

# WELLENÜBERLAUF AN SENKRECHTEN UND STEIL GENEIGTEN WELLENBRECHERN

von

Zeya Wang<sup>1</sup>  
Joachim Grüne<sup>2</sup>

## ABSTRACT

In the paper large-scale laboratory experiments on violent wave overtopping on vertical and inclined walls are presented, recently performed in the Large Wave Channel (GWK) of the Coastal Research Centre (FZK) in Hanover, Germany. The model set-up and measuring equipment as well as the performance of the tests are described. First results for the mean discharge volumes are presented and discussed.

## 1. EINLEITUNG

Ein starker Wellenüberlauf muss an Wellenbrechern nicht notwendigerweise Beschädigungen verursachen, aber es besteht immer eine potentielle Gefahr für Personen, Anlagen und Material hinter dem Wellenbrecher. Außerdem haben die Überlaufmengen einen wichtigen Einfluss auf die Wirksamkeit solcher Bauwerke, die Teil eines Küstenschutzwerk gegen Überschwemmung sind. Daher ist die Überlaufmenge neben der Stabilität ein wichtiges Entwurfskriterium für Wellenbrecher.

Es gibt einige Ergebnisse zum Wellenüberlauf aus kleinmaßstäblichen Untersuchungen, Ergebnisse aus Naturmessungen oder aus großmaßstäblichen Laborversuchen sind dagegen selten. Um die Überlaufmengen möglichst genau vorauszusagen, besteht eine große Nachfrage nach solchen Daten, da Ergebnisse aus kleinmaßstäblichen Modellen mehr oder weniger durch Maßstabeffekte infolge des hohen Lufteintrags in den brechenden Wellen bzw. in dem sich nach oben ausbildendem Wasserstrahl beeinflusst werden. In diesem Bericht werden erste Ergebnisse aus großmaßstäblichen Untersuchungen im GWK mit einem vertikalen und geneigten Wellenbrecher dargestellt.

## 2. MODELLAUFBAU UND MESSGERÄTE

Die großmaßstäblichen Laboruntersuchungen wurden im Großen Wellenkanal (GWK) durchgeführt, der die folgenden Dimension hat: Länge 309 m, Breite 5m und Tiefe 7m. Ein Querschnitt des Modellaufbaus im GWK zeigt Abb. 1. Der Caisson-Wellenbrecher wurde

---

<sup>1</sup> M.-Ing., Forschungszentrum Küste, Merkurstrasse 11, 30419 Hannover

<sup>2</sup> Dipl.-Ing., Betriebsleiter, Forschungszentrum Küste, Merkurstrasse 11, 30419 Hannover

auf einem Kiesbett mit einer geneigten Böschung errichtet. Die Böschung wurde mit Schüttsteinen bedeckt, zwischen den Schüttsteinen und dem Kiesbett wurde ein geotextiles Filter eingebaut. Die Oberkante der Schüttsteindeckschicht unmittelbar vor der Vorderseite des Wellenbrechers erreichte eine Höhe von 2,85 m über der Kanalsole.

Es wurden zwei unterschiedliche Neigungen für die vordere Wand des Caissonwellenbrechers untersucht: eine vertikale Wand (linker Teil in Abb. 2) und eine um  $27^\circ$  gegen die Senkrechte geneigte Wand (rechter Teil in Abb. 2). Weiterhin wurden zwei unterschiedliche Kronenhöhen untersucht (+ 5,98 m und + 6,46 m an der vertikalen Wand und + 5,99 m und + 6,64 m an der geneigten Wand). Für die Tests wurde die Wassertiefe zwischen 3,75 m bis 5,0 m über der Kanalsole in Schritten von 0,25 m variiert.

Die Untersuchungen wurden in Kooperation mit dem Projekt BWIMCOST aus Großbritannien durchgeführt, in dem die Wirkung des seegangserzeugten Druckschlags auf Küstenbauwerke untersucht wird (Obhrai et. al. 2004): Das Model mit der geneigten

