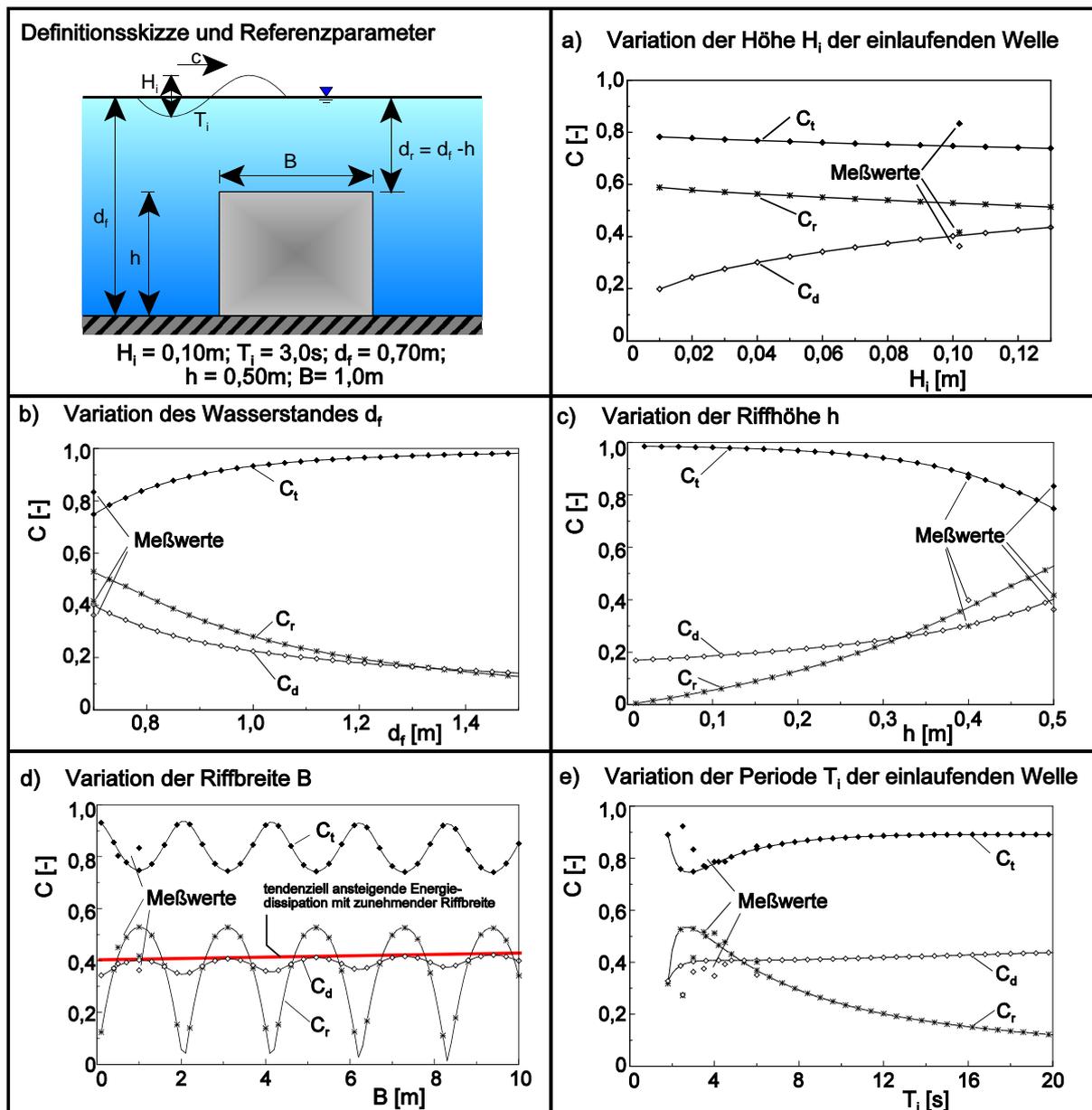


Abb. 17: Einfluß der einzelnen Parameter im analytischen Modell

