

## Durchströmbare Böschungsstrukturen

F. Büsching, Braunschweig

**Übersicht.** Für Baukonstruktionen des Küstenschutzes sowie für andere wellenbeanspruchte Böschungsstrukturen (Uferschutzwerke, Deichdeckwerke, Längswerke, Deckschichten von Wellenbrechern, Stauwände von Stahlwasserbaukonstruktionen oder dgl.) werden böschungsparelle Hohlstrukturen vorgeschlagen. Diese haben den Zweck, das nach dem Wellenbrechen auf der Böschung befindliche Wasser unterhalb des Bezugswasserspiegels zurückzuleiten und damit eine Wechselwirkung zwischen der oberflächennahen Wasserteilchenkinematik ankommender Wellen und derjenigen des Rücklaufwassers vorausgegangener Wellen weitgehend zu unterbinden. Versuche haben bestätigt, daß für die Bemessung von Baukonstruktionen mit derartigen Schutzstrukturen insbesondere geringere Brecherhöhen und Wellenauflaufhöhen zugrunde gelegt werden können.

### Permeable revetment structures

**Contents.** A proposal is made for designing the cover layers of nonvertical coastal structures (such as seawalls, revetments, groins, jetties and breakwaters) in using hollow structural elements. The respective cavity is oriented more or less parallel to the slope face and thus permits the inside passage of the downrush water of breakers. Its purpose consists in avoiding interaction processes between the particle kinematics of near surface water of oncoming waves and the downrush action of previous waves. It has been confirmed by model investigations that the dimensioning of such structures can be based on smaller breaker and runup heights.

### 1 Einführung

Die Mechanismen der Übertragung wellenerzeugter Belastungen auf geböschte Wasserbaustrukturen zählen seit langem zu den wichtigsten Themen küstenwasserbaulicher Forschung. Hierbei spielen die quasihydrostatischen Druckspannungsunterschiede an Außen- und Innenseiten von Deckschichten, Druckschlagphänomene und die Wirkungen des Wellenauflaufes und Wellenüberlaufes eine besondere Rolle. Es ist bekannt, daß durch die Gestaltung der Wassertiefenverhältnisse vor dem Bauwerk, durch die Formgebung des Bauwerksquerschnittes, durch die Wahl der Baustoffe und insbesondere durch die konstruktive Gestaltung der Bauwerksoberfläche der Lastübertragungsmechanismus „Welle – Bauwerk“ beeinflußt wird. Seit den siebziger Jahren ist an der Nord- und Ostseeküste das Augenmerk besonders auf Möglichkeiten gerichtet, die Höhe des Deichvorlandes relativ zum Wasserstand zu erhöhen, so daß der Brechpunkt für die energiereichen, großen Wellen möglichst weit seawärts verlegt und die Beanspruchung der Küstenschutzbauwerke

auf diese Weise herabgesetzt wird. Andererseits wird weiterhin das Konzept verfolgt werden, die Energie der an das Bauwerk gelangenden Wellen beim Brechprozeß und beim anschließenden Wellenauflauf möglichst effektiv in turbulenten Durchmischungs- und Stoßvorgängen umzuwandeln.

### 2 Veranlassung

Nur über die Energieumwandlungsprozesse ist in der Vergangenheit indirekt auch auf die Reflexion und damit auf die Wasserteilchenkinematik vor dem Bauwerk Einfluß genommen worden.

Von besonderer Bedeutung ist aber, daß der mit Sicherheit zur Lastentwicklung beitragende Wechselwirkungsprozeß zwischen der oberflächennahen Wasserteilchenkinematik ankommender Wellen und derjenigen des Rücklaufwassers vorausgegangener Wellen bisher nicht hinreichend beachtet worden ist. Dem Verfasser sind jedenfalls keine Baukonstruktionen bekanntgeworden, die die Beeinflussung des genannten Effektes im Sinne geringerer wellenerzeugter Bauwerksbelastungen zum Ziele hatten.

