

**RICHWIEN, W. und WEHNER, T.**

Sonderforschungsbereich (SFB) 205, Universität Hannover, BRD

Projekt „Seegangserzeugte Beanspruchung von Böden“

## BEANSPRUCHUNG VON FILTERN IM SEEDEICHBAU

### CONSIDERING THE STRESS OF FILTERS IN THE CONSTRUCTION OF SEA DIKES

### SOLLICITATION DE FILTRES DANS LA CONCEPTION DES DIGUES

Spannungen und Formänderungen, die in Böschungsabdeckungen durch Seegang hervorgerufen werden, sind bislang wenig erforscht. Demzufolge wird auch die Bemessung von Filtern unter Deckwerken bisher ohne Berücksichtigung der speziellen, seegangsspezifischen Beanspruchung dieser Filter vorgenommen. Im vorliegenden Beitrag wird auf der Grundlage von Erkenntnissen aus Messreihen im Großen Wellenkanal (GWK) der Universität Hannover, Technischen Universität Braunschweig, gezeigt, daß Filter unter dichten Deckwerken von Seedeichen neben quasistatischen Spannungsänderungen aus dem Wellenspektrum auch dynamische Spannungsänderungen infolge Aufschlags einer brechenden Welle (Druckschlag) erleiden. Das untersuchte Mehrschichtensystem schwingt unter Druckschlageinwirkung annähernd mit seiner ersten Eigenfrequenz.

#### EINLEITUNG

Das moderne, 1:6 geneigte Böschungsprofil ist aus der systematischen Umsetzung jahrelanger Beobachtungen und Analysen von Schäden an Seedeichen infolge Sturmfluten entstanden. Besonders der oft als Druckschlag bezeichnete Wellenschlag auf die Deichböschung gilt in diesem Zusammenhang als die herausragende Beanspruchung, auf die die äußere Formgebung der Deichprofile abgestimmt wird (1). Die Weiterleitung des Druckschlags über das Deckwerk in dessen Bettung bzw. über einen zwischen Deckwerk und Bettung angeordneten Filter blieb zunächst weitgehend unberücksichtigt.

Die Beanspruchung des Deckwerks und des Deichkerns durch Seegang wird seit 1983 im Rahmen der Arbeiten des Sonderforschungsbereichs (SFB) 205 "Küsteningenieurwesen" an der Universität Hannover untersucht. Die Nutzung des Großen Wellenkanals der Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig eröffnet diesen Untersuchungen einmalige Bedingungen: die Versuche können im Naturmaßstab, jedoch unter Laborbedingungen durchgeführt werden.

Die inzwischen vorliegenden Meßergebnisse der ersten Versuchsreihen lenken die Aufmerksamkeit auf ein bisher im Seedeichbau nicht beachtetes Problem: die dynamische Beanspruchung von Filtern bei gleichzeitiger hydrodynamischer Durchströmung.

Only a few investigations had been done about stress and strains of soil due to breakers. Therefore the dimension of filters under sea dike revetments were constructed by not taking the stress on the filter-layer under rough sea conditions into consideration. This paper presents some results of investigations on this field which were carried out in the Great Wave Channel (GWK) in Hanover, Marienwerder, FRG. The filter-layer underneath an asphalt concrete revetment is stressed by two factors under rough sea conditions: firstly a quasi-static change of stress due to periodic change of the free water level and secondly a dynamic change of stress due to wave impact. It can be demonstrated by these tests that the revetment and the soil underneath oscillates due to wave impact with its first eigenfrequency.

#### WELLENBELASTUNG

Zum grundsätzlichen Verständnis der Beanspruchung von Filtern unterhalb der Deckwerke von Seedeichen muß zunächst die Wellenbelastung erläutert werden.

Die von See einlaufende Tiefwasserwelle ist durch ihre Wellenlänge  $L_0$  und die Wellenhöhe  $H_0$  gekennzeichnet. Bei abnehmender Wassertiefe  $d$  werden die Wellen zunehmend steiler, d.h., der am Wellenberg eingeschlossene Winkel wird kleiner. Der Brechvorgang einer anlaufenden Welle beginnt zu dem Zeitpunkt, an dem die kritische Wassertiefe  $d_{crit}$  unterschritten wird und der Wellenberg wegen der unter ihm größeren Wassertiefe schneller fortschreitet als das Wellental. Dabei überholt der Wellenberg sozusagen das Wellental und bricht als Schaum-, Sturz- oder Schwallbrecher in das Wellental hinein. Ein Teil der Wassermasse (Brecherzunge) schlägt im freien Fall auf die Böschung auf. Es kommt zum sog. Druckschlag. Dieser allgemeine Zusammenhang ist in Abb. 1 dargestellt. Die Wellenbelastung eines Seedeichs setzt sich also dem Wesen nach aus zwei Hauptkomponenten zusammen:

- einer mit der Wellenperiode veränderlichen hydrostatischen Belastung, d.h., einer sich periodisch verändernden Wasserauflast

- einer Druckschlagbelastung als Folge der im freien Fall auf die Deichböschung auftreffenden Wassermasse der Brecherzunge

Bisher war allgemein angenommen worden, daß der zweite Belastungsanteil, der Druckschlag, nur bei offenen Deckwerken zu beachten ist. In Form einer hydrodynamischen Fortpflanzung in wassergefüllten Spalten der Deckschichten kann der Druckschlag dabei zu Aussprengungen und Deformationen im Blocksteingefüge einer Deckschicht führen. Die Auswirkungen dieser Stoßbelastung auf das zumindest teilgesättigte Korngefüge des Sandkerns eines Seedeiches wurden bisher in Richtlinien und Ausführungsempfehlungen nicht berücksichtigt (1). Die Untersuchungen im GWK haben nunmehr gezeigt, daß der Druckschlag bereits bei einer geschlossenen Deckschicht und entwässertem Sandkern nennenswerte mechanische Beanspruchungen im Sandkern hervorruft.

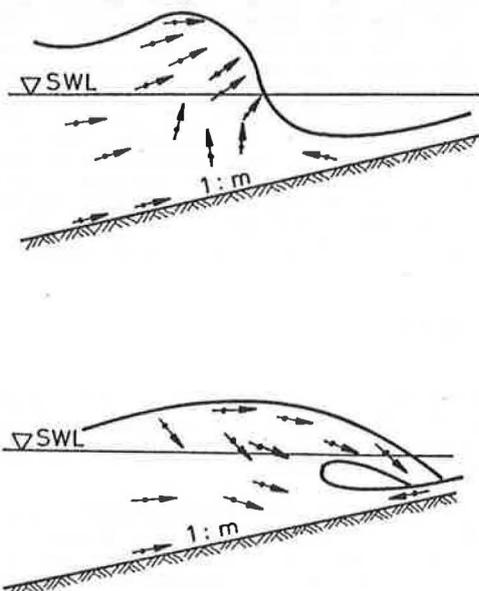


Abb.1: Kinematik der auf eine Böschungsabdeckung auflaufende Welle

SPANNUNGSÄNDERUNGEN UNTERHALB DES DECKWERKS  
INFOLGE SEEGANGS

Im Rahmen der Forschungsarbeiten zur see-gangserzeugten Beanspruchung von Böden wurden in einem Deichquerschnitt im Maßstab 1:1 insgesamt 16 Erd-druckaufnehmer und Porenwasserdruckaufnehmer eingebaut. Die Anordnung der Aufnehmer in böschungsparellen Ebenen verschiedener Tiefe unter einem dichten Deckwerk aus Asphaltbeton zeigt Abb. 2. Im Bereich der Meßebene A (0,4 m unter Deckwerkoberkante) sind gegebenenfalls Filter angeordnet; für die hier vorgestellten Versuchsreihen wurde jedoch ein 2-Schichtensystem ohne Filterlage eingebaut.

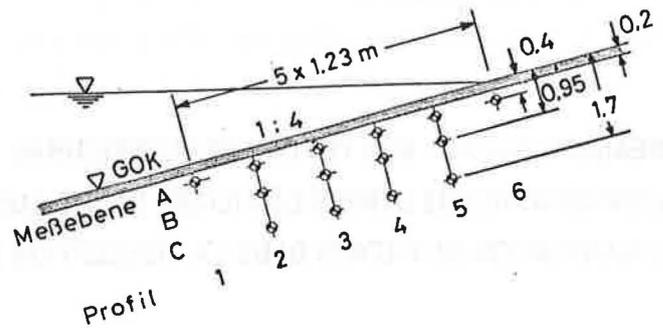


Abb.2: Meßquerschnitt im Großen Wellenkanal in Hannover-Marienwerder

Die Meßdaten der Aufnahme in Abb. 2 werden über eine Meßwerterfassungsanlage zeitgleich mit einer Digitalisierungsrate von 50 Hz abgerufen, d.h., während der Versuchsaufzeichnung fallen pro Sekunde 800 Meßdaten an, die über einen nachgeschalteten Rechner weiterverarbeitet werden. Über Versuchsanordnung, Meßwertaufnahme und Datenerfassungsanlage wird in (2) ausführlich berichtet. Abb. 3 zeigt den konzeptionellen Aufbau der eingesetzten Anlage.

Charakteristisch für die Beanspruchung des Sandkerns aus Seegang sind die in Abb. 4 dargestellten Spannungsänderungen über die Zeit. Sie sind exemplarisch für das Meßprofil 2 in Meßebene B (vgl. Abb. 2) gezeigt. Das Grundmuster der Spannungsänderung entspricht der hydrostatischen Belastungsänderung durch Seegang. Es besteht also aus einer mit der Wellenperiode veränderlichen Zunahme und Abnahme der Druckspannungen. Diese Beanspruchungsform ist einer Druckschwellbeanspruchung gleichzusetzen. Zusätzlich zu diesen zyklischen Spannungsänderungen wird durch den Druckschlag eine Spannungsänderung ausgelöst, deren zeitlicher Ablauf nicht mehr direkt der Belastung entspricht. Innerhalb von rd. 1 Sekunde kommt es zu einem mehrfachen, stark gedämpften Amplitudenwechsel der Spannungsänderung. Gegenüber dem Zeitraum der äußeren Belastungsfolge (Wellenperiode) ist die Schwingungsdauer klein. Der Druckschlag bewirkt demnach im Sandkern eine impulsförmige Schwingung. Unter Berücksichtigung einer Druckschlagdauer von rd. 0,01 bis 0,1 Sekunden reagiert das 2-Schichtensystem Deckwerk/Sandkern also dynamisch.

CHARAKTERISTIK DER DRUCKSCHLAGBEANSPRUCHUNG

Die vorstehend dargelegten grundsätzlichen Zusammenhänge wurden für alle Meßstellen im Meßquerschnitt (Abb. 2) bestätigt; das Verhältnis von quasistatischer Spannungsänderung zur Spannungsänderung aus Druckschlag ist jedoch naturgemäß von der Lage der Meßstelle zum Aufschlagpunkt der Welle abhängig. Dies wird durch die in Abb. 5 gezeigten zeitgleich in Meßebene A auftretenden Spannungsänderungen der Profile 1 bis 6 deutlich.

Die Profile 1 und 2 liegen im Bereich der ständigen Wasserspiegelauslenkung infolge Seegangs, und daher herrscht hier die zyklische Spannungsänderung mit der Wellenfrequenz vor. In der Nähe des Brechpunkts und besonders im Druckschlagbereich sind hingegen die aus dem Druckschlag resultierenden Beanspruchungen betragsmäßig größer als die zyklischen, wobei in der Nähe des Ruhewasserspiegels (SWL) die zyklischen Spannungsänderungen durch den Wellenauflauf bestimmt werden.

Für die Filterproblematik ebenso wichtig wie die absolute Größe der Schwellbeanspruchung sind die Spannungsänderungsraten. Diese sind die erste Ableitung der Spannungsänderung nach der Zeit, d.h. Spannungsänderungsgeschwindigkeiten. In Abb. 6 sind sie exemplarisch für die Spannungsänderungen in Abb. 4 gezeigt. Entsprechend den niederfrequenten Spannungsänderungen in Abb. 4 treten im Zeitraum quasistatischer Belastungsänderung nur relativ kleine Spannungsänderungsraten auf; im Zeitraum dynamischer Beanspruchung (infolge Druckschlags) kennzeichnen die bis zum 30-fach größeren Spannungsänderungsraten die örtlich innerhalb kürzester Zeit sich verändernden Spannungen.

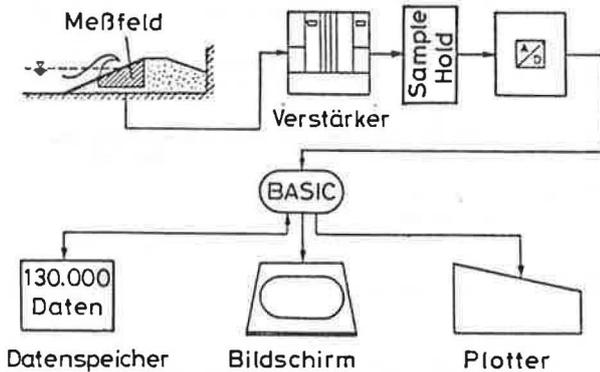


Abb.3: Konzeptioneller Aufbau der Datenerfassungsanlage

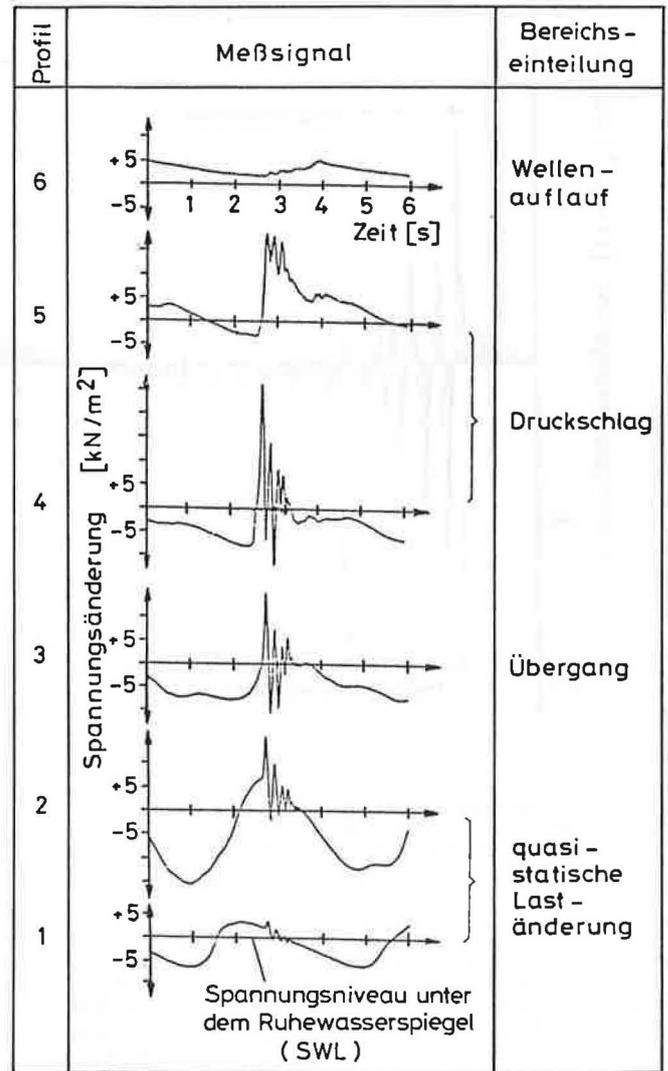


Abb.5: Spannungsänderungen in der Meßebeine A Meßprofile 1 bis 6, H=1,75 m und T=6,0 s

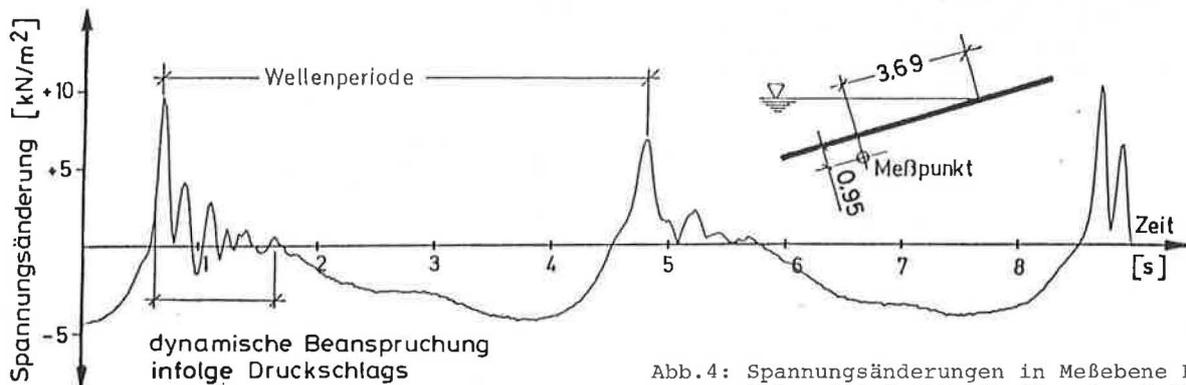


Abb.4: Spannungsänderungen in Meßebeine B, Meßprofil 3 (Abb.2) für eine Welle mit H=1,25 m und T=4,0 s

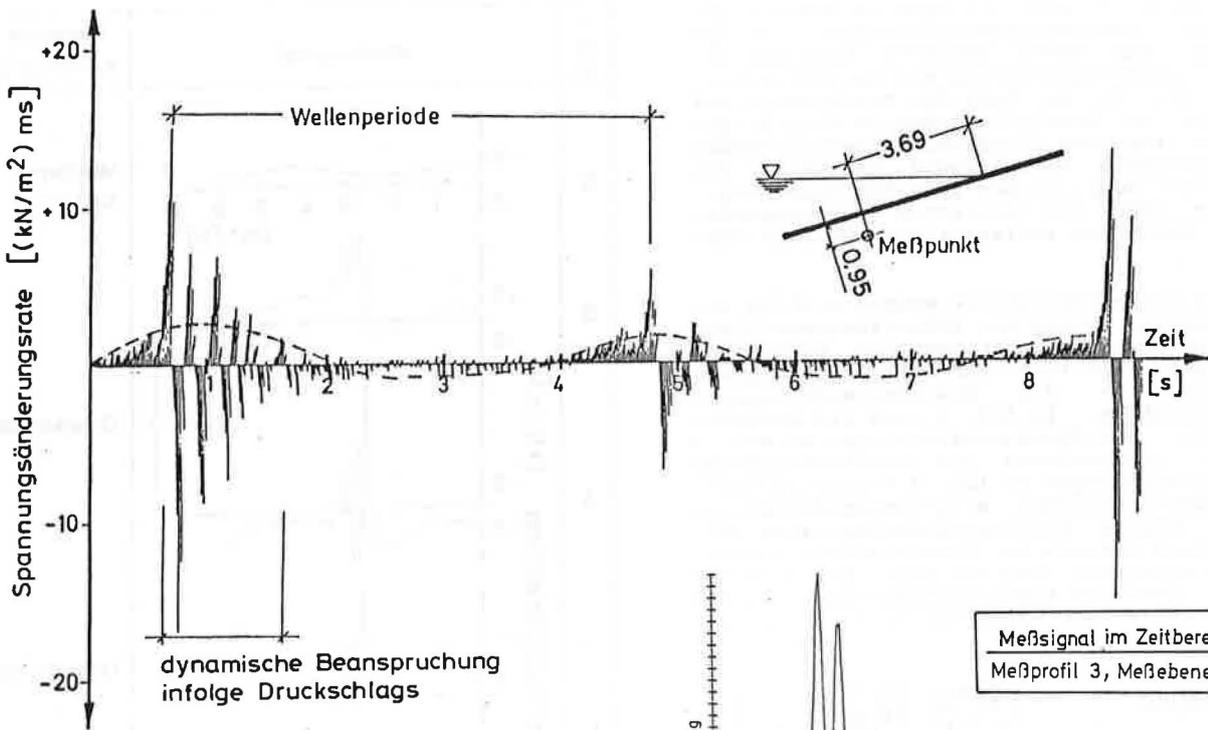


Abb.6: Spannungsänderungsrate der Spannungsänderung nach Abb.4, Meßebe B, Meßprofil 3 (Abb.2) für eine Welle mit  $H=1,25$  m und  $T=4,0$  s

Mit Hilfe der Frequenzanalyse (Fast Fourier Transformation, FFT) wird der Frequenzbereich dynamischer Beanspruchung bestimmt. Abb. 7 stellt eine charakteristische Beanspruchungsfolge im Bereich des Brechpunkts einer Welle dar. Abb. 8 enthält das Ergebnis einer FFT über diese im Zeitbereich dargestellte Meßsignalfolge. Im Anschluß an den Frequenzbereich quasistatischer Beanspruchung (hier: Wellenperiode  $T=4$  s - 0,25 Hz mit Oberschwingungen) folgt das Amplitudenspektrum der dynamischen Beanspruchung (2,5 Hz bis rd. 9 Hz). Das hier gezeigte qualitative Amplitudenspektrum ist charakteristisch für den dynamisch beanspruchten Bereich im Sandkern des untersuchten See- deichs.

FOLGERUNGEN FÜR DIE BEANSPRUCHUNG VON DECKWERK UND FILTER

FRANKE weist in (1) bereits darauf hin, daß bei der Gestaltung der Böschungsabdeckung von Seedeichen einander widersprechende Forderungen zu berücksichtigen sind. So ist einerseits wegen des immer möglichen Binnenwasserdrucks im Deichkern (bei schnell fallendem Außenwasserspiegel) ein offenes Deck-

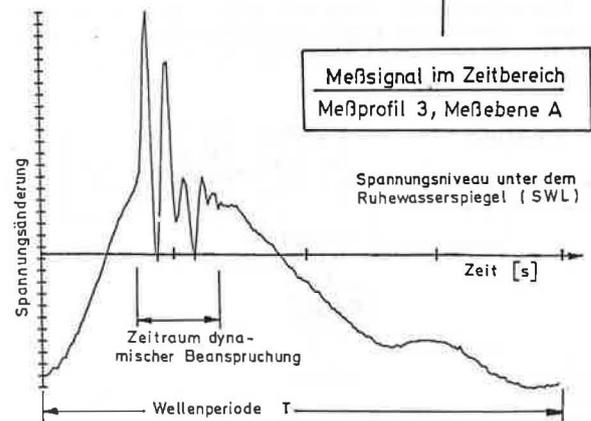


Abb.7: charakteristische Beanspruchungsfolge im Bereich des Brechpunkts einer Welle

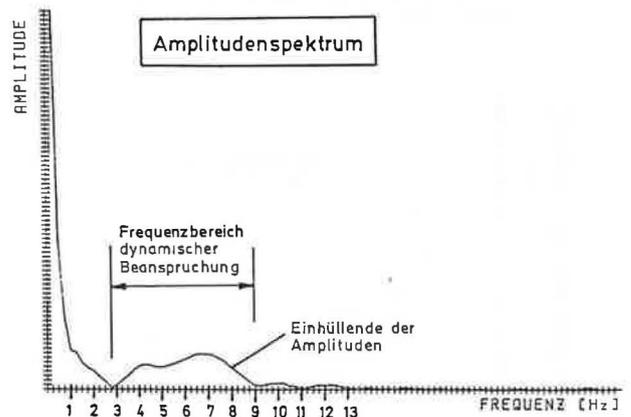


Abb.8: Amplitudenspektrum der in Abb.7 dargestellten Beanspruchungsfolge; unter Anwendung der Fast Fourier Transformation (FFT) ermittelt

werk mit darunter angeordnetem Filter zweckmäßig. Gegen diese Lösung wird jedoch stets eingewandt, daß in offenen Böschungsabdeckungen Druckschläge zu extremen Beanspruchungen führen können (3). In diesem Sinne wird z.B. bei (4) empfohlen, dichte Böschungsabdeckungen nur oberhalb vom Mittelteidehochwasser (MTHw) anzuordnen und die Deckwerke unterhalb dieser Marke durchlässig zu gestalten.

Im Seedeichbau werden Filter meist als Erdstoff-Geotextil-Verbundfilter ausgeführt; die verschiedenen Ausführungsformen haben sich durchaus bewährt. Gerade aber für die Wechselbeziehungen zwischen Geotextil und Erdstoff ergeben sich aus der vorstehend dargestellten Beanspruchung bei Seegang ganz neue, bisher nicht berücksichtigte Aspekte.

Wie gezeigt werden konnte, sind die Spannungsänderungen infolge Druckschlags dynamisch; über das Deckwerk wird die darunter befindliche Bettung erregt (impulsförmige Schwingung). Während dieser Schwingphase, d.h. mit jeder brechenden Welle wiederkehrend, ändert sich der Spannungszustand im Korngerüst des Erdstoffs. Die von Korn zu Korn übertragenen Kräfte ändern sich pulsierend innerhalb kürzester Zeit und werden wegen der von vornherein im Druckschlagbereich nur geringen Überlagerungsspannungen sogar gänzlich aufgehoben, d.h. die gegenseitige Stützung der Einzelkörner des Erdstoffs geht vorübergehend verloren.

Diese Erscheinung ist von seismischer und dynamischer Beanspruchung (z.B. beim Tiefenrütteln) bereits bekannt und führt zur Verflüssigung und als deren Folge zu Setzungsfließen.

Für die Filterproblematik ergibt sich jedoch aus der gleichzeitigen, unverminderten hydraulischen Beanspruchung eine gänzlich neue Bewertung der bekannten Bemessungskriterien. Mechanische Stabilität und ebenso hydraulische Wirksamkeit von Filtersystemen müssen bei Seegangsbeanspruchung auch dann gewährleistet sein, wenn die Erdstoffpartikel durch den Druckschlag ihren Reibungskontakt verlieren, den angreifenden Strömungskräften damit vorübergehend ohne Stützung ausgesetzt sind und gleichzeitig die Porenstruktur des verwendeten Geotextils deformiert ist. Filteruntersuchungen, die diese Beanspruchung berücksichtigen, liegen derzeit noch nicht vor, werden jedoch vereinzelt bereits in Angriff genommen (5).

## SCHRIFFTUM

- (1) Bröckamp, K.H., Seedeichbau in Theorie und Praxis, Vereinigung der Naßbaggerunternehmen e.V., Hamburg, 1976
- (2) Richwien, W., Wehner, Th., Entwicklung und Aufbau einer Versuchseinrichtung im Großen Wellenkanal, Hannover-Marienwerder, zur Ermittlung seegangserzeugter Beanspruchung von Böden, Wasser und Boden, Heft 11, S. 552-556, 1985
- (3) Führböter, A., Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen, Mitt. des Franzius Instituts der Universität Hannover, Heft 28, 1966
- (4) Rijkswaterstaat Directie, Waterhuishouding en Waterbeweging, Voorlopig Rapport 1961, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Essen, 1961
- (5) SFB 205, Küsteningenieurwesen, Finanzierungsantrag 1986-88, Sonderforschungsbereich 205, Universität Hannover, Hannover, 1985