

## Binnenwasserstraßen – Entwurf, Bau, Betrieb und Unterhaltung (1.2)

### Wirksamkeit von Kornfiltern unter instationären Strömungsbedingungen

**Dr.-Ing. Tilmann Holfelder**  
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

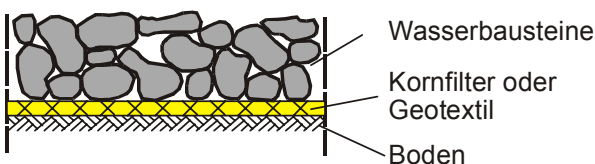
**Dr.-Ing. Jan Kayser**  
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

**Dipl.-Ing. Stefan Hoch**  
Universität Karlsruhe (TH), Institut für Boden- und Felsmechanik, Karlsruhe

#### 1. Einleitung

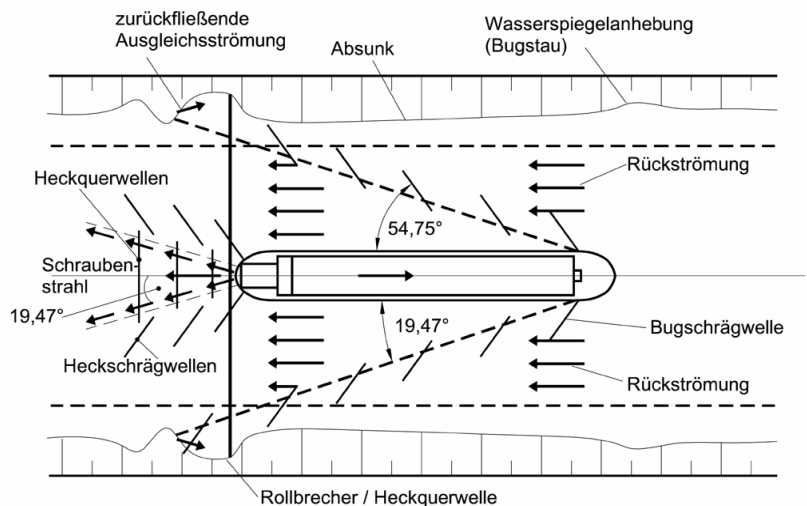
Die Böschungen und Gewässersohlen der Schifffahrtskanäle und Flüsse müssen gegen zahlreiche hydraulische Einwirkungen geschützt werden. Als Böschungs- bzw. Sohlensicherung wird je nach den lokalen Gegebenheiten eine durchlässige oder dichte Auskleidung des Gewässers ausgeführt, das so genannte Deckwerk. Ein dichtes Deckwerk verhindert den Wasseraustausch zwischen Wasserstraße und Untergrund durch eine dichte Deckschicht oder ein Weichdichtung. Ein durchlässiges Deckwerk ermöglicht im Gegensatz dazu den ungehinderten Wasseraustausch zwischen Untergrund und Wasserstraße. Es besteht meist aus einer Deckschicht aus Wasserbausteinen und einem darunter liegenden geotextilen oder mineralischen Filter, welcher die Filterstabilität zwischen Untergrund und Deckschicht gewährleisten muss (s. Bild 1).

Die durchlässigen Deckwerke sind in der Regel einerseits einer stationären Strömungsbelastung durch einen Unterschied zwischen Grundwasser- und Kanalwasserstand ausgesetzt. Andererseits resultieren aus dem bei der Vorbeifahrt eines Schiffes hervorgerufenen schnellen Absink wiederholt zusätzliche kurzzeitige dynamische Druckänderungen (Bild 2). Diese können im anstehenden Boden insbesondere direkt unter dem Filter kurzzeitig zu großen Porenwasserüberdrücken und hohen hydraulischen Gradienten führen. Die Ursache hierfür ist in fein verteiltem Gas zu sehen, welches das Porenwasser auch im permanent überstauten Bereich enthält. Schon geringe Gasanteile von weniger als 1% verändern vor allem die Kompressibilität der Porenwassers signifikant. Die Entstehung und Ermittlung des Porenwasserüberdruckes wird im nächsten Kapitel erläutert.



**Bild 1:** Aufbau von durchlässigen Deckwerken an Kanälen

Für die Bemessung der Filter der Deckwerke wird vorwiegend auf geometrische und hydraulische Bemessungskriterien zurückgegriffen, die auf statischen Belastungsansätzen beruhen und für geringe hydraulische Gradienten ( $i < 9$ ) entwickelt wurden. Für die deutschen Kanäle erfolgt die Bemessung der Filter nach den Angaben des Merkblattes der BAW „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen“ (MAK) [3] und dem darin verwendeten Ansatz nach Cistin/Ziems [4]. Hierbei ist jedoch noch weitgehend offen, inwieweit der Einfluss aus dynamischen Belastungen in den bestehenden Kriterien berücksichtigt werden muss oder ob vollkommen neu zu definierende Bemessungskonzepte für die geschilderte Fragestellung erforderlich sind. Sind die vorhandenen Filterkriterien für diese Randbedingungen nicht ausreichend, so kann es durch einen unplanmäßigen Materialtransport unter Umständen zu erheblichen Bodendeformationen kommen. Vor diesem Hintergrund wurden an der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bereits seit einigen Jahren Untersuchungen zum Einfluss dynamischer Strömungsvorgänge auf Bodendeformationen durchgeführt [5] [6], an welche die hier dargestellten Forschungsergebnisse anknüpfen.



