

Stephan Mai, Karl-Friedrich Daemrich, Claus Zimmermann

## Wellentransmission an Sommerdeichen

Wave transmission over submerged dikes

### Zusammenfassung

Zur Quantifizierung des Einflusses von Sommerdeichen auf den einlaufenden Seegang wurden im *Großen Wellenkanal* des *Forschungszentrums Küste* naturmaßstäbliche Versuche zur Seegangsausbreitung an einem Vorlandprofil mit und ohne Sommerdeich durchgeführt. Es zeigt sich, daß das Transmissionsverhalten gut durch eine Abhängigkeit vom relativen Freibord und der Wellensteilheit beschrieben wird. Numerische Modelle auf der Grundlage der Berechnung der Energieabnahme infolge Brechen nach Battjes/Janssen liefern gute Ergebnisse zur Beschreibung der Wellenhöhen bei Transmission an Sommerdeichen.

### Abstract

Experiments on wave transmission over submerged dikes were carried out at prototype scale in the wave flume *Großer Wellenkanal* of the *Forschungszentrum Küste*. Wave propagation along a characteristic foreland profile with and without an submerged dike was determined. Transmission can be described satisfactorily by an empirical formula depending on the relative freeboard and the wave steepness. Numerical models on the basis of energy decrease due to breaking according to Battjes/Janssen give good results comparing computed and measured wave heights.

### 1 Einführung

Sommerdeiche sind dem Hauptdeich vorgelagerte Deiche mit einer Kronenhöhe von etwa  $Thw + 2$  m. Sie sind mit seeseitigen Böschungsneigungen von 1:7 (bis 1:12) und landseitigen Böschungsneigungen von 1:5 (bis 1:10) den besonderen Beanspruchungen durch das Überströmen bei Sturmfluten angepaßt. Neben einer vor Sommersturmfluten sicheren Vorlandnutzung wird durch den Sommerdeich während leichter und mittlerer Sturmfluten die Ablagerung von Teek bzw. Treibsel am Hauptdeich verhindert und die Pflege und Entwässerung des Sommerpolders und des Deichfußes begünstigt (Erchinger, 1993). Daneben kann der Sommerdeich bei schweren Sturmfluten als undurchlässiger Unterwasserwellenbrecher wirken und so bei entsprechenden Wellen- und Wasserstandsbedingungen zu einer Reduzierung der Wellenhöhen am Deichfuß des Hauptdeichs und damit des Wellenaufbaus und der Wellenkräfte am Hauptdeich führen. Dies wird an der

niedersächsischen Küste bei der Bemessung der erforderlichen Kronenhöhe der Hauptdeiche teilweise berücksichtigt.

Zur Wiederherstellung von Salzwiesen im Bereich der Sommerpolder wird derzeit eine Öffnung von Sommerdeichen diskutiert und z.B. durch den WWF (1995) gefordert. Als Öffnungsvarianten werden u.a. die teilweise oder vollständige Schleifung von Sommerdeichen in Betracht gezogen. Um vor allem die Änderung der Wellenbelastung auf den Hauptdeich abschätzen zu können, erfordert dies die Quantifizierung der seegangsdämpfenden Wirkung des vorhandenen Sommerdeiches.

Nach Erchinger (1974) zeigen Untersuchungen zur Seegangsdämpfung von Sommerdeichen durch Einmessungen der Teekgrenze an Nordseedeichen nach Sturmfluten eine deutliche Verringerung des Wellenaufbaus am Hauptdeich. Eine Ermittlung der Transmissionskoeffizienten von Sommerdeichen in Abhängigkeit vom Eingangsseegang und Wasserstand durch Messungen ist bisher weder in der Natur noch im Wellenkanal erfolgt. Auch die Ergebnisse zur Wellentransmission an Unterwasserwellenbrechern, welche u.a. von Daemrich et al. (1985), van der Meer et al. (1991) und d'Angremond et al. (1996) veröffentlicht wurden, eignen sich aufgrund der steileren Böschungsneigungen von 1:1 bis 1:4 und ihrer teilweisen Durchlässigkeit nicht ohne ergänzende Untersuchungen für flach geböschte, undurchlässige Sommerdeiche, insbesondere bei relativ hohen Wasserständen.