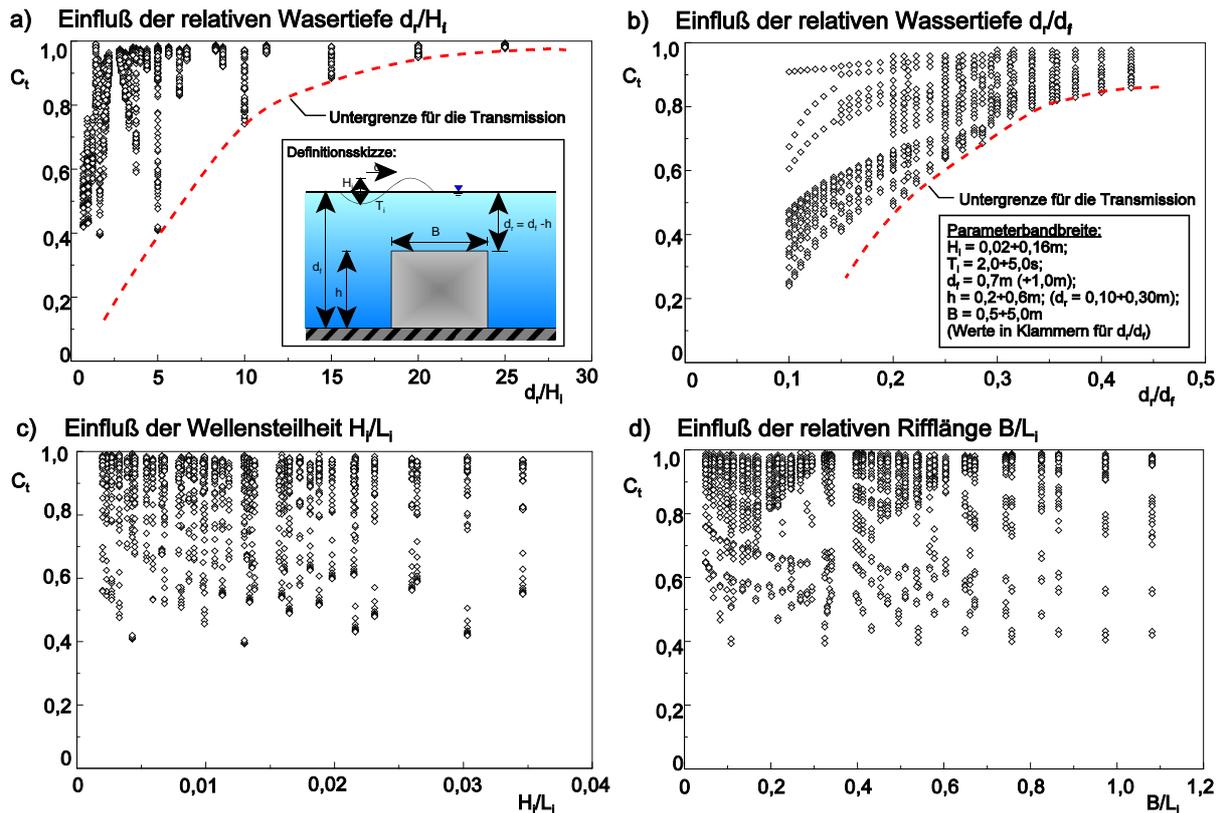


Abb. 18: Auswirkung dimensionsloser Parameter auf den Transmissionskoeffizienten C_t