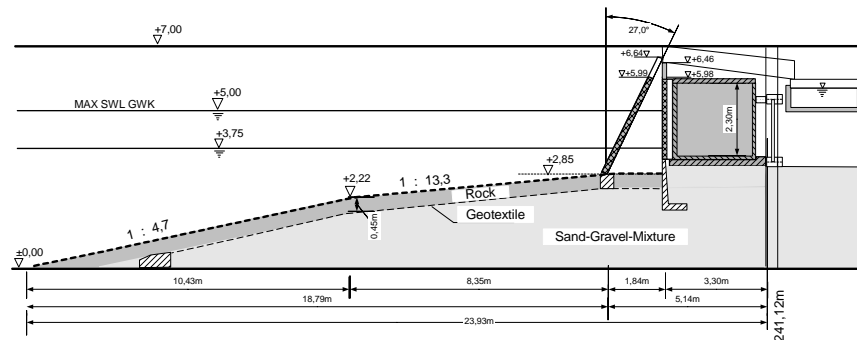


Abb. 1: Längsschnitt des Versuchsaufbaus mit dem vertikalen und geneigten Wellenbrecher im GWK



Abb. 2: Wellenbrecher mit vertikaler Wand (links) und geneigter Wand (rechts)

vorderen Wand einschließlich der davor liegenden Schüttsteinböschung entspricht dem Profil des Wellenbrechers auf der britischen Kanalinsel Alderney, an dem Feldmessungen auf Wellenschlagdruck von der BWIMCOST-Gruppe durchgeführt werden

Die Messeinrichtung bestand aus einer Reihe von Sensoren und Geräten, um die folgenden relevanten Wellenüberlaufdaten zu erfassen:

- Wellenüberlaufmengen, die durch eine 0,34 m breite Zulaufrinne von der Oberkante der Vorderseite der Caissonwand in den Wägebälter hinter dem Wellenbrecher geleitet werden (Abb. 3 und 4).
- Wasseroberflächenauslenkungen, direkt an der vorderen Wand mit einem Drahtwellenpegel bis 1,25 m oberhalb der Caisson-Oberkante (Abb. 3).
- Charakteristik der Wellen und des Wellenüberlaufs (z.B. Brechen der Wellen), mit einer digitalen Videokamera, die auf die Frontseite des Wellenbrechers gerichtet wurde; weiterhin können Druckspannungsmessungen an der vorderen Wand mit Druckmesssonden für die Bestimmung der Wellencharakteristik genutzt werden.
- Strömungsgeschwindigkeiten direkt an der vorderen Wand, mit elektromagnetischen Strömungssonden.
- Druckspannungen auf der Oberseite des Caissons, die durch den Rückfall des an der Vorderwand aufsteigenden Wasserstrahls verursacht werden, mit Druckmeßsonden (Abb. 4).
- Wasseroberflächenauslenkungen (Wellen) entlang des Wellenkanals und auf der Böschung, mit Wellenpegeln. Einige der Wellenpegel wurden als Gruppe so angeordnet, dass mit den Einzelergebnissen die ankommenden bzw. reflektierten Anteile der Wellen bestimmt werden können.



Abb. 3: Messeinrichtungen: Zulaufrinne (1), Wellenpegel direkt an der vorderen Wand (2), Geschwindigkeits-Sensoren (3) und Pegel für die Erfassung des Überlaufstrahls mit digitaler Videokamera (4)

Die Signale aus allen Sensoren wurden digital mit einer Abtastfrequenz von 220 Hz auf einem Computer gespeichert. Details der Messgeräte und der Sensoren werden in Abb. 3 und 4 gezeigt. Alle Wellenpegel bestehen aus modifizierten Widerstandsdrahtpegeln, die direkt die Wasseroberflächenauslenkungen messen