Im *Großen Wellenkanal* des *Forschungszentrums Küste* an der *Universität Hannover* wurden daher durch das *Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen* naturmaßstäbliche Untersuchungen zur Seegangsumwandlung entlang eines Vorlandprofils mit und ohne Sommerdeich durchgeführt.

### 2 Grundlagen und Methodik

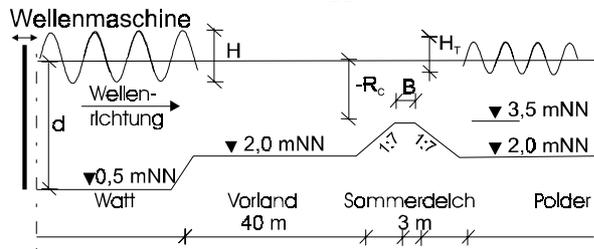
#### 2.1 Grundlagen

Die Transmission von Wellen in den Schutzbereich eines Sommerdeiches wird durch die Reflexion der Wellen, durch Reibungs- und Turbulenzeinflüsse

am Bauwerk und durch das Brechen der Wellen beeinflusst.

Der die Abminderung der Wellen beschreibende Transmissionskoeffizient  $c_T$  ist definiert als das Verhältnis der Wellenhöhe im Transmissionsbereich  $H_T$  zur Ausgangswellenhöhe  $H$  (Bild 1):

$$c_T = \frac{H_T}{H} \quad (1)$$



**Bild 1** Wellentransmission an einem Sommerdeich

Der Reflexionskoeffizient  $c_R$  entspricht dem Verhältnis von reflektierter Wellenhöhe  $H_R$  vor dem Sommerdeich und Ausgangswellenhöhe:

$$c_R = \frac{H_R}{H} \quad (2)$$

Neben  $c_T$  und  $c_R$  wird der Verlustkoeffizient  $c_V$ , welcher den Verlust an Wellenhöhe durch Brechen der Wellen über dem Sommerdeich und Reibungsverluste beschreibt, als Verhältnis von Verlustwellenhöhe  $H_V$  zur Ausgangswellenhöhe  $H$  verwendet:

$$c_V = \frac{H_V}{H} \quad (3)$$

Aufgrund der Energieerhaltung genügen die Koeffizienten  $c_T$ ,  $c_R$  und  $c_V$  der folgenden Beziehung:

$$c_T^2 + c_R^2 + c_V^2 = 1 \quad (4)$$

In unregelmäßigem Seegang werden die Koeffizienten  $c_T$ ,  $c_V$  und  $c_R$  üblicherweise aus charakteristischen Wellenhöhen, z.B.  $H_S$  oder  $H_{1/10}$ , berechnet.

Die wichtigsten Einflußgrößen auf die Dämpfungswirkung eines Unterwasserwellenbrechers sind der relative Freibord  $R_c/H$ , die relative Kronenbreite  $B/H$ , die Wellensteilheit  $H/L$  und die Neigung des Bauwerks  $\alpha$ .

Für undurchlässige Wellenbrecher großer Böschungsneigung ( $\tan(\alpha) > 1:4$ ) geben d'Angremond et al. (1996) für den Transmissionskoeffizienten bei unregelmäßigem Seegang unter Verwendung der Iribarren-Zahl  $\xi = \tan(\alpha)/(H/L)^{0,5}$  folgenden Zusammenhang an:

$$c_T = -\beta_1 \frac{R_c}{H_S} + \beta_2 \cdot \left( \frac{B}{H_S} \right)^{-\beta_3} \cdot (1 - e^{-\beta_4 \xi})$$

für  $0,075 < c_T < 0,80$ . (5)