**Bild 2:** Belastungen auf Böschung und Gewässersohle durch die Schifffahrt [1]

Dieser Beitrag stellt zunächst die Entstehung der Porenwasserüberdrücke und ihre Auswirkungen auf die Filterbemessung dar. Im nächsten Abschnitt werden die durchgeführten Laborversuche vorgestellt und anschließend die wesentlichen Ergebnisse erläutert.

## 2 Entstehung von Porenwasserüberdrücken im 3-Phasen Modell durch den schnellen Wasserspiegelabsink

### 2.1 Ursache des Porenwasserüberdruckes durch den schnellen Wasserspiegelabsink

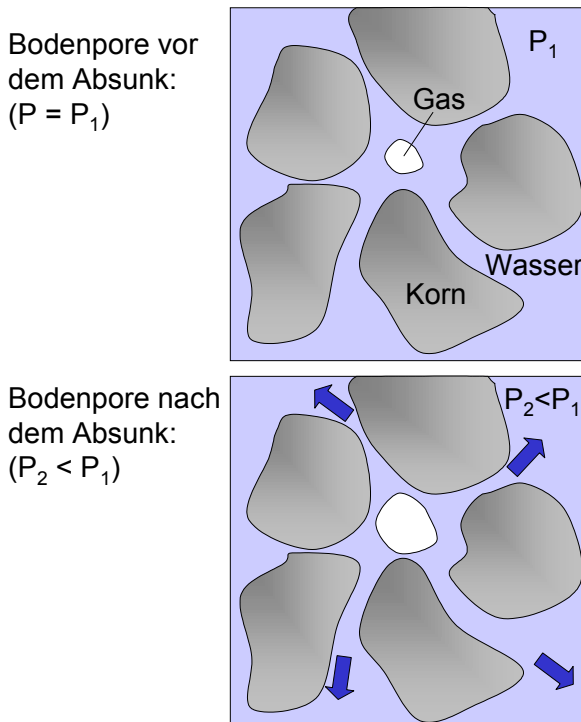
Der Porenraum im Boden unterhalb des Grundwasserspiegels wird in der Regel als vollständig wassergesättigt mit der flüssigen (Wasser) und festen Phase (Boden) angesehen. Besteht ein unmittelbarer hydraulischer Kontakt zwischen Gewässer und Porenwasser, so müsste eine Wasserspiegeländerung im Gewässer, wie sie z.B. durch eine Welle hervorgerufen wird, eine unmittelbare Druckänderung im Porenwasser bewirken,

da das vollständig gesättigte Porenwasser inkompressibel ist.

Bei Naturmessungen konnte jedoch ein gedämpfte Druckreaktion beobachtet werden [2]. Die Ursache hierfür sind im natürlichen Porenwasser eingeschlossene, mikroskopisch kleine Gasblasen, die sowohl aus Luft als auch aus Gasen von bakteriellen Abbauprozessen bestehen können. Hierdurch verändert sich das physikalische Verhalten von Wasser schon ab einem Gasanteil von 1 % erheblich, da nun die Eigenschaften der dritten gasförmigen Phase mit berücksichtigt werden müssen.

Maßgeblich wird zum Einen das Gesetz von Boyle-Mariotte, welches aussagt, dass das Produkt aus Gasdruck und Gasvolumen eines idealen Gases bei isothermen Randbedingungen konstant ist. D.h. bei einem Druckabfall, wie er z.B. bei einem Wasserspiegelabsink stattfindet, dehnt sich das Gas aus. Zum Anderen muss das Gesetz von Henry berücksichtigt werden, welches die Löslichkeit eines Gases in einer Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Druck beschreibt. Bei konstanter Temperatur reduziert sich bei einem geringer werdenden Druck die gelöste Gasmenge, d.h. bei einem Wasserspiegelabsink wird ebenfalls Gas frei. Die Konsequenz daraus ist, dass das Porenwasser nicht mehr als ideale, inkompressible Flüssigkeit betrachtet werden kann, sondern als Gas-Wassergemisch eine deutlich höhere Kompressibilität hat.

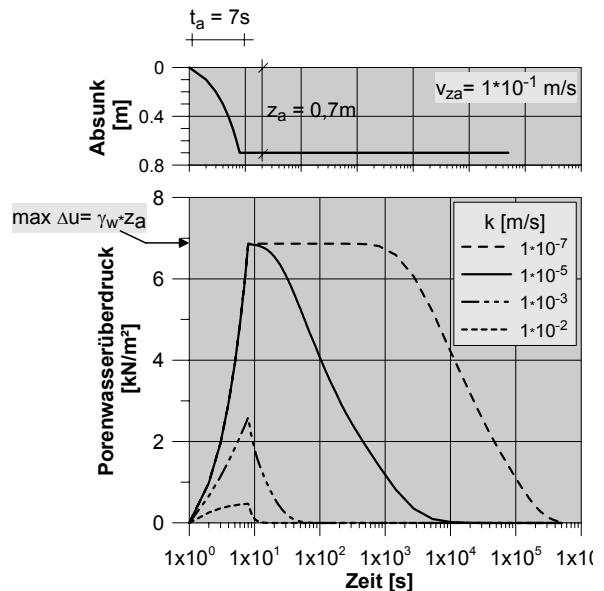
Betrachtet man nun eine Bodenpore, die eine kleine Gasblase enthält, so will sich diese Gasblase bei einer Druckreduktion im Porenwasser ausdehnen. Die Ausdehnung der Gasblase wiederum bewirkt eine Verdrängung von Porenwasser aus der Bodenpore (s. Bild 3). Deshalb ist der Druckausgleich im Porenwasser stets mit einem Massentransport verbunden, d.h. einer zum geringeren Druckpotenzial gerichteten Porenwasser-