4 Anwendungsbeispiel

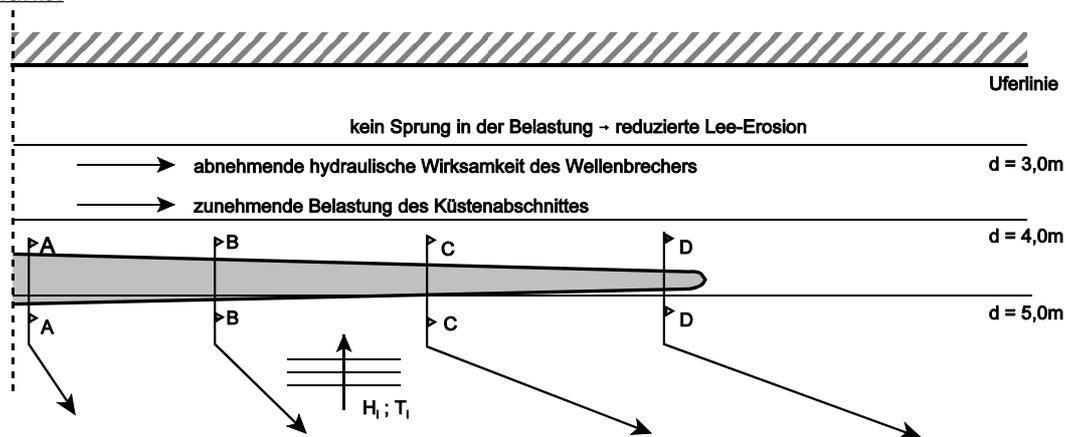
Hinsichtlich der Anwendung des Modells sei darauf hingewiesen, dass bei die Randbedingungen und Annahmen, die der Modellentwicklung zugrunde liegen, bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen sind. Das Modell kann allerdings auch unter Randbedingungen angewendet werden, die von den ursprünglich gemachten abweichen, jedoch nimmt die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse ab, je größer diese Abweichungen werden. Dies zeigt sich auch daran, dass die Güte des Modells im Vergleich mit den durchgeführten Versuchen für die Versuche mit nicht-brechenden Wellen besser ist als für die Versuche mit brechenden Wellen, bei denen die Annahmen der Linearen Wellentheorie weigt weniger erfüllt sind als bei den nicht-brechenden Wellen.

Die Riffabmessungen, Wasserstände und Wellenparameter bei den Berechnungen in den bisherigen Ausführungen zur Modellbildung orientierten sich an den beschriebenen Modellversuchen. Anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Baupraxis soll die Verwendung des entwickelten Modells für reale künstliche Riffe erläutert werden. Dabei wird auch auf die Anwendung auf weitere Geometrien wie z.B. geschüttete Wellenbrecher eingegangen und es werden weitere Hinweise zur Anwendung des Modells gegeben.

Geschüttete Wellenbrecher haben als Küstenlängswerke die Aufgabe, den hinter ihnen liegenden Küstenabschnitt vor Wellenbelastung zu schützen. In aufgetauchter Form schotten Wellenbrecher den betroffenen Küstenabschnitt fast vollständig vom einlaufenden Seegang ab, der nur durch poröses Wellenbrechermaterial oder aber durch Diffraktionseffekte in den Bereich hinter dem Wellenbrecher gelangen kann. Dies führt dazu, dass an den Enden des Wellenbrechers eine

sprunghafte Änderung der Seegangsbelastung auf die Küste erfolgt, die unerwünschte Erosionen hervorrufen kann. Eine Alternative ist die progressive Reduzierung der Kronenhöhe und des Querschnitts am Ende des Wellenbrechers, so dass der Wellenbrecher teilweise als künstliches Riff fungiert. Zusätzlich zum sanfteren Übergang in der Seegangsbelastung an der Küste hat dies den Vorteil, dass die konstruktiven Maßnahmen (z.B. größere Schüttsteine aufgrund der Rundung der Wellenbrecherflanke), die sonst an den Wellenbrecherköpfen anfallen, nicht so aufwendig sind. Dieses Konstruktionsprinzip wurde z.B. für die Wellenbrecher zum Schutz der Steilküste bei Lohme auf Rügen mit Erfolg eingesetzt (Ingenieurbüro Kaabe & Knaabe, persönliche Kommunikation). Abb.19 zeigt eine Prinzipskizze eines solchen Wellenbrechers, an dem im folgenden die Anwendung des entwickelten Modells demonstriert wird.

Grundriß:



Querschnitte:

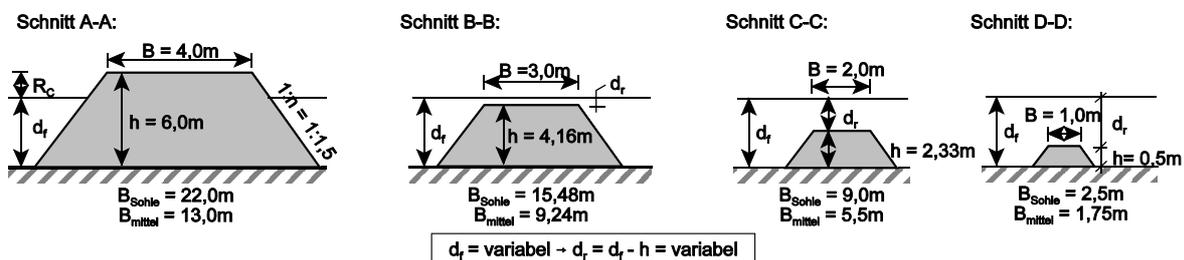


Abb. 19: Wellenbrecher mit sanft abfallender Krone (Prinzipskizze)