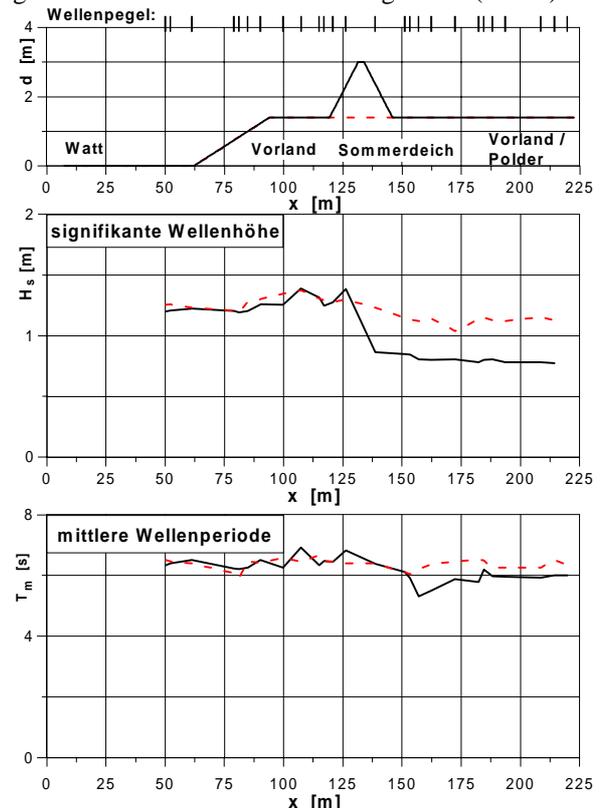
Für die Parameter  $\beta_i$  gilt nach d'Angremond et al.(1996):  $\beta_1 = 0,4$ ,  $\beta_2 = 0,8$ ,  $\beta_3 = 0,31$ ,  $\beta_4 = 0,5$ .

Neben einer Veränderung der Wellenhöhe kann bei unregelmäßigem Seegang (im Gegensatz zu regelmäßigem Seegang) durch nicht-lineare Prozesse bei der Transmission an Unterwasserwellenbrechern eine Veränderung der mittleren Wellenperiode  $T_m$  bzw. der Peak-Periode  $T_p$  auftreten. Für die Beurteilung des Wellenaufbaus am Hauptdeich hinter Sommerdeichen ist dies ebenfalls zu berücksichtigen. Die Änderung der Wellenperiode läßt sich durch das Verhältnis  $r_T$  von transmittierter Periode ( $T_T$ ) und der Periode der Ausgangswelle ( $T$ ) beschreiben:

$$r_T = \frac{T_T}{T} \quad (6)$$

## 2.2 Modellaufbau und Versuche

Die Modellversuche wurden im Maßstab 1:1 mit einem für die niedersächsische Küste charakteristischen Vorlandprofil mit und ohne Sommerdeich im *Großen Wellenkanal* des *Forschungszentrums Küste*, Hannover, durchgeführt. Die Wattöhe wurde mit 0,5 mNN (entspricht: Kanalsohle  $d = 0$  m), die Vorlandhöhe mit 2,0 mNN und die gesamte Vorlandbreite mit 200 m gewählt (Bild 2).



**Bild 2** Vorlandprofil mit und ohne Sommerdeich (oben); Veränderung von signifikanter Wellenhöhe (mitte) und mittlerer Wellenperiode (unten); gestrichelt: nur Vorland, durchgezogen: Vorland mit Sommerdeich; Wasserstand:  $d = 4,5$  mNN = 4 m ü. Kanalsohle (KS); Eingangsseegang:  $H_S = 1,2$  m und  $T_p = 8$  s

Der Sommerdeich wurde mit einer Kronenhöhe von 3,5 mNN und Böschungsneigungen von  $\tan(\alpha)=1:7$  in etwa 50 m Entfernung von der Vorlandkante eingebaut (Bild 2, oben). Die Erosionssicherung des als Sandkern ausgeführten Sommerdeiches wurde durch eine mit einem COLCRETE-SOLIDUR-Erdbaustoff gefüllte COLCRETE-Standardmatte (Hackmann und Roemisch, 1996) mit zwei Entlüftungskammern erreicht (Bild 3).



**Bild 3** Blick auf das im *Großen Wellenkanal* eingebaute Modell des Sommerdeichs

Die Wasserspiegelauslenkungen wurden durch 27 über die Kanallänge angeordnete Wellenpegel (Bild 2, oben) gemessen. Die Randbedingungen des Eingangsseegangs, signifikante Wellenhöhe  $H_S$  (0,6 m bis 1,2 m), Peakperiode  $T_P$  (3,5 s bis 8,0 s) und Wasserstand  $d$  (3,5 mNN bis 5 mNN), wurden in einem für die niedersächsische Festlandküste typischen Rahmen variiert. Insgesamt wurden für jeden Profiltyp 45 Versuche durchgeführt. Die Dauer eines Versuches betrug das zwei- bis dreihundertfache der Peakperiode des eingesteuerten Seegangs.