### 3 Vorschlag

#### 3.1 Beschreibung

Für Baukonstruktionen des Küstenschutzes sowie für andere wellenbeanspruchte Böschungsstrukturen (Uferschutzwerke, Deichaußenböschungen, Böschungsstrukturen von Wellenbrechern oder Längswerken, Stauwände von Stahlwasserbaukonstruktionen oder dgl.) werden die nachfolgend beschriebenen, in ihren dynamisch belasteten Bereichen prinzipiell als zweischalige Strukturen ausgeführten Baukonstruktionen vorgeschlagen:

Bild 1 zeigt in axonometrischer Darstellung die prinzipielle Anordnung einer Hohlraumstruktur pro lfd. m Uferlinie als integrales Konstruktionselement einer Böschungskonfiguration.

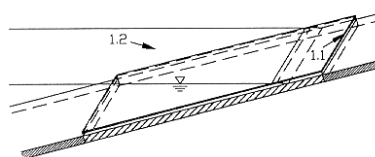


Bild 1. Hohlraumstruktur als integrales Böschungselement

Prof. Dr.-Ing. F. Büsching ist seit 1984 Leiter des Labors für Hydromechanik und Wasserbau an der FH Bielefeld, Abteilung Minden, Fachbereich Bauingenieurwesen.

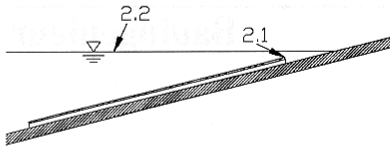


Bild 2. Schale über vorhandener Böschungsabdeckung

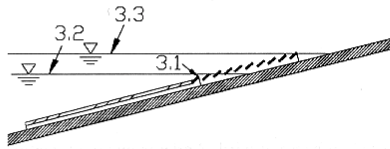


Bild 3. Partiiell durchlässige Hohlkörperstruktur

Bild 2 stellt den Vertikalschnitt durch eine Böschungsabdeckung dar, die prinzipiell durch Anordnung einer zusätzlichen Schale zu einer Hohlstruktur ergänzt ist, und Bild 3 enthält die prinzipielle Darstellung einer an ihrer Oberseite partiell durchlässigen Hohlkörperstruktur. Das wesentliche Bauelement besteht demnach aus einem auf seinem Umfang zumindest teilweise geschlossenen, wasserdurchströmbaren Hohlkörper mit etwa böschungparalleler Ausrichtung. Eine derartige Ausbildung ermöglicht die Rückleitung des nach dem Wellenbrechvorgang oberhalb der Kante (1.1), (2.1) oder (3.1) vorhandenen Rücklaufwassers in das Wasservolumen vor dem Bauwerk unterhalb des Bezugswasserspiegels (1.2), (2.2) oder (3.2).

Eine ausführliche Erläuterung der dargestellten Konfigurationen ist in [1, 2] enthalten.

### 3.2 Physikalisches Phänomen und angestrebte Beeinflussung

Die bei Anwesenheit von Wellen an Böschungen vorhandene Wasserbewegung wird als erzwungene Schwingbewegung mit mehreren Freiheitsgraden (Koppelschwingung) aufgefaßt. Dabei stellt das als Kontinuum vor der Böschung befindliche Wasservolumen das schwingende System dar, das je nach vorliegenden geometrischen Randbedingungen (Wassertiefe, Böschungsneigungen) durch unterschiedliche Eigenfrequenzen gekennzeichnet ist. Es wird hier in Analogie zur elastischen Kette ein Gesamtsystem zugrunde gelegt, das aus mehreren Teilschwingern mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen besteht. Die Wirkungen der von See kommenden Wellen werden in dieser Anordnung als die Erregerkräfte angesehen. Damit können die der partiellen Reflexion entsprechenden Wasserspiegelauslenkungen einerseits und die Wellenauflauf-Rücklaufbewegungen andererseits etwa ausgeprägten Freiheitsgraden des Systems zugeordnet werden.

Wird das System in seinen Freiheitsgraden verändert, so hat dieses unmittelbar auch eine Veränderung der Anzahl und der Beträge seiner Eigenfrequenzen zur Folge.