Der Kern des Wellenbrechers besteht aus feinkörnigerem Schüttsteinmaterial, so dass der Wellenbrecher als nahezu undurchlässig angesehen wird. Zudem ist die im unteren Wassertiefenbereich vorhandene Wellenenergie geringer als im Bereich über dem Riff, so dass die Energiedissipation im Riff die Energietransfer durch den Wellenbrecherkern aufwiegt. Zur Berücksichtigung der Böschungsneigung wird in der Berechnung eine mittlere Wellenbrecherbreite als Eingangsgröße für die Kronenbreite verwendet. Im vorliegenden Fall ergibt sich diese zu $B_{mittel} = 9,24\text{m}$. Für den Fall schrägen Wellenangriffs ist die Kronenbreite entsprechend der Lauflänge der Wellen über dem Wellenbrecher zu erhöhen. Bei nicht-brechenden Wellen müssen dabei Richtungsänderungen aufgrund von Refraktion beachtet werden.

Die Beispielrechnung wird für den Schnitt B-B durchgeführt, wobei ein Bemessungswasserstand von $d_r = 6,0\text{m}$ angesetzt wird. Die Wassertiefe über der Riffkrone ergibt sich damit zu $d_r = 1,84\text{m}$. Die Kenndaten für den Bemessungsseegang sind $H_s = 1,5\text{m}$ für die Höhe der einlaufenden Welle und $T_p = 7,0\text{s}$ für die zugehörige Wellenperiode. Für ein theoretisches TMA-Spektrum ergeben sich die "mittleren" Wellenperioden damit zu $T_{01} = 4,96\text{s}$ bzw.

$T_{-10} = 5,57s$. Die relative Wassertiefe über dem Riff ergibt sich mit diesen Daten zu $d_r/H_i = 1,23$ und dient als Eingangsparameter für eine Vorbemessung mit Hilfe der ermittelten empirischen Ansätze (vgl. Tab.3). Die Ergebnisse der Modellrechnung sind in Abb.20 dargestellt. Im Vergleich zu den Werten der empirischen Gleichungen werden die Transmission und die Reflexion mit dem analytischen Modell etwas größer errechnet (Tab.4). Die Werte des Modells liegen leicht auf der sicheren Seite, und es werden sämtliche Bedingungen für die Energieerhaltung erfüllt. Für die Verformung der Wellen bzw. des Spektrums (Periodenkoeffizienten) ist auf die empirischen Gleichungen zurückzugreifen.