Bild 2 zeigt beispielhaft die Veränderung der signifikanten Wellenhöhe (mitte) und der mittleren Periode (unten) entlang der verschiedenen Profile bei einem Wasserstand von  $d = 4$  mNN und einem Eingangsseegang mit  $H_S = 1,2$  m und  $T_P = 8$  s. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der signifikanten Wellenhöhe unmittelbar am Sommerdeich auf 0,8 m, während ein Vorland ohne Sommerdeich hier zu keiner ausgeprägten Abminderung führt. Die mittlere Periode nimmt für die dargestellten Randbedingungen bei der Transmission am Sommerdeich nur schwach (um 6%) ab und bleibt für das Vorland-Profil annähernd konstant.

### 2.3 Auswerteverfahren

Für die beiden Profiltypen wurden aus den signifikanten Wellenhöhen am Profilbeginn (Profilkoordinate  $x = 40$  m bis 70 m) und am Profilende ( $x = 170$  bis 200 m) die Transmissionskoeffizienten für Vorland  $c_{T,V}$  und für die Kombination von Vorland und Sommerdeich  $c_{T,V+S}$  nach Gl. (1) berechnet. Die Veränderung der Wellenverhältnisse durch die Wirkung des Sommerdeiches wird durch den folgenden Transmissionskoeffizienten beschrieben:

$$c_{T,S} = \frac{c_{T,V+S}}{c_{T,V}} \quad (6)$$

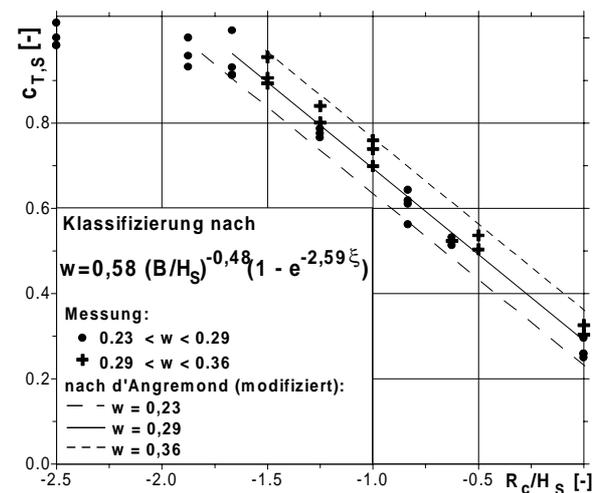
Daneben wurde das Periodenverhältnis  $r_T$  bzgl. der mittleren Wellenperiode ermittelt.

## 3 Ergebnisse zur Wellentransmission

### 3.1 Analyse der Meßergebnisse

#### 3.1.1 Wellenhöhe

Der Transmissionskoeffizient  $c_{T,S}$  für die signifikante Wellenhöhe ist in Abhängigkeit von der relativen Freibordhöhe  $R_c/H_S$  in Bild 4 dargestellt und zeigt den erwarteten Anstieg des Transmissionskoeffizienten mit wachsender relativer Überströmungshöhe bzw. abnehmender relativer Freibordhöhe. Bei einem relativen Freibord von etwa  $R_c/H_S \leq -2,4$  verschwindet die seegangsdämpfende Wirkung des Sommerdeiches, d.h.  $c_{T,S} \rightarrow 1$ .



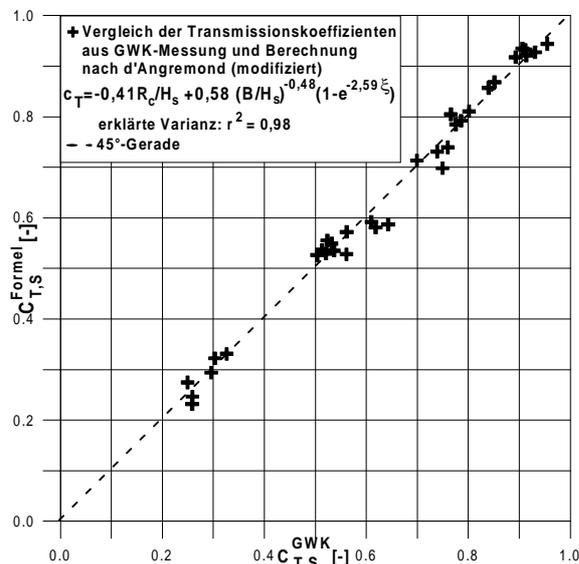
**Bild 4** Transmissionskoeffizient  $c_{T,S}$  des Sommerdeiches als Funktion der relativen Freibordhöhe  $R_c/H_S$