**Bild 3:** Entstehung des Porenwasserüberdrucks

strömung. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen dem Massentransport und dem Druckpotenzial sind diese Strömungsvorgänge stark instationär.

Die Volumenausdehnungsgeschwindigkeit der Gasblase ist nach Boyle-Mariotte direkt proportional zur Druckänderungsgeschwindigkeit. Dementsprechend muss der Wassertransport aus der Pore mindestens der Druckänderungsgeschwindigkeit entsprechen, um einen Porenwasserüberdruck zu vermeiden. Ist die Druckänderungsgeschwindigkeit  $v_{za}$  ( $v_{za} = \text{Absink } z_a / \text{Absinkzeit } t_a$ ) also höher als die hydraulische Durchlässigkeit des Bodens ( $v_{za} \geq k$ ), entsteht ein Porenwasserüberdruck (s. Bild 4). Der Porenwasserüberdruck ist der über den hydrostatischen Porenwasserdruck hinausgehende Wasserdruck in den Poren eines Erdstoffes. Die Entstehung des Porenwasserüberdrucks ist in hohem Maße instationär, d.h. die maximalen Drücke treten räumlich und zeitlich nur sehr kurz auf.



**Bild 4:** Abhängigkeit des Porenwasserüberdrucks von der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodens

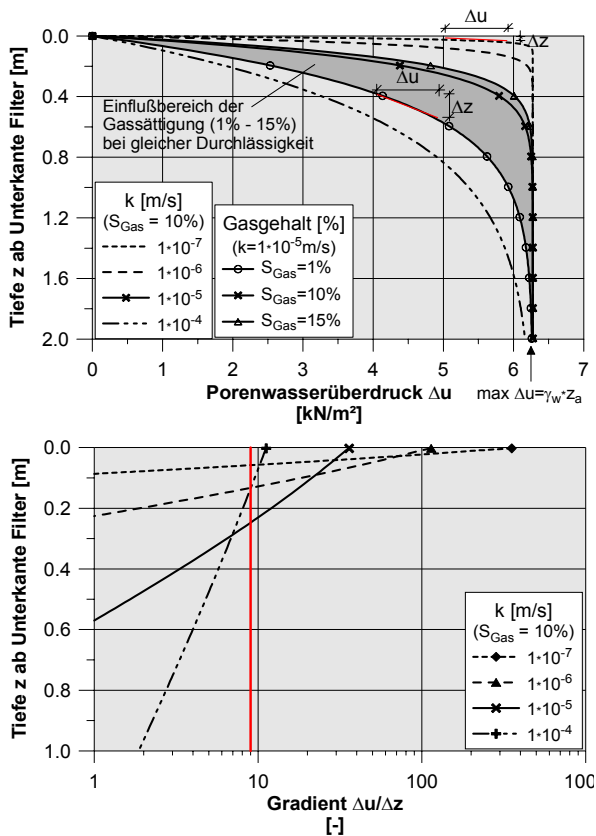
## 2.2 Größe und Verlauf des Porenwasserüberdrucks

Die Größe und der Verlauf des Porenwasserüberdrucks infolge eines schnellen Wasserspiegelabsinkes werden im Wesentlichen vom Absink  $z_a$  und von der Absinkzeit  $t_a$  (s. Bild 4) sowie von der Durchlässigkeit des Bodens  $k$  und der Kompressibilität des Wasser-Bodengemisches (inkl. Gasanteil) im Bereich direkt unter dem Filter bestimmt.

Der Porenwasserüberdruck nimmt im Boden mit der Tiefe  $z$  reziprok exponentiell zu und nähert sich maximal asymptotisch an den Wasserdruck aus dem maximalen Wasserspiegelabsink  $z_a$  an ( $\max \Delta u = \gamma_w \cdot z_a$ , Bild 5, oben). In gering durchlässigen Böden entsteht der maximale Porenwasserüberdruck in geringer Tiefe  $z$  von wenigen Zentimetern, dementsprechend können die hydraulischen Gradienten  $i = \Delta u / \Delta z$  dort auch sehr groß werden (Bild 5, unten). Dieser Fall ist für die Untersuchung der Wirksamkeit der Kornfilter besonders relevant, da dann die Grenzen der Gültigkeit der vorhandenen Filterkriterien überschritten werden. Durch die häufig wiederkehrende Belastung des Filters an der

Grenzschicht kann so bei nicht kohäsiven Böden ein Materialtransport in den Filter hinein hervorgerufen werden, welcher zu einem Versagen des Filters führen könnte. Bindige Böden mit geringer Kohäsion sind hiervon in der Regel nicht betroffen.