Im vorliegenden Fall wird durch die weitgehende Unterbindung einer Wechselwirkung zwischen den oberflächennahen Teilchenschwingungen und dem Rücklauf erreicht, daß nicht nur der Wellenauflauf, sondern auch die Brecherhöhe, die Brecherform und die Brecherposition im Sinne geringerer Bauwerksbelastungen günstig verändert werden.

Ergebnisse diesbezüglicher Modelluntersuchungen werden Gegenstand eines weiteren Beitrages an anderer Stelle sein.

### 3.3 Ausführungsform

Neu zu entwickelnde Küstenschutzbauwerke können durchströmbare Hohlkörperstrukturen als integrale Bauelemente enthalten. Es können solche aber auch kostengünstig in den dynamisch hoch belasteten Bereichen bereits bestehender Bauwerke, je nach vorhandener Unterkonstruktion und je nach den für die betreffenden Bauwerke maßgeblichen Wasserständen aufgelagert werden. Dabei können auch die Erfordernisse wasserdurchlässiger oder geschlossener Deckwerke miterfüllt werden. An ihrer Unterseite offene, teilweise offene oder geschlossene und an ihrer Oberseite geschlossene oder teilweise offene Hohlraumelemente mit hydraulisch günstigem Querschnitt werden aus Ortbeton, als Betonfertigteil-, Stahl- oder Verbundkonstruktionen – auch unter Verwendung von Kunststoffelementen – oder aus durchströmbaren im Verbund gelegten Betonformsteinen oder Formkörpern hergestellt.

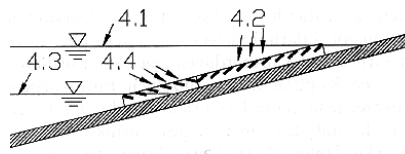
Aus einer Vielzahl möglicher, in den Patentbeschreibungen [1, 2] dargestellter Ausführungsformen sollen an dieser Stelle nur zwei Beispiele in ihren Grundzügen skizziert werden:

#### 3.3.1 Auf einer Böschung verlegte durchströmbare Betonformsteine

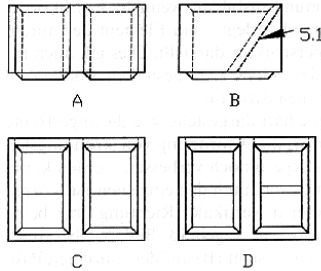
Nicht nur aus wirtschaftlichen Erwägungen sollten Betonbauweisen an Ufer- und Deichböschungen generell nur auf Bereiche hoher Beanspruchungen beschränkt bleiben. Dieser Forderung wird insbesondere bei der Verwendung von Hohlkörperenlementen dadurch entsprochen, daß diese etwa nur in einer von der Böschungsneigung abhängigen, am jeweiligen Bemessungswasserstand orientierten Schutzzone angeordnet werden.

Hinsichtlich der Betriebssicherheit ist indessen die Formgebung der Einlauföffnungen und des Durchströmquerschnittes selbst bedeutsam. Während die hydraulische Leistungsfähigkeit relativ geringe Querschnittsabmessungen erfordert, können ggf. Zuschläge erforderlich sein, um einer Verstopfungsgefahr infolge Treibgutablagerung vorzubeugen. In diesem Zusammenhang ist allerdings von besonderer Bedeutung, daß das System selbst bereits über Mechanismen verfügt, die einer Konsolidierung eingetragener Feststoffe bzw. einer dauerhaften Querschnittsverlegung durch Treibkörper entgegenwirken:

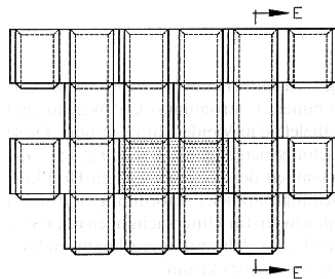
Wird eine teilweise Verstopfung und damit eingeschränkte Wirksamkeit der Hohlraumstruktur vorausgesetzt, so antwortet das als Kontinuum schwingfähige System wiederum mit verstärkten Ausschlägen in seinen ausgeprägten Freiheitsgraden, d.h. mit höheren Wellen und einer auf die Ablagerungen einwirkenden verstärkten Waschbewegung. Dieser Effekt stellt eine zusätzliche Komponente des nicht nur bei veränderlichen Wasserständen einer Ablagerungstendenz entgegenwirkenden instationären Vorganges dar. Darüber hinaus ist aber die Höhenlage der unteren Begrenzung der Hohlkörperstruktur relativ zu einem festzulegenden Grenzwasserstand von Einfluß, bis zu dem der brechererzeugte Auflaufschwall im Sinne einer Spülung noch nahezu unbehindert zur Wirkung gelangen kann. Eine Verbesserung des letzteren Effektes kann weiterhin etwa durch eine in diesem Sinne strömungsgünstige Ausbildung des unteren Bereiches der Hohlkörperstruktur erreicht werden. Eine dementsprechende mögliche Formgebung ist Bild 4 zu entnehmen. Während im Bereich hoher Wasserstände (4.1) (nahe dem Bemessungswasserstand) die Öffnungen (4.2) der Aufnahme des Rücklaufwassers dienen, wird bei Wasser-



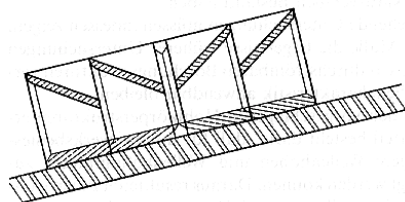
**Bild 4.** Spülöffnungen im unteren Bereich der Hohlkörperstruktur



**Bild 5.** Durchströmbarer Betonformstein; Aufsicht (A), Seitenansicht (B), Ansicht von oben (C), Ansicht von unten (D)



**Bild 6.** Aufsicht auf einen Verband von Betonformsteinen



**Bild 7.** Vertikaler Längsschnitt durch einen Verband von vier Betonformsteinen

ständen (4.3) nahe der unteren Begrenzung der Schutzzone der Eintritt des Wellenaufschwalles durch die Öffnungen (4.4) begünstigt.

Bild 5 zeigt einen durchströmbaren Betonformstein, der an seinen Öffnungen mit pyramidenstumpfförmigen Aussparungen und korrespondierenden Anformungen derart ausgebildet ist, daß er inmitten eines Verbandes jeweils von vier benachbarten Formsteinen in seiner Lage horizontal und vertikal fixiert ist, vgl. Bild 6. Mit dem Zweck, den Wassereintritt entsprechend Bild 4 zu ermöglichen, sind die Kopfflächen (5.1) geneigt ausgeführt.

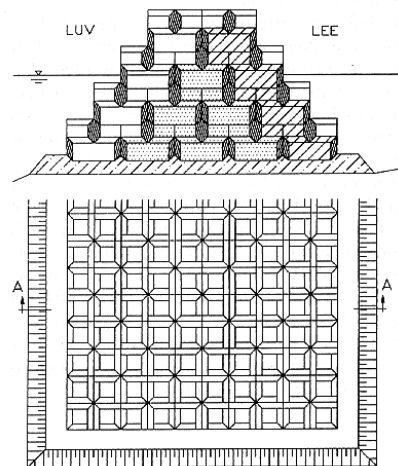
In Bild 7 ist ein etwa zugehöriger Längsschnitt E-E dargestellt, der beispielhaft auch den Stoßbereich zwischen den

gemäß Bild 4 unterschiedlichen Einlaufstrukturen enthält. Demnach können die gleichen Betonformsteine im Bereich unterhalb der eigentlichen Schutzzone wie in der Schutzzone selbst spiegelbildlich zueinander angeordnet werden. Im unmittelbaren Stoßbereich wäre lediglich ein Paßstück zu verwenden, dessen Länge nach den geometrischen Gegebenheiten und hydraulischen Erfordernissen festgelegt werden kann.