Die Abhängigkeit des Transmissionskoeffizienten von relativer Kronenbreite und Iribarren-Zahl ist durch eine Klassifizierung nach dem Parameter

$$w = +\beta_2 \cdot \left( \frac{B}{H_s} \right)^{-\beta_3} \cdot (1 - e^{-\beta_4 \xi})$$

in Bild 4 dargestellt. Die Transmission nimmt mit Ansteigen des Parameters  $w$ , d.h. abnehmender relativer Kronenbreite bzw. zunehmender Iribarren-Zahl, zu.

Der in Formel (5) dargestellte Ansatz zur Beschreibung des Transmissionsverhaltens von Unterwasserwellenbrechern ist für Transmissionskoeffizienten  $c_{T,S} \leq 0,95$  durch Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate gut an die Messungen anzupassen (Bild 5). Die beste Übereinstimmung wird für die Parameter  $\beta_1 = 0,41$ ,  $\beta_2 = 0,58$ ,  $\beta_3 = 0,48$  und  $\beta_4 = 2,59$  mit einer erklärten Varianz von  $r^2 = 0,98$  erreicht.

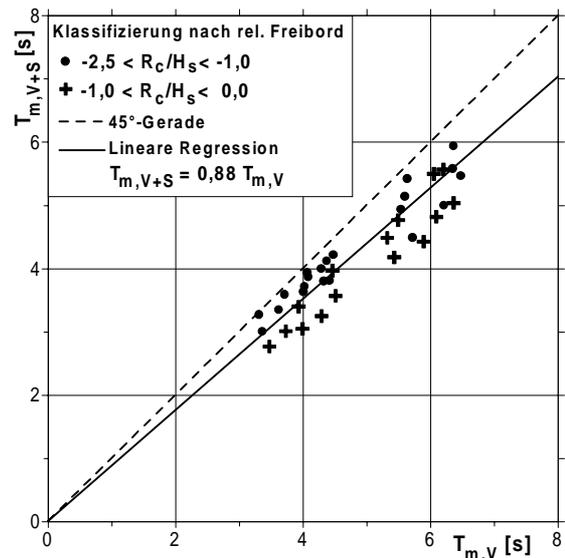


**Bild 5** Vergleich der gemessenen Transmissionskoeffizienten an Sommerdeichen mit der modifizierten Formel von d'Angremond et al. (1996)

### 3.1.2 Wellenperiode

Die mittlere Wellenperiode  $T_m$  auf dem durch den Sommerdeich geschützten Vorland ist um durchschnittlich 12% geringer als die Wellenperiode auf dem Vorland ohne Sommerdeich (Bild 6).

Die Verminderung der mittleren Periode am Profilende durch einen Sommerdeich ist um so größer, je kleiner die relative Überströmung bzw. je größer das relative Freibord  $R_c/H_s$  ist (Bild 6). Ebenso wird das Periodenverhältnis  $r_T$  bei Vorliegen eines Sommerdeiches mit größer werdendem Freibord kleiner.