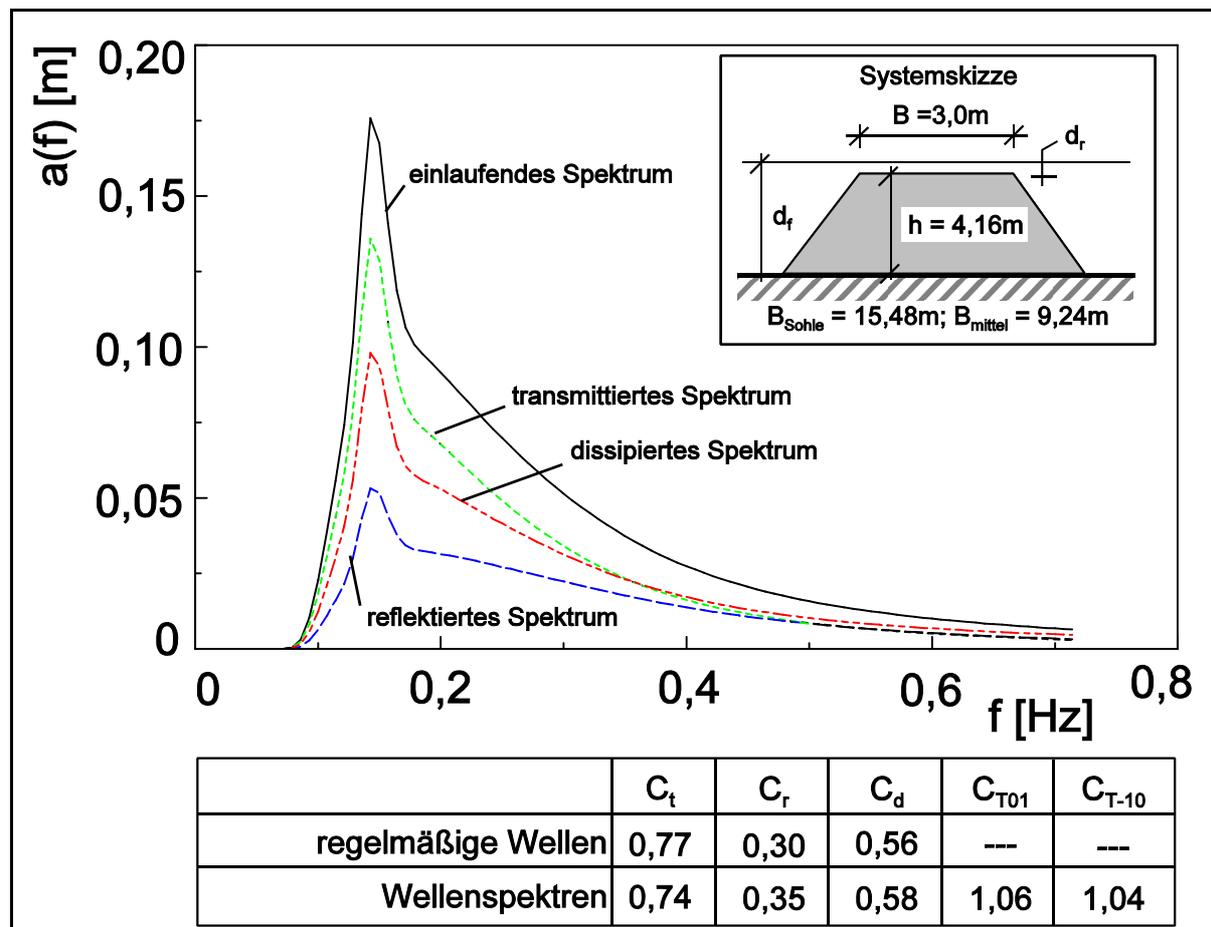


Abb. 20: Ergebnisse der Beispielrechnung

5 Zusammenfassung

Nach der Vorstellung einzelner Konzepte des sanften Küstenschutzes wird auf das Konzept der künstlichen Riffe näher eingegangen. Die verschiedensten Anwendungsmöglichkeiten künstlicher Riffe wurden vorgestellt. Neben der Ausnutzung der wellenbeeinflussenden Wirkung künstlicher Riffe im Küstenschutz aber auch zur Schaffung optimaler Surfbedingungen wurde näher auf die Schaffung zusätzlichen Lebensraums mit Hilfe künstlicher Riffe eingegangen. Die damit verbundenen Möglichkeiten zur Schaffung von Mehrzweckbauwerken wurden aufgezeigt.

Darauf aufbauend wurde ein neuentwickeltes analytisches Modell zur Beschreibung der hydraulischen Wirksamkeit künstlicher Riffe vorgestellt. In das Modell fließen neben den

theoretischen Grundlagen die Ergebnisse physikalischer Modellversuche mit ein, deren Ziel das Verständnis der am Riff ablaufenden Prozesse war. Im Rahmen dieser Versuche wurde erstmals ein Konzept zur Erfassung der Formänderung der Wellen am Riff entwickelt, das ebenso näher beschrieben wurde.

Nach eingehender Verifizierung des analytischen Modells durch den Vergleich der Ergebnisse mit den physikalischen Modellversuchen wurden dessen Anwendungsmöglichkeiten anhand eines Praxisbeispiels aufgezeigt. Dabei werden die Vorteile eines analytischen Modells offensichtlich, da im Gegensatz zu den bekannten empirischen Bemessungsverfahren die Wirkung der einzelnen Einflußgrößen unabhängig voneinander und entsprechen der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse berücksichtigt wird. Anhand des Anwendungsbeispiels werden die Grenzen und Möglichkeiten des Modells anschaulich aufgezeigt, wobei weitergehende Hinweise zur Anwendung des analytischen Modells aber auch zum Einsatz künstlicher Riffe gegeben werden.