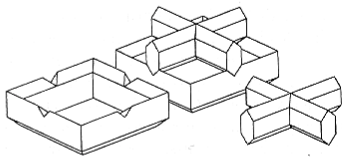
### 3.3.2 Durchströmbare Betonformkörper als Elemente wellenbrecherartiger Bauwerke

Es ist bekannt, daß die Reflexion an geböschten Wellenbrechern um so geringer ist, je durchlässiger deren Deckschichten ggf. unter Verwendung von Betonformkörpern (Tetrapoden, Tribarren, Dolosse oder Seabees) ausgeführt sind. Daraus kann geschlossen werden, daß derartige Bauwerke ihre Wirkung nicht nur der Energieumwandlung in turbulenten Durchmischungs- und Stoßvorgängen verdanken, sondern der oben dargestellte Wechselwirkungsprozeß auch an durchlässigen Deckschichten geneigter Wellenbrecher oder an durchlässigen Längswerken zu den relevanten Lastübertragungsmechanismen gezählt werden kann. Die im Anschluß an das Wellenbrechen über dem Bauwerk vorhandene Wassermassen werden zu einem nicht unerheblichen Teil in das Bauwerk eingeleitet und da der Wasseraustritt aus der Struktur in größerer Wassertiefe und zudem phasenversetzt erfolgt, ist die Wechselwirkung mit der oberflächennahen Teilchenkinematik der jeweils folgenden Welle bereits reduziert. Es ist aber durchaus zu vermuten, daß durch eine gezielte Abführung des Wassers durch eine eher regelmäßige Struktur die gesamte Belastungssituation auch an derartigen Bauwerken noch weiter verbessert werden kann. In diesem Sinne können durchströmbare Hohlkörperkonfigurationen auch als Elemente für wellenbrecherartige Bauwerke oder Längswerke in Betracht kommen.

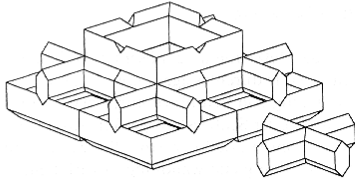
Bild 8 zeigt in seinem oberen Teil den Querschnitt A-A und im unteren Teil die Draufsicht eines derartigen, in seiner eigentlichen Tragstruktur aus Formkörpern bestehenden Bauwerkes. Zur Unterbindung der wellenerzeugten Durchströmung von der Luv- nach der Leeseite sind die Formkörper



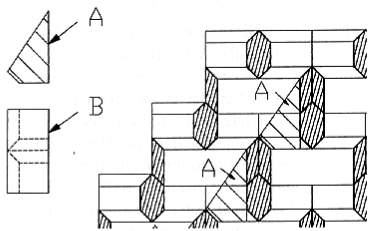
**Bild 8.** Aus durchströmbaren Betonformkörpern bestehendes wellenbrecherartiges Bauwerk



**Bild 9.** Durchströmbarer Betonformkörper; Mitte: Gesamtstruktur, links: Unterteil, rechts: Oberteil



**Bild 10.** Verbundwirkung durchströmbarer Hohlformkörper



**Bild 11.** Ausschnitt einer Hohlkörperstruktur mit strömungsleitenden Paßkörpern; Querschnitt (A), Draufsicht (B)

per im Kernbereich und – je nach Zweck des Bauwerks – auch an der Leeseite mit geeignetem Material verfüllt, während das Bauwerk an der dem Wellenangriff ausgesetzten Luvseite eine Hohlkörperstruktur mit der angestrebten Wirkung aufweist. Gegenüber vielen üblichen Bauformen geböschter Wellenbrecher mit den unterschiedlichsten Formkörperdeckschichten besteht hier ein wirtschaftlicher Vorteil bereits darin, daß mit vertretbaren Einzelkörpergewichten steilere, absorptionsfähige Böschungsneigungen erstellbar sind und damit die Gesamtmassen minimiert werden können. Weiterhin wird durch die gezielte Einleitung des Rücklaufwassers in das Bauwerk von vornherein der etwa von Tetrapoden und anderen Formkörpern bekannten Gefahr des Herauslösen einzelner Formkörper begegnet. Das Strukturelement für das in Bild 8 dargestellte Bauwerk ist dem mittleren Teil von Bild 9 zu entnehmen. Dieses kann in seiner Gesamtheit als Stahlbetonformkörper hergestellt werden; vorzugsweise entsteht es aber aus den beiden links und rechts angeordneten Komponenten. In Bild 10 ist erkennbar, daß eine zweiachsig horizontale Verbundwirkung innerhalb des aus Formkörpern gebildeten räumlichen Verbandes dadurch erreicht wird, daß der einzelne Formkörper jeweils mit seiner unteren pyramidenstumpfförmig vorspringenden Öffnung in eine korrespondierende Öffnung ein-