**Bild 6** Mittlere Wellenperiode für ein Vorland ohne Sommerdeich ( $T_{m,V}$ ) und mit Sommerdeich ( $T_{m,V+S}$ )

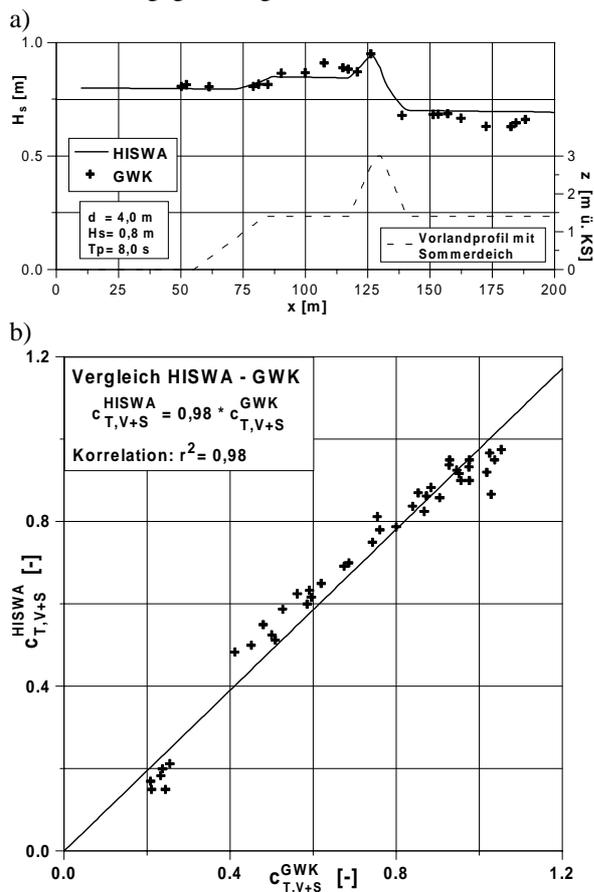
### 3.2 Numerische Simulation

Die Wirkung des Systems Vorland-Sommerdeich ist auch von der Vorlandmorphologie abhängig. Um die Ergebnisse auf Küstenabschnitte mit anderen Vorlandhöhen und -breiten übertragen zu können, wurde auf der Grundlage der Versuche im Wellenkanal das numerische Seegangmodell HISWA - *Hindcast Shallow Water Wave* (Booij et al., 1985) - angepaßt und kalibriert.

HISWA nutzt zur Berechnung der Seegangausbreitung das Prinzip der Impulserhaltung und berücksichtigt die Prozesse Refraktion, Shoaling, Wellenbrechen, Boden-/ Pflanzenreibung und die Windwirkung. Für die Seegangsdämpfung durch Vorland und Sommerdeich ist der Prozeß der Bodenreibung, des Shoaling und des Wellenbrechens maßgebend.

Durch Anpassung des Modellparameters  $c_{fw}$  zur Beschreibung der Bodenreibung nach Putnam und Johnson (1949), der Modellparameter  $\gamma_s$  (Grenzwellenhöhe =  $H_{max}/d$ ) und  $\gamma_d$  (Grenzsteilheit =  $H_{max}/L$ ) sowie  $\alpha$  als Parameter zur Berechnung des Energieverlustes infolge Wellenbrechen nach Battjes und Janssen (1979) konnte eine gute Übereinstimmung der Messungen im Wellenkanal mit den Ergebnissen der numerischen Simulation erreicht werden. Bild 7a zeigt einen Vergleich der Seegangssimulation und der Meßergebnisse bei einem Wasserstand von 4 m ü. KS und einem Eingangsseegang mit  $H_s = 1,2$  m und  $T_p = 8$  s. Unter Berücksichtigung sämtlicher Versuche sind die aus den Messungen ermittelten Transmissions-

koeffizienten in Bild 7b den mit HISWA berechneten gegenübergestellt.



**Bild 7** Vergleich von Messung (GWK) und Seegangssimulation (HISWA):

- a) Veränderung der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  am Sommerdeich ( $d = 4,0$  m ü. KS,  $H_s = 0,8$  m,  $T_p = 8,0$  s)
- b) Korrelation der Transmissionskoeffizienten  $c_T$  GWK / Simulation

### 3.3 Bewertung

Das Transmissionsverhalten von Sommerdeichen ist abhängig vom relativen Freibord, der relativen Kronenbreite und der Iribarren-Zahl.

Ist der Seegang über dem Watt begrenzt durch die Wassertiefe, so wird am Sommerdeich die Wellenhöhe wesentlich vermindert. Der zusätzliche Einfluß des Sommerdeiches auf die Wellenhöhe ist im Vergleich zur Wirkung des Vorlandes um so größer, je kleiner die Vorlandhöhe im Vergleich zur Kronenhöhe des Sommerdeiches ist.

Ist der Seegang über dem Watt nicht wassertiefenbegrenzt, z.B. im Schutzbereich vorgelagerter Inseln, so findet eine Verminderung der Wellenhöhe am Sommerdeich nur statt, wenn für den relativen Freibord etwa gilt  $R_C/H_S > -2,4$ . Für einen relativen Freibord von  $R_C/H_S > -1,0$  ergibt

sich eine Verminderung der Wellenhöhe von mehr als 20%.