Tab.3: Ergebnisse der empirischen Ansätze für das Anwendungsbeispiel

	Gl.	Koeffizient	Wellenhöhe bzw. -periode
Transmission	21	$C_t = 1,0 - 0,83 \cdot \exp[-0,72 \cdot d_r/H_i]$ $= 1,0 - 0,83 \cdot \exp[-0,72 \cdot 1,84/1,5] = 0,66$	$H_t = 0,66 \cdot 1,5 = 0,99\text{m}$
Reflexion	22	$C_r = 0,57 \cdot \exp[-0,23 \cdot d_r/H_i]$ $= 0,57 \cdot \exp[-0,23 \cdot 1,84/1,5] = 0,17$	$H_r = 0,17 \cdot 1,5 = 0,26\text{m}$
Dissipation	23	$C_d = 0,80 \cdot \exp[-0,27 \cdot d_r/H_i]$ $= 0,80 \cdot \exp[-0,27 \cdot 1,84/1,5] = 0,57$	“ H_d ” = $0,57 \cdot 1,5 = 0,86\text{m}$
Wellenperiode T_{01}	28	$C_{T01} = 1,0 - 0,36 \cdot \exp[-0,58 \cdot d_r/H_i]$ $= 1,0 - 0,36 \cdot \exp[-0,58 \cdot 1,84/1,5] = 0,82$	$T_{01,t} = 0,82 \cdot 4,96 = 4,07\text{s}$
Wellenperiode T_{-10}	29	$C_{T-10} = 1,0 - 0,24 \cdot \exp[-0,63 \cdot d_r/H_i]$ $= 1,0 - 0,24 \cdot \exp[-0,63 \cdot 1,84/1,5] = 0,89$	$T_{-10,t} = 0,89 \cdot 5,57 = 4,96\text{s}$

Tab.4: Ergebnisvergleich für das Anwendungsbeispiel

Berechnungsverfahren	C_t	C_r	C_d	C_{T01}	C_{-10}
empirische Ansätze (Abschnitt 3.3)	0,66	0,17	0,57	0,82	0,89
analytisches Modell (Lineare Wellentheorie)	0,74	0,35	0,58	1,06	1,04

6 Danksagung

Die physikalischen Modellversuche wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes „Hydraulische Wirksamkeit künstlicher Riffe unter besonderer Berücksichtigung des Energietransfers im Wellenspektrum“ (DFG OU-1/6-1) durchgeführt. Für diese finanzielle Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Das analytische Modell entstand im Rahmen meiner Doktorarbeit am Leichtweiß-Institut. Mein besonderer Dank gilt hier meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci für seine vielfältigen Anregungen und Unterstützung.