greift. Letztere wird durch die abgeschrägten Oberkanten einer Formation von 4 darunterliegenden, jeweils über einer rechteckigen Grundfläche angeordneten, gleichen Formkörper gebildet. Die Kopffläche des einzelnen Formkörpers weist dementsprechend in der Draufsicht eine kreuzförmige Struktur auf, die auf den Oberteil des Formkörpers beschränkt ist. Das Unterteil des Formkörpers besteht aus einem rechteckigen Rahmen, der in seinem Innenraum keine Zwischenwände besitzt. Dementsprechend kann sich hier eine von der Vertikalen abweichende, vorzugsweise böschungsparelle Strömung ausbilden, wenn der Formkörper – im räumlichen Verband verlegt – ein Element der durchströmbarer Hohlkörperstruktur darstellt. Dies gilt auch für den im unteren Teil des Bildes 8 dargestellten Endbereich einer wellenbrecherartigen Struktur.

In Bild 11 ist beispielhaft dargestellt, wie die angestrebte Strömungsführung durch die Anordnung von strömungsleitenden Fertigteil-Paßkörpern noch verbessert werden kann. Aus dem Vertikalschnitt (A) durch den einzelnen Paßkörper ist erkennbar, daß dieser in vertikaler Richtung über beide Teilelemente des Formkörpers gemäß Bild 9 übergreift. Andererseits zeigt die Draufsicht (B) auf den einzelnen Paßkörper, daß dieser vorteilhaft auch ein horizontales Verbundelement zwischen zwei nebeneinander angeordneten Formkörpern darstellen kann.

#### 4 Ausblick

Modelluntersuchungen zu der behandelten Problematik werden zur Zeit im Kombinierten Strömungs- und Wellenkanal der Fachhochschule Bielefeld in Minden durchgeführt. Diese haben bereits für Böschungsneigungen  $1:6 \leq 1:n \leq 1:1,7$  die grundsätzliche Wirksamkeit der vorgeschlagenen Hohlkörperstrukturen in böschungspareller Anordnung eindrucksvoll bestätigt. Dies gilt sowohl für Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen als auch für solche mit unregelmäßigen Wellen entsprechend einem Wellenspektrum.

Damit liegt eine wichtige Voraussetzung dafür vor, daß die Untersuchungsergebnisse auch in einem künftig durchzuführenden Naturversuch Bestand haben.

Weitergehende Untersuchungen müssen indessen zeigen, in welchem Maße die Ergebnisse früherer Untersuchungen auch auf die vor durchströmbarer Böschungsstrukturen veränderte Wellencharakteristik anwendbar bleiben.

Der mit den vorgeschlagenen Hohlkörperstrukturen erzielbare Vorteil besteht darin, daß für die Bauwerksbemessung geringere Wellenhöhen und Wellenauffuhöhen zugrunde gelegt werden können. Daraus resultieren Einsparungen bei den Herstellungs- und Unterhaltungskosten – bei steilen Böschungen in vermehrtem Maße durch den geringeren Massenbedarf.

#### Literatur

1. Büsching, F.: Uferschutzwerk, Deichaußenböschung, Stauwand oder dgl. sowie zugehörige Bauelemente; Anmeldung Deutsches Patentamt Nr. P 39 30 997.5-25, 1989
2. Büsching, F.: Uferschutzwerk, Längswerk, Querwerk, Wellenbrecher oder dgl. sowie zugehörige Bauelemente; Anmeldung Deutsches Patentamt Nr. P 40 11 504.6-25, 1990