Bei den an den Wasserstraßen üblichen Wassertiefen von 4 m bis 10 m sind Sättigungsgrade zwischen 80 % und 99 % häufig anzutreffen. Die Bestimmung des tatsächlichen Gasgehaltes im Boden ist ausgesprochen schwierig. Bisher ist keine direkte Bestimmungsmethode bekannt und eine indirekte Bestimmung, z.B. durch Messung der Kompressibilität des Porenwassers im



**Bild 5:** Beispiel eines Verlaufes des maximalen Porenwasserüberdruckes bei unterschiedlichen Durchlässigkeiten und Gasgehalten und der daraus resultierenden Gradienten  $i = \Delta u / \Delta z$

Triaxialgerät bedarf einer Probenentnahme, bei der eine Störung der Probe nahezu nicht zu vermeiden ist. Wie die Ergebnisse numerischer Berechnungen zeigen (Bild 5, oben), ist der Einfluss des Gasanteils auf den Porenwasserüberdruck letztlich nicht größer als der Fehler, der durch eine ungenaue Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit um eine Zehnerpotenz entsteht. Aufgrund der Inhomogenität des Baugrundes ist der Durchlässigkeitsbeiwert häufig mit Ungenauigkeiten in dieser Größenordnung belegt. Der tatsächliche Gasgehalt im Boden ist demgegenüber nicht so entscheidend.

### 3. Laborversuche

#### 3.1 Zielstellung

Erste Untersuchungen zu den Porenwasserdruckverhältnissen an der Grenze zwischen Filter und Untergrund wurden mit einer in der BAW entwickelten Ver-

suchsanlage zur Simulation von Wechseldurchströmungen durchgeführt und veröffentlicht [5]. Im Vorlauf zu weiteren Versuchen in der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) wurden mit zwei weiteren Versuchsanlagen Untersuchungen im Hinblick auf unterschiedliche Fragestellungen durchgeführt.

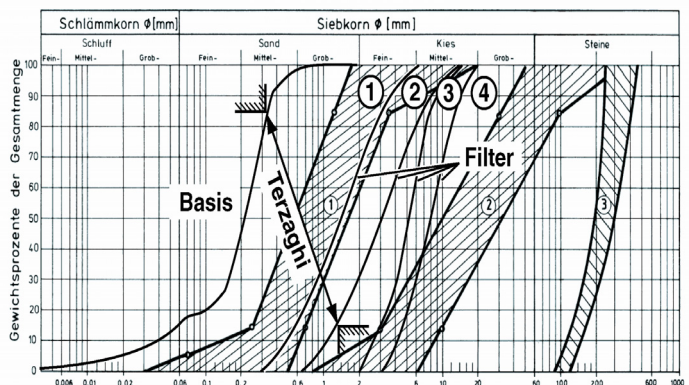
- An dem Versuchsstand „Filterversuchsanlage“ (FVA) wurden stationäre Filterversuche bei hohen hydraulischen Gradienten durchgeführt, um den Einfluss des Gradienten auf das Erosionsverhalten zu untersuchen.
- An der „Druckwechselversuchsanlage“ (DWA) wurden vereinfachte Filterversuche unter dynamischen Druckbelastungen durchgeführt, die den Sunk- und Schwallwellen bei einer Schiffsvorbeifahrt nachempfunden sind. Die Probe unterlag hierbei keiner Grundströmung.

Die Zielstellung der Versuche bestand in der Klärung der Fragestellung, ob die in einer Filter-Basis-Kombination stattfindenden erosiven Vorgänge vorrangig durch einen hohen hydraulischen Gradienten oder durch dynamische Belastungen bestimmt werden. Des Weiteren sollte eine Datengrundlage geschaffen werden für die Fragestellung, ob im Hinblick auf eine dynamische Belastung bestehende geometrische Filterkriterien, wie z.B. die von Terzaghi [8] oder Cistin/Ziems [9], auch bei hohen hydraulischen Gradienten (stationärer Zustand) Gültigkeit besitzen. Das hierfür konzipierte Untersuchungsprogramm sowie die eingesetzten Versuchsanlagen werden nachfolgend näher beschrieben.

#### 3.2 Untersuchte Materialkombinationen

Die Auswahl der Korngrößenverteilungen der untersuchten Filter-Basis-Kombinationen orientiert sich an den zweistufigen Standardfiltern nach MAK ([3], vgl. auch Körnungsbänder in Bild 6). In den unterschiedlichen Filter-Basis-Kombinationen wurde unter Variation des Filters jeweils das gleiche Basismaterial verwendet.

Im ersten Versuch wurde zur gewählten Basis das Filterverhalten zu Filter 1 untersucht. Gemäß dem Filterkriterium nach Terzaghi ergibt sich für  $d_{15,Filter} / d_{85,Basis}$  ein Wert von  $1,8 < 4$  und weist damit Filterstabilität auf. In Versuch 2 wurde Filter 2 so gewählt, dass das Filterkriterium  $d_{15,Filter} / d_{85,Basis} = 4$  nach Terzaghi erfüllt ist.

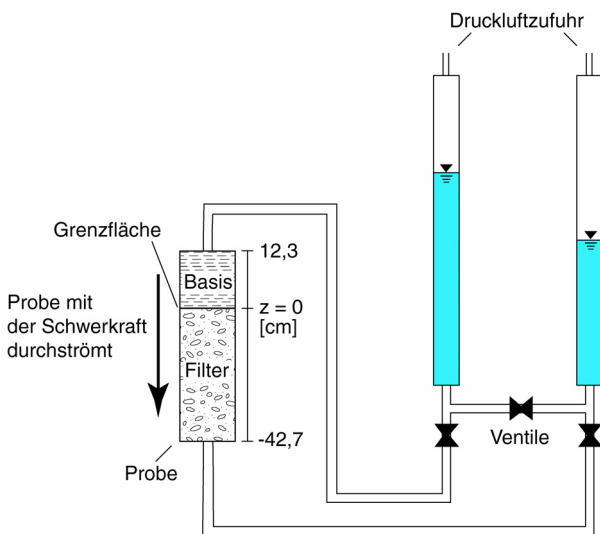


**Bild 6:** Korngrößenverteilungen der untersuchten Böden im Vergleich mit den Körnungsbändern der Filterstufen 1 und 2 des Zwei-Stufen-Filters nach MAK [3] und den Wasserbausteinen der Klasse II/III (Körnungsband 3)

Unter Berücksichtigung von Filter 3 resultiert für das Filterkriterium nach Terzaghi  $d_{15,Filter}/d_{85,Basis} = 9$ . Diese Materialkombination wurde gewählt, da nach Sheppard et al. [7] für  $d_{15,Filter}/d_{85,Basis} = 9$  die Verhältnisse im Hinblick auf Materialbewegung grenzwertig werden. Die vierte Filter-Basis-Kombination mit Filter 4 besitzt keine Filterstabilität ( $d_{15,Filter}/d_{85,Basis} = 13 > 4$ ). Sie stellt somit einen Extremfall dar.

### 3.3 Untersuchungen mit der Filterversuchsanlage (FVA)

In der Filterversuchsanlage wird eine Filter-Basis-Kombination als repräsentativer Ausschnitt des Unterbaus eines Deckwerks hydraulischen Belastungen ausgesetzt. Bild 7 zeigt eine schematische Darstellung der FVA. Wesentlich ist hier, dass mittels Druckluft eine Potenzialdifferenz zwischen zwei Wasservorratsbehältern erzeugt werden kann, wodurch eine Durchströmung der Probe in Richtung der Schwerkraft realisiert wird. Zur Erfassung des Potenzialabbaus innerhalb der zylindrischen Probe ( $h/d = 65 \text{ cm}/15 \text{ cm}$ ) sind insgesamt 10 Piezometerschläuche im Probeninneren angeordnet. Die oben aufliegende Basis besaß in allen Versuchen eine Stärke von 12,3 cm. Darunter wurde das Filtermaterial angeordnet. Die Grenzfläche zwischen beiden Schichten dient in den grafischen Darstellungen der Messergebnisse als Bezugsniveau.



**Bild 7:** Schematische Darstellung der FVA

Der Einbau und Ablauf der Versuchsdurchführung war bei allen Versuchen identisch. Während eines Versuchs wurden die Proben mit jeweils drei unterschiedlichen Druckdifferenzen in ansteigender Reihenfolge belastet.

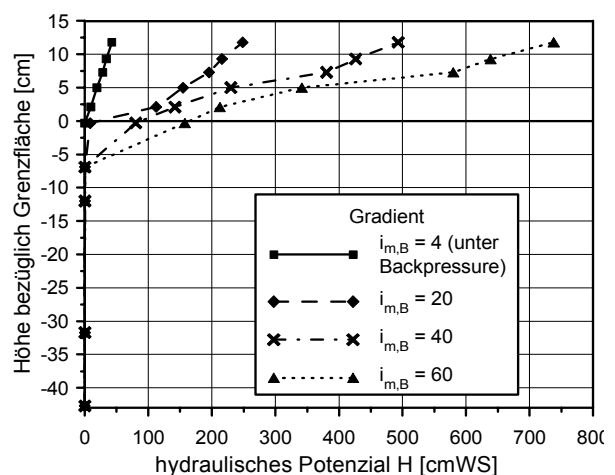
Versuch	$d_{15,F}/d_{85,B}$	$i_{m,B}$ [-]	$\gamma_B$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_F$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$n_B$ [-]
VF1	1,8	20, 40, 60	16,0	17,5	0,40
VF2	4		15,7	16,9	0,41
VF3	9		15,6	16,8	0,41
VF4	13		15,6	16,8	0,41

**Tabelle 1:** Durchgeführte Versuche an der FVA

Diese wurden so gewählt, dass sich in der Basis ein mittlerer Gradient von  $i_{m,B} = 20, 40$  und  $60$  einstellte. Die wichtigsten Kenngrößen der vier Versuche sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

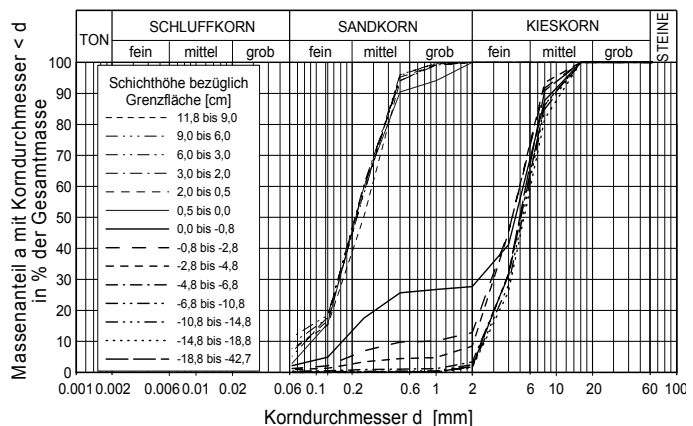
Während der Versuche VF1 und VF2 stellte sich bei allen Belastungsstufen ein quasi linearer Potenzialabbau über die Höhe der Basis ein. Im Filtermaterial fand kein Potenzialabbau statt.

Für Versuch VF3 ist die Potenzialverteilung entlang der Probe für die unterschiedlichen Belastungszustände in Bild 8 dargestellt. Man erkennt, dass bei einem mittleren Gradienten von  $i_{m,B} = 20$  der Potenzialabbau noch vollständig in der Basis stattfand. Bei  $i_{m,B} = 40$  und  $i_{m,B} = 60$  hingegen wurden ca. 20 % des Gesamtpotenzials erst unterhalb der Grenzfläche im Filter abgebaut.



**Bild 8:** Potenzialverteilungen in Versuch VF3 bei unterschiedlichen Belastungszuständen

Nach Versuchsende wurde die Probe jeweils schichtweise ausgebaut sowie eine Anzahl von Siebanalysen durchgeführt. Das entsprechende Ergebnis für VF3 ist in Bild 9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bis zu einer Tiefe von  $z = -4,8 \text{ cm}$  unterhalb der Grenzfläche eine Zunahme von Feinmaterial aus der Basis im Filtermaterial zu verzeichnen war. Demnach bildete sich ein Filterkuchen aus. Ein weiteres Anzeichen für Kornumlagerung ist eine Setzung der Basis um 5 mm während des Versuchs. Im Gegensatz dazu fanden bei den Versuchen VF1 und VF2 keine Setzungen statt.



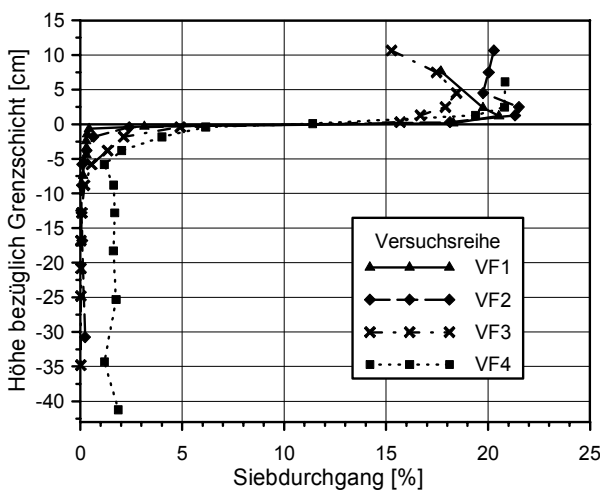
**Bild 9:** Schichtweise ermittelte Korngrößenverteilungen nach abgeschlossenem Filterversuch VF3

Der Versuch VF4 hielt der aufgegebenen Belastung nicht stand. Bis Versuchsende ( $i = 60$ ) steigerte sich hier der Potenzialabbau im Filter auf 80 %. Die Hälfte des Basismaterial hatte sich über den gesamten Filter verteilt bzw. in einen darunter angeordneten Sandfang umgelagert.

Eine vergleichende Beurteilung der durchgeführten Versuche bezieht sich an dieser Stelle vor allem auf die Frage, ob und wie ein Versagen des Filters aufgetreten ist. Dabei hielten die Filter bei den Versuchen VF1 und VF2 mit einem Abstandsverhältnis  $d_{15, \text{Filter}}/d_{85, \text{Basis}} = 1,8$  bzw. 4 den Belastungen einer stationären Durchströmung mit Gradienten bis  $i = 60$  stand. Bei einem Abstandsverhältnis von 13 versagte der Filter wie beschrieben. Bei einem Abstandsverhältnis von 9 hielt der Filter durch eine Blockierung des Basismaterials im Filter den Belastungen stand.

Das zuvor beschriebene Ergebnis wird durch Bild 10 bestätigt. Das Diagramm zeigt den über die Probenhöhe aufgetragenen Fraktionsanteil mit  $d < 0,125$  mm der schichtweise ausgebauten Proben. Da der kleinste Korndurchmesser des feinen Filters 1 etwa 0,3 mm beträgt (vgl. Bild 6), sollte entlang der Probenhöhe im Bereich des Filtermaterials (für  $z < 0$ ) kein Fraktionsanteil mit  $d < 0,125$  mm vorhanden sein. Diese im Filter gefundenen Fraktionsanteile müssen daher aus der darüber liegenden Basis stammen.

Wie aus Bild 10 ersichtlich wird, weisen die beiden Versuche VF1 und VF2, die beide ein Abstandsverhältnis bis 4 besitzen, in der Tat keinen Fraktionsanteil mit  $d < 0,125$  mm im Bereich des Filters auf. Für Versuch VF4 mit einem Abstandsverhältnis von 13 hingegen besitzt der Filter über die gesamte Höhe einen Mindestanteil von Körnern mit  $d < 0,125$  mm von fast zwei Gew.-%. Die Blockierung des Filters mit Basismaterial im Versuch VF3 zeigt sich in Bild 10 besonders deutlich. Ab einer Tiefe von  $z = -10$  cm ist ein Fraktionsanteil mit Korngrößen von  $d < 0,125$  mm - und somit die Existenz von Basismaterial - praktisch nicht mehr nachweisbar.



**Bild 10:** Über die Probenhöhe aufgetragener Fraktionsanteil  $d < 0,125$  mm

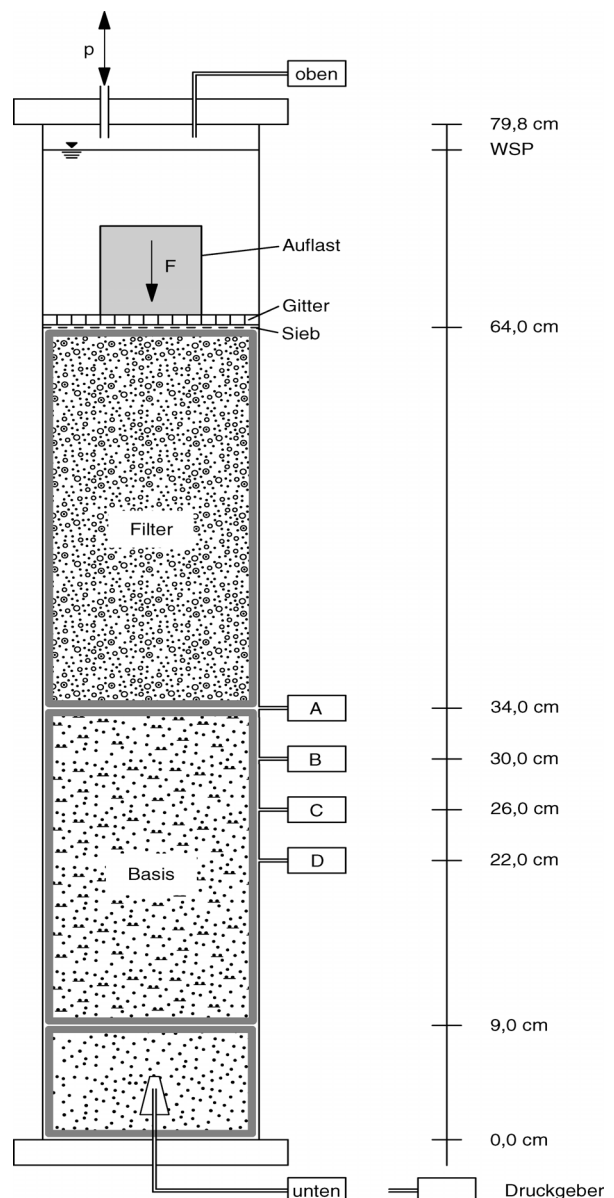
Vor dem Hintergrund der beschriebenen Versuchsergebnisse wird ersichtlich, dass bei den verwendeten Materialien die herkömmlichen geometrischen Filterkriterien, wie z.B. das Filterkriterium von Terzaghi auch

bei hohen stationären hydraulischen Gradienten von bis zu  $i = 60$  Gültigkeit hat.

### 3.4 Untersuchungen mit der Druckwechselsversuchsanlage (DWA)

Die DWA wurde mit dem Ziel errichtet, Bodenproben als repräsentativen Ausschnitt des Unterbaus eines Deckwerks - bestehend aus Filter und Basis - zyklischen Druckschwankungen auszusetzen, um somit Sunk- und Schwallwellen von Schiffsvorbeifahrten zu simulieren.

Die Simulation von Sunk und Schwall wurde durch zyklisch wechselnden Luftdruck oberhalb des Wasserspiegels erzeugt. Bild 11 zeigt den Probenbehälter als Systemskizze mit Positionen von Druckaufnehmern entlang der Probe (A, B, C und D) sowie von Druckaufnehmern an den Probenenden (oben und unten). Durch eine Plexiglaswandung der DWA war es möglich, eventuell stattfindende Erosionsvorgänge visuell mittels fotografischer Aufnahmen zu beobachten.



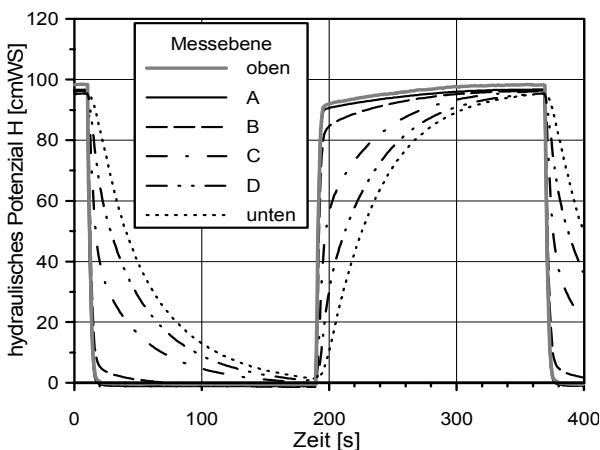
**Bild 11:** Probenbehälter der DWA mit Messpunkten zur Erfassung des hydraulischen Potenzial

Tabelle 2 zeigt die maßgebenden Parameter der durchgeführten Versuche. Ein Zyklus eines Lastwechsels dauerte 6 Minuten (Bild 12). Dabei wurde innerhalb von 5 Sekunden ein Luftdruck oberhalb der Probe von 100 cm WS aufgebracht und im Anschluss daran 3 Minuten lang gehalten. Nachfolgend wurde die Probe innerhalb von 5 Sekunden entlastet und dann wiederum 3 Minuten so belassen. Um eine Langzeitwirkung zu simulieren, wurde die Probe für eine Dauer von ca. 200 h mit insgesamt 2000 Lastzyklen belastet. Dies entspricht einem Belastungszeitraum für ein Uferdeckwerk von etwa 5 Jahren.

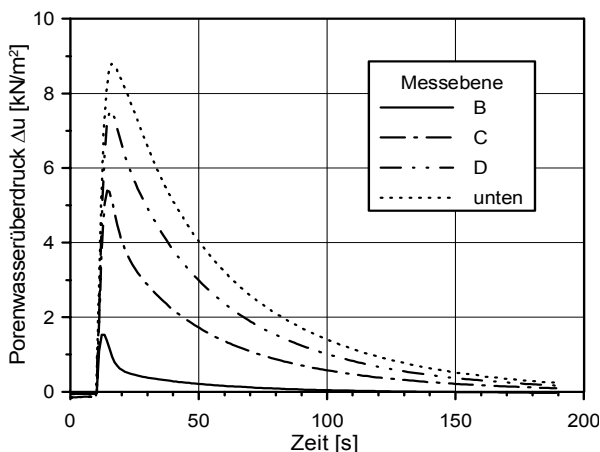
Versuch	Abstandsverhältnis $d_{15,Filter} / d_{85,Basis}$	Belastung
VD1	1,8	2000 Lastwechsel je 100 cm WS
VD2	4	2000 Lastwechsel je 100 cm WS
VD4	13	2000 Lastwechsel je 100 cm WS

**Tabelle 2:** Durchgeführte Versuche an der DWA

Einen Einblick in die Versuchsergebnisse liefern Bild 12 bis Bild 15 für den Versuch VD4 und den 2000sten Lastzyklus. In Bild 12 ist über einen vollständigen Zyklus das Potenzial an den Messstellen dargestellt. Durch



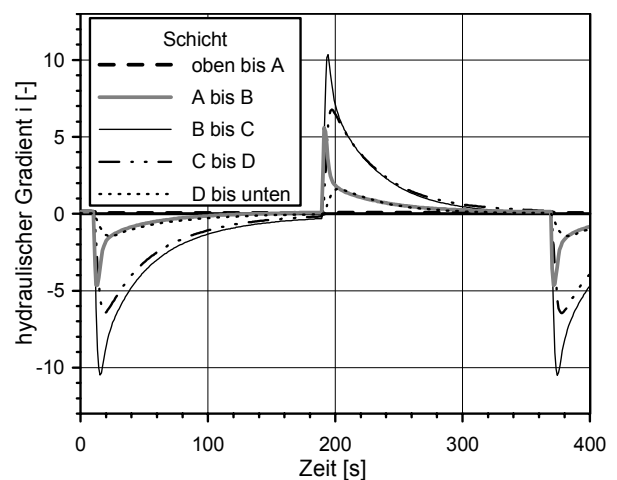
**Bild 12:** Zeitlicher Verlauf des hydraulischen Potentials H [cm WS] oberhalb und unterhalb der Probe sowie an den Messstellen entlang der Probe nach 2000 Zyklen



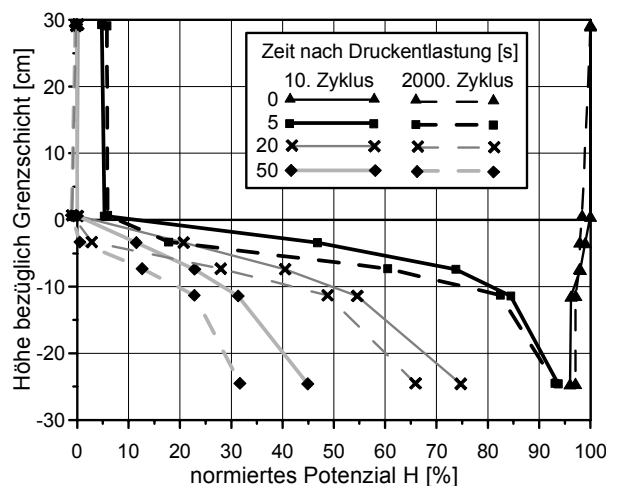
**Bild 13:** Zeitlicher Verlauf des Porenwasserüberdrucks  $\Delta u$  [kN/m<sup>2</sup>] an den Messstellen entlang der Probe nach 2000 Zyklen

das in den Poren vorhandene Gas tritt eine Dämpfung des Potenzialabbaus auf, da das Porenwasser als kompressible Flüssigkeit angesehen werden muss. Am unteren Ende des Probenbehälters wird die Potenzialänderung deutlich verzögert registriert