Von großer Bedeutung für den Wellenauflauf am Hauptdeich ist die an einem Vorland mit Sommerdeich auftretende Verminderung der mittleren Wellenperiode. Für einen relativen Freibord  $R_C/H_S > -1,0$  beträgt die Verminderung der mittleren Wellenperiode mehr als 12 %.

Der Wellenauflauf ( $R \propto T_p H_S^{0,5}$ ) wird durch den Sommerdeich bei  $R_C/H_S > -1,0$  damit um mehr als 20 % reduziert, sofern über dem Vorland hinter dem Sommerdeich keine Zunahme der Wellenhöhe durch den lokalen Wind auftritt. Bei der Anordnung von Sommerdeichen ist daher zur Ausnutzung des vollen Effektes der Seegangs-dämpfung die Polderbreite nicht zu groß zu wählen.

### 4 Zusammenfassung

Zur quantitativen Beschreibung des Einflusses von Sommerdeichen auf den einlaufenden Seegang wurden im Großen Wellenkanal naturmaßstäbliche Untersuchungen durchgeführt. Die Abnahme der Wellenhöhe läßt sich gut unter Verwendung einer modifizierten Formel nach d'Angremond et al. (1996) für undurchlässige Unterwasserwellenbrecher als Funktion des relativen Freibords, der relativen Kronenbreite und der Iribarren-Zahl beschreiben. Am Sommerdeich tritt außerdem in Abhängigkeit von dem relativen Freibord eine Verminderung der mittleren Wellenperiode ein. Bei einem relativen Freibord von etwa  $R_C/H_S < -2,4$ , d.h. die Wassertiefe über dem Sommerdeich ist größer als das 2,4-fache der signifikanten Wellenhöhe, ist der Einfluß des Sommerdeiches auf den Seegang zu vernachlässigen.

Die Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche werden gut durch das numerische Modell HISWA auf der Grundlage der Berechnung der Energieabnahme infolge Brechen nach Battjes / Janssen (1979) nach Kalibrierung abgebildet, so daß eine Abschätzung der Wirkung von Sommerdeichen auch für geänderte Vorlandmorphologien möglich ist.

### Literatur

- 1 d'Angremond, K.; van der Meer, J.W.; De Jong, R.J.: Wave Transmission at Low-Crested Structures, Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, 1996.
- 2 Battjes, J.A.; Janssen, J.P.F.M.: Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves, Proc. 16th Int. Coastal Engineering Conf., 1979

- 3 Booij, N.; Holthuijsen, L.H.; Herbers, T.H.C.: The shallow water wave hindcast model HISWA, physical and numerical background, Delft University, Faculty of Civil Engineering, Department Hydraulic Engineering, Bericht 6, 1985
- 4 Daemrich, K.-F.; Kahle, W.; Partenscky, H.-W.: Schutzwirkung von Unterwasserwellenbrechern unter dem Einfluß unregelmäßiger Seegangswellen, Mitteilungen des Franzius-Instituts, H. 61, 1985.
- 5 Erchinger, H.F.: Wellenmessungen an Seedeichen, Naturmessungen an der ostfriesischen Küste, Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, H. 41, 1974.
- 6 Erchinger, H.F.: Küsteningenieurwesen, aus Taschenbuch der Wasserwirtschaft, herausgegeben von H. Bretschneider, K. Lecher, M. Schmidt, 1993
- 7 Hackmann, G.; Römisch, K.: Die COLCRETE-Matte und die verklammerte Steinschüttung, HANSA 8/1996
- 8 Putnam, J.A.; Johnson, J.W.: The dissipation of wave energy by bottom friction, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 30, 1949
- 9 van der Meer, J.W.; d' Angremond, K.: Wave Transmission at Low-Crested Structures, Proc. Conf. on Coastal Structures and Breakwaters, ICE, London, 1991
- 10 WWF: Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer, 10 Forderungen zur weiteren Entwicklung, Wattenmeer International, 4/1995

#### **Anschriften der Verfasser**

Wiss. Angestellter Dipl.-Phys. Stephan Mai,  
E-Mail: smai@fi.uni-hannover.de  
Akad. Oberrat Dr.-Ing. Karl-Friedrich Daemrich,  
E-Mail: daekf@fi.uni-hannover.de  
Prof. Dr.-Ing. Claus Zimmermann,  
E-Mail: zi@fi.uni-hannover.de  
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Nienburger Str. 4, 30167 Hannover