7 Quellenangaben

- Bleck, M. (2003) Hydraulische Wirksamkeit künstlicher Riffe am Beispiel einer rechteckigen Struktur. Dissertation am Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, veröffentlicht als elektronische Dissertation unter www.biblio.tu-bs.de.
- BLECK, M. und OUMERACI, H. (2002) Hydraulic Performance of Artificial Reefs: Global and Local Description. Proceedings International Conference Coastal Engineering, Cardiff, Wales, Vol. 2, S. 1778-1790.
- BLECK, M. und OUMERACI, H. (2001) Wave Damping and Spectral Evolution at Artificial Reefs. Proceedings 4th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. San Francisco, California, USA, Vol. 2, S. 1062-1071.
- BLECK, M. (1997) Hydraulische Wirksamkeit von „künstlichen Riffen“ für den Küstenschutz; Diplomarbeit Leichtweiß-Institut für Wasserbau.
- BOLLRICH, G. (1996) Technische Hydromechanik (4. Auflage). Verlag für Bauwesen, Berlin. (ISBN 3-345-00608-1).
- BRONSTEIN, I.N. und SEMENDJAJEW, K.A. (1989) Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt / Main.
- DEAN, W.R. (1945) On the Reflexion of Surface Waves by a Submerged Plane Barrier. Proceedings Cambridge Philosophic Society, S. 231-238.
- GERRITSEN, F. (1981) Wave Attenuation and Wave Set-Up on a Coastal Reef. Technical Report No. 48, Look Laboratory, University of Hawaii.
- GODA, Y. (1975) Irregular Wave Deformation in the Surf Zone. Coastal Engineering in Japan, Vol. 18.
- IJIMA, T. und SASAKI, T. (1971) A Theoretical Study on the Effects of Submerged Breakwater. Proceedings 18th Japanese Conference on Coastal Engineering (in japanisch), S. 141-147.
- ISAACSON, M.; PREMSIRI, S. und YANG, G. (1998) Wave Interactions with Vertical Slotted Barrier. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, No. 3, Vol. 124, pp.118-126.
- JACKSON, L.A., TOMLINSON, R., MCGRACH, J. und TURNER, I. (2002) Monitoring of a Multi Functional Submerged Geotextile Reef Breakwater. Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, Wales, Vol.2 pp. 1923-1935.
- JOCHEM, F.J. (1997) Trägerische Paradiese aus Menschenhand. MARE Magazin, Dezember.
- KEULEGAN, G.H. (1950 a) Wave Motion. in: "Engineering Hydraulics" edited by H. Rouse, J. Wiley & Sons, S. 711-768.
- KEULEGAN, G.H. (1950 b) The Gradual Damping of a Progressive Oscillatory Wave with Distance in a Prismatic Rectangular Chanel. National Bureau of Standards, Washington, D.C..
- KOETHER, G. (2002) Hydraulische Wirksamkeit getauchter Einzelfilter und Filtersysteme - Prozessbeschreibung und Modellbildung für ein innovatives Riffkonzept. Dissertation am Leichtweiß-Institut.
- KOHLHASE, S. (1999) Geokunststoff-Baukörper im Küstenschutz. Tagungsband zum ersten Geokunststoffkolloquium der Naue Fasertechnik, Espelkamp.
- MICHE, R. (1951) Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Annales Des Ponts et Chaussées, Vol. 114, S. 25, 131, 270, 369 ff..

- MUTTRAY, M.; OUMERACI, H. und BLECK, M. (2001) Uncertainties in the Prediction of Design Waves on Shallow Foreshores of Coastal Structures. Proceedings 4th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. San Francisco, California, USA, Vol. 2, S. 1663-1672.
- OUMERACI, H. (2001) Küsteningenieurwesen. in Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Herausgeber: K. Lecher, H.-P. Lühr und U.C.E. Zanke, Parey Buchverlag Berlin, S. 657-743.
- OUMERACI, H. und BLECK, M. (2001) Hydraulische Wirksamkeit künstlicher Riffe unter besonderer Berücksichtigung des Energietransfers im Wellenspektrum. LWI Bericht Nr. 863.
- QUIRK, C.; HEERTEN, G.; SAATHOFF, F. und STELLJES, K. (2001) Artificial offshore reef construction using innovative geotextile sand containers. Proceedings of the Conference on Coastlines, Structures and Breakwaters - London.
- SCHUHMACHER, H. (1996) Starthilfe für Künstliche Riffe. Spektrum der Wissenschaft 3, 66-73
- SCHÜTTRUMPF, H.; MÖLLER, J.; OUMERACI, H.; GRÜNE, J.; WEISSMANN, R. (2001) Effects of natural Sea States on Wave Overtopping of Seadikes. Proceedings 4th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. San Francisco, California, USA.
- SOBEY, R.J. (1999) Real Sea States. Lecture Notes, Advanced Short Course at Leichtweiß Institute.
- STIASSNIE, M.; NAHEER, E. und BOGUSLAVSKY, I. (1984) Energy Losses due to Vortex Shedding from the Lower Edge of a Vertical Plate Attacked by Surface Waves. Proceedings Royal Society A, London, Vol. 396, S. 131-142.
- TAKIKAWA, K., YAMADA, F. und MATSUMOTO, K. (1997) Internal Characteristics of Breaking Waves over Submerged Breakwaters. Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, Vol. 3, S. 192-199.
- URSELL, F. (1947) The Effect of a Fixed Vertical Barrier on Surface Waves in Deep Water. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 43, Part 1.