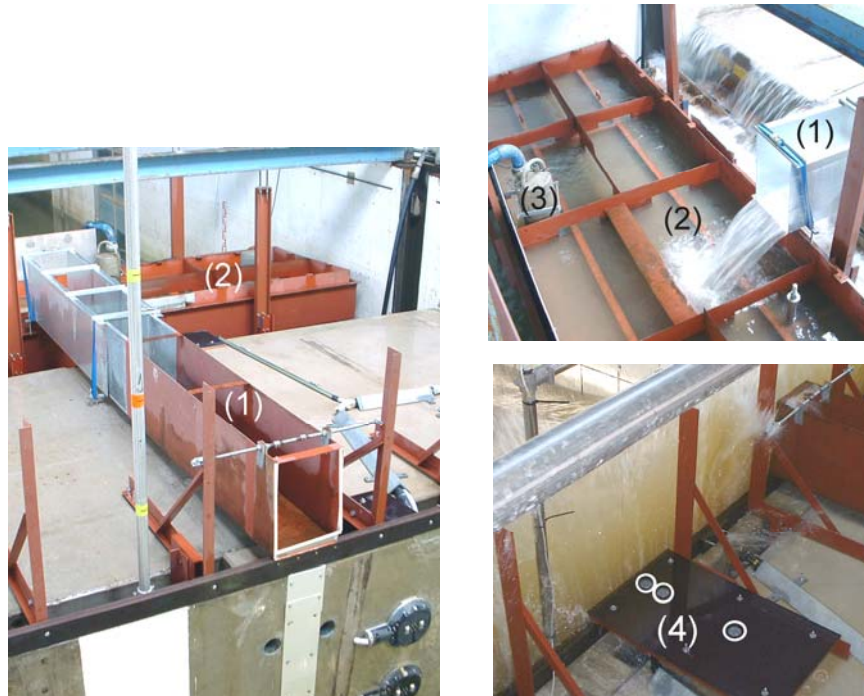


Abb. 4: Messeinrichtung für die Erfassung der Überlaufmenge mit Zulauftrinne (1), Wägebehälter (2), Entleerungspumpe (3) und Druckmesssonden auf der Caissonoberfläche (4)

### 3. DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHE

Die Testparameter und ihren Wertebereich der Versuche im GWK sind für die Testserien mit vertikaler und geneigter Wand in Tabelle 1 aufgelistet. Für beide Testserien wurde der Ruhewasserspiegel von 3,75 m bis 5,0 m über der Kanalsole in Schritten von 0,25 m variiert. Es wurden regelmäßige Wellen und Wellenspektren (Jonswap) mit Wellenhöhen zwischen 0,5 m und 1,7 m für die regelmäßigen Wellen bzw. bis 1,45 m für die Wellenspektren erzeugt. Weiterhin wurden Naturspektren für Tests mit der vertikalen Wand verwendet. Die Perioden  $T$  und  $T_p$  lagen im Bereich zwischen 4s und 10s. Infolge dieser breiten Variation der Wellenparameter ergaben sich Wellenklimate sowohl für brechende Wellen als auch für nicht brechende Wellen in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen Wellenparametern und Wassertiefe vor dem Wellenbrecher.

Die Fotos in Abb. 6 sowie in Abb. 7 geben einen Eindruck über die Wirkung brechender Wellen an der senkrechten vorderen Wand infolge brechender Wellen. Weil bei vielen Versuchen der aufsteigende Wasserstrahl bis über das Dach reichte, wie in der Abb. 7 gezeigt, musste das Dach über der Wand des Wellenbrechers geöffnet werden.

Tabelle 1 Testparameter für die Versuche zum Wellenüberlauf im GWK

Testparameter	senkrechte Wand		geneigte Wand	
	Spektren (Jonswap)	Regelmäßige Wellen	Spektren (Jonswap)	Regelmäßige Wellen
Wassertiefe an der Wellenmaschine	$D = 3.75 - 5.00 \text{ m}$	$D = 3.75 - 5.00 \text{ m}$	$D = 3.75 - 4.50 \text{ m}$	$D = 3.75 - 4.70 \text{ m}$
Wellenhöhe	$H_{1/3} = 0.60 - 1.45 \text{ m}$	$H = 0.50 - 1.70 \text{ m}$	$H_{1/3} = 0.50 - 1.20 \text{ m}$	$H = 0.75 - 1.50 \text{ m}$
Wellenperiode	$T_p = 4 - 10 \text{ s}$	$T = 3 - 8 \text{ s}$	$T_p = 4 - 10 \text{ s}$	$T = 4 - 10 \text{ s}$
Relative Wassertiefe am Caisson	$D_V/H_{1/3} = 0.9 - 2.5$	$D_V/H = 0.7 - 2.7$	$D_V/H_{1/3} = 0.9 - 2.1$	$D_V/H = 0.7 - 2.3$



Abb. 6: Wellenwirkung am vertikalen Wellenbrecher infolge brechender Wellen



Abb.7: Wellenwirkung einer brechenden Welle am senkrechten Wellenbrecher

Die Fotos in Abb. 7 wurden von zwei digitalen Videokameras synchron innerhalb und außerhalb des GWK während eines Versuches aufgenommen. Die Skala in Abb. 7 bezieht sich auf den Ruhewasserspiegel.

#### 4. AUSWERTUNG DER MESSUNGEN

In diesem Bericht wird nur auf die Auswertung der gemessenen mittleren Überlaufmengen eingegangen, wobei alle Ergebnisse auf die ankommenden Wellenparameter ohne Reflexionsanteil bezogen sind. Ein Bezug auf die unterschiedlichen Wellencharakteristiken infolge der unterschiedlichen relativen Wassertiefen vor dem Wellenbrecher sowie die Analyse der Daten von allen weiteren Sensoren erfolgt in der fortlaufenden Arbeit.

Beispielhaft sind in Abb. 8 für einen Versuch mit regelmäßigen Wellen und in Abb. 9 für einen Versuch mit Wellenspektren (Jonswap), jeweils mit senkrechter Wand, die Zeitreihen von zwei Parametern dargestellt. In beiden Abbildungen werden im oberen Teil die Zeitreihe für die Wasseroberflächenauslenkungen dargestellt, die mit einem Wellenpegel direkt an der Wand gemessen wurden, und im unteren Teil die entsprechende summierte Wellenüberlaufmenge, die mit dem Wägebühler gemessen wurde.

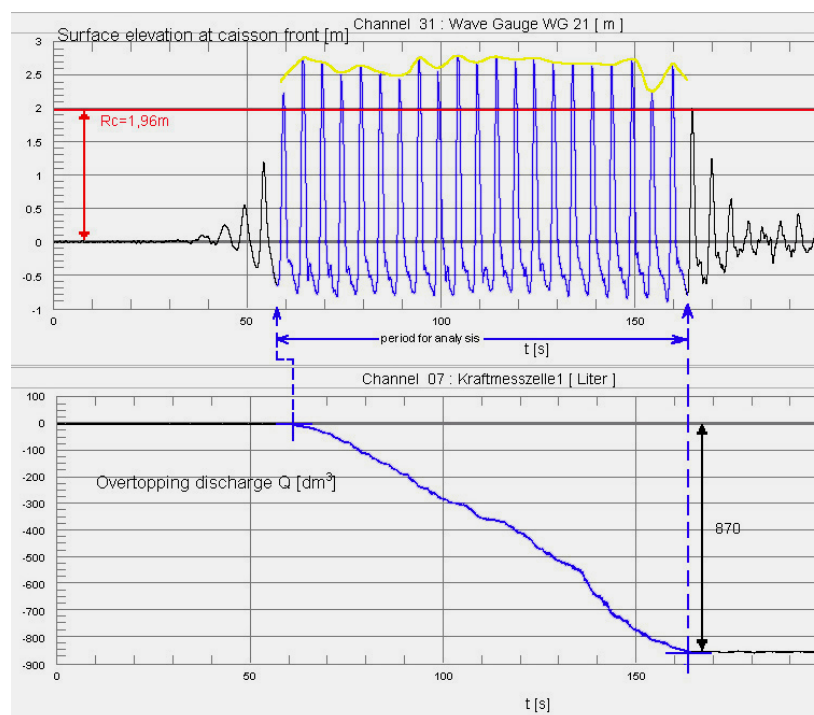


Abb.8: Zeitreihe der Oberflächenauslenkungen an der Caissonvorderseite und der summierten Überlaufmengen (regelmäßige Wellen)

Die Daten zeigen eine ausgeprägte Korrelation zwischen den Oberflächenauslenkungen an der Vorderseite des Caissons und der jeweiligen Überlaufmenge jeder einzelnen Welle innerhalb eines Wellenzuges, die die Oberkante der Wand (in den Zeitreihen mit  $R_c$  bezeichnet) übersteigen. Diese ausgeprägte Korrelation der Wellenhöhenverteilung kann

die große Streuung von Überlaufdaten erklären, wenn sie auf spektrale Wellenparameter bezogen werden, da sich für gleiche spektrale Dichteverteilungen unterschiedliche Wellenhöhenverteilungen ergeben können. Dies soll in der fortlaufenden Arbeit überprüft werden.

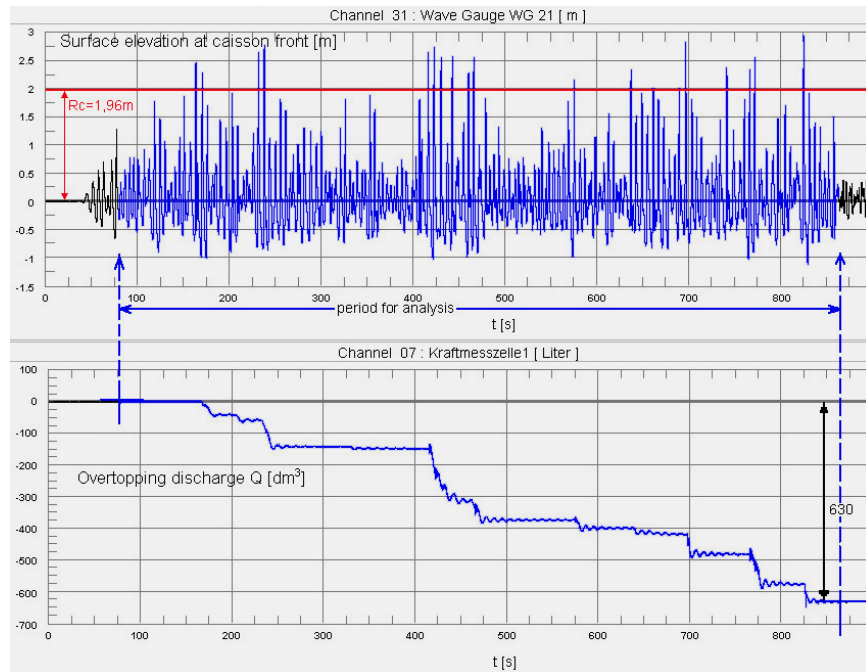


Abb.9: Zeitreihe der Oberflächenauslenkungen an der Caissonvorderseite und der summierten Überlaufmengen (Wellenspektren – Jonswap )

Um die mittlere Überlaufmenge  $q$  [ $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ ] aus den Aufzeichnungen jedes Versuchs zu ermitteln, wurde die summierte Überlaufmenge auf das Zeitfenster des Wellenzuges bezogen, das einen Überlauf verursacht, wie in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt. Für Versuche mit regelmäßigen Wellen wurde das Zeitfenster vom Beginn bis Ende des Überlaufs auf alle Wellen bezogen, solange ein Überlauf stattfand, wobei eine geringe Phasenverschiebung am Anfang berücksichtigt wurde, die auf die Laufzeit des Wassers in der Zulaufrinne über den Wellenbrecher zurückzuführen ist.

Für Tests mit Wellenspektren wurde die Gesamtzeit der erzeugten Spektren verwendet abzüglich der ersten 30 Sekunden am Versuchsbeginn, bedingt durch die lineare Anlauframpe der Steuersignale für die Wellenmaschine.

Das jeweilige Zeitfenster wurde dann für die Wellenanalyse mit einer Wellenpegelgruppe vor der Böschung verwendet, um die ankommenden und reflektierenden Anteile der erzeugten Wellen zu ermitteln. Für die weiteren Untersuchungen wurden die Parameter  $H_{1/3}$  und  $T_m$  für die ankommenden Wellen und die ermittelten mittleren Überlaufmengen  $q$  verwendet.

## 5. ERSTE ERGEBNISSE

Ergebnisse für die Überlaufmengen aus Untersuchungen mit unterschiedlichen Arten von Wellenbrechern sind von vielen Autoren berichtet worden, meistens wurde dazu der allgemeine Ansatz  $Q^* = a \exp(-b R^*)$  zu Beschreibung der Überlaufmengen benutzt. In diesem Ansatz von OWEN (1980) ist  $Q^*$  eine dimensionslose Überlaufmenge und  $R^*$  der dimensionslose Freibord. Eine Korrelation von beiden Parametern führt zu einer Regressionsgeraden in einem log-linearen Plot und legt die Koeffizienten  $a$  und  $b$  fest. OWEN definierte die Parameter  $Q^*$  and  $R^*$  wie folgt:

$$Q^* = q / T_m g H_{1/3} \quad \text{mit } q = \text{mittlere Überlaufmenge [m}^3/\text{m}^2\text{s]}$$

$$R^* = R_c / T_m (g H_{1/3}) \quad \text{mit } R_c = \text{Freibord zwischen Ruhewasserspiegel und Kronen des Caissons}$$

In späteren Berichte anderer Autoren wurden die Parameter  $Q^*$  und  $R^*$  auch unterschiedlich definiert.

In Abb. 11 sind die Ergebnisse aus den Versuchen mit senkrechter Wand dargestellt, wobei für die Parameter  $Q^*$  und  $R^*$  die Definitionen von OWEN (1980) verwendet wurden. Weiterhin wurden die mittleren Perioden  $T_m$  aus dem Zeitbereich sowie die Wellenhöhen  $H$  für regelmäßige Wellen und  $H_{1/3}$  für unregelmäßige Wellen (Jonswap – Spektren) verwendet. Wie erwartet, verursachen die regelmäßigen Wellen größere Überlaufmengen.

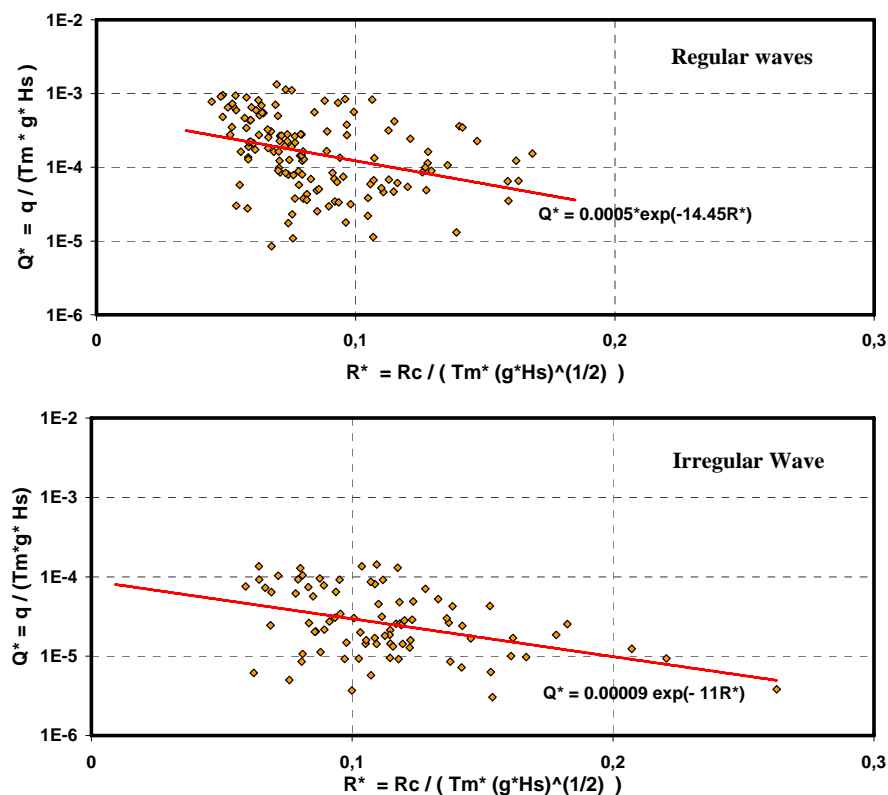


Abb. 11. Mittlere Überlaufmenge  $Q^*$  in Abhängigkeit vom Freibord  $R^*$  aus den Versuchen mit vertikaler Wand im GWK (Definitionen nach OWEN 1980)



In Abb. 12 sind die gleichen Messdaten aus den Versuchen mit unregelmäßigen Wellen wie in Abb. 10 mit den Definitionen für  $Q^*$  und  $R^*$  von AHRENS & HEIMBAUGH (1988) geplottet, die die Wellenperiode nur indirekt mit der Wellenlänge  $L$  für den Parameter  $R^*$  einsetzen. In Abb. 13 enthält die Messergebnisse mit den Definitionen nach PETERSEN und BURCHARDT (1992), die die Wellenperiode direkt sowie indirekt mit der Wellenlänge  $L$  nur für  $Q^*$  berücksichtigen.

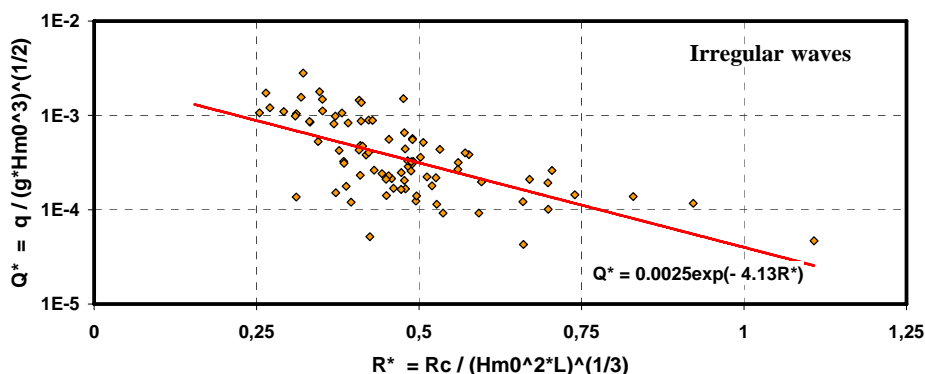


Abb. 12: Mittlere Überlaufmenge  $Q^*$  in Abhängigkeit vom Freibord  $R^*$  aus den Versuchen mit vertikaler Wand im GWK (Definitionen nach AHRENS & HEIMBAUGH 1988).

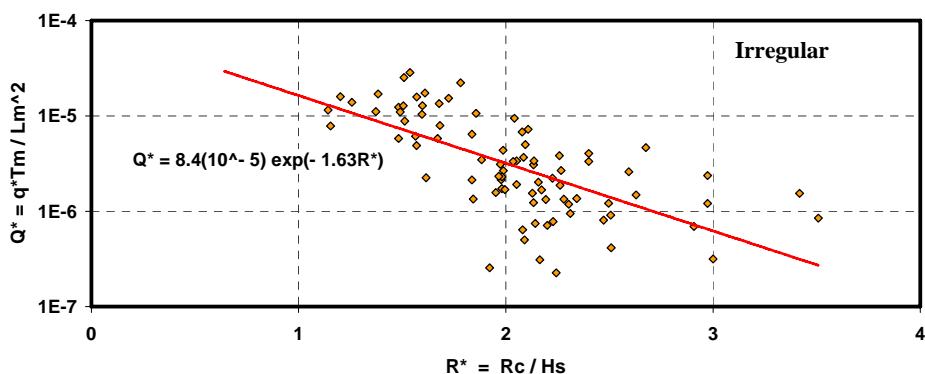


Abb. 13: Mittlere Überlaufmenge  $Q^*$  in Abhängigkeit vom Freibord  $R^*$  aus den Versuchen mit vertikaler Wand im GWK (Definitionen nach PETERSEN & BURCHARDT 1992).

In den Parameterdefinitionen von FRANCO et al. (1994), die für die Plots in Abb. 14 verwendet wurden, wird die Wellenperiode überhaupt nicht berücksichtigt. Die Definition des Freibordparameters  $R^*$  von FRANCO et al. (1994) ist mit derjenigen von PETERSEN & BURCHARDT (1992) identisch. Ein Vergleich der Ergebnisse in den Abbildungen 11, 12 und 13 zeigt, dass die Ergebnisse nach den Definitionen vom FRANCO et al. (1994) die beste Korrelation mit den Ergebnisse aus den Versuchen im GWK liefern. Daraus kann gefolgert werden, dass die Wellenperiode nur einen geringen Einfluss auf den Überlaufsprozess hat. Die zusätzliche Linie im unteren Teil von Abb. 14 für die Versuche

mit unregelmäßigen Wellen stellt die Regressionslinie der Daten dar, die von FRANCO et. al. (1994) berichtet wurden. Diese Daten zeigen viel geringere Überlaufmengen im Vergleich mit den Daten aus den Versuchen im GWK. Es kann angenommen werden, dass die Unterschiede mindestens teilweise durch Maßstabeffekte entstanden sind.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Versuche mit der vertikalen Wand mit denjenigen mit der geneigten Wand in Abb. 15 zeigt höhere Überlaufmengen für die geneigte Wand.

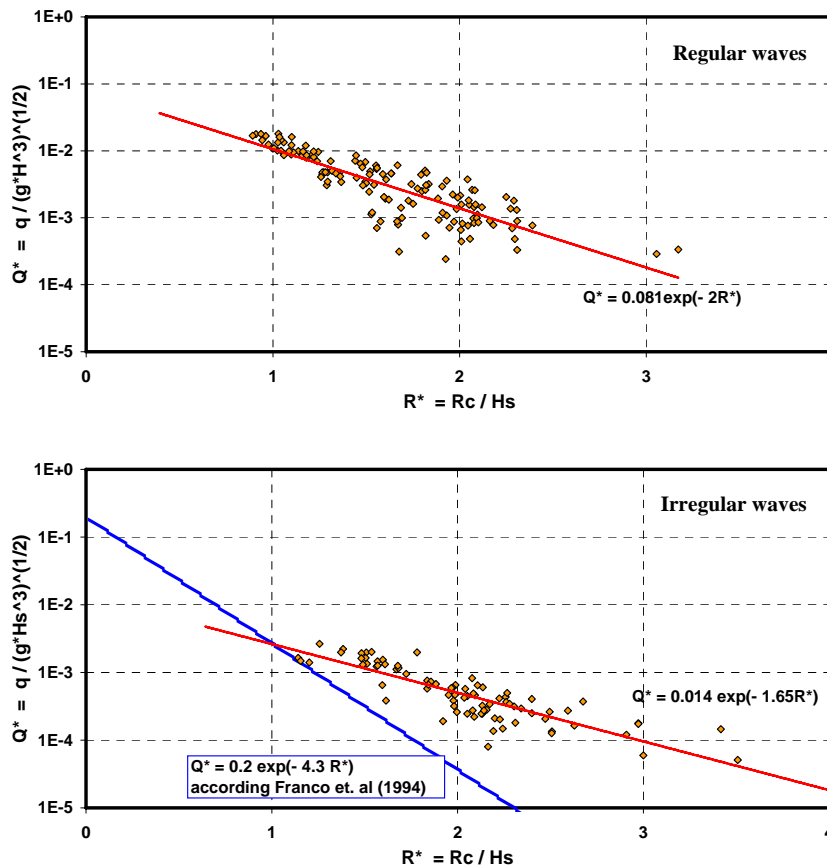


Abb. 14: Mittlere Überlaufmenge  $Q^*$  in Abhängigkeit vom Freibord  $R^*$  aus den Versuchen mit vertikaler Wand im GWK (Definitionen nach FRANCO et al. 1994)

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Mit den dargestellten ersten Ergebnissen aus den Versuchen im GWK mit einem Caisson-Wellenbrecher mit davor liegender Böschung ergibt sich Folgendes:

- Großmaßstäbliche Versuche ergeben offensichtlich höhere Wellenüberlaufmengen verglichen mit denjenigen aus kleinmaßstäblichen Versuchen.
- Die Wellenperiode hat nur einen geringen Einfluss auf die Wellenüberlaufmengen.
- Die mittleren Überlaufmengen sind für steil geneigte Wände größer im Vergleich zu vertikalen Wänden.

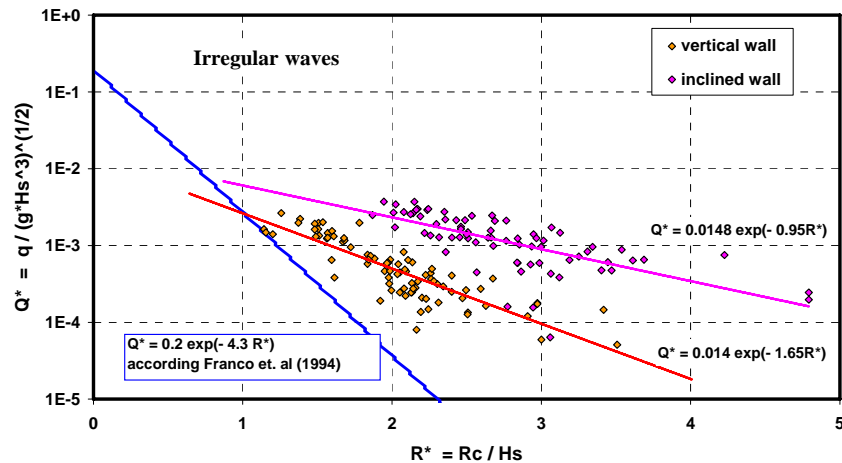


Abb. 15: Vergleich der gemessenen mittleren Überlaufmengen  $Q^*$  in Abhängigkeit des Freibords  $R^*$  für die vertikale und die geneigte Wand des Wellenbrechers im GWK (Definitionen nach FRANCO et al. 1994).

## 7. SCHRIFTTUM

- AHRENS, J.P. VON HEIMBAUGH, M.S.: Seawall Overtopping Model. Proceedings 21<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering. Malaga. 1988
- FRANCO, L. DE GERLONI, M., VAN DER MEER, J.W.: Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters. Proceedings 24<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering. Kobe. 1994
- GRÜNE, J., WANG, Z., BULLOCK, G., OBHRAI, C.: Violent Wave Overtopping on Vertical and Inclined Walls: Large Scale Model Tests, Proceedings 29<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Lisboa. 2004
- OBHRAI, C., BULLOCK, G., WOLTERS, G., MÜLLER, G., PEREGRINE, H., BREDMOSE, H. AND GRÜNE, J.: Violent Wave Impacts on Vertical and Inclined Walls: Large Scale Model Tests, Proceedings 29<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Lisboa. 2004
- OWEN, M.W.: Design of Seawall Allowing for Wave Overtopping. Rep. EX924, Hydraulics Research Wallingford, UK. 1980
- PEDERSEN, J., BURCHARDT, H.F.: Wave Forces on Crown Walls. Proceedings 23<sup>rd</sup> International Conference on Coastal Engineering. Venice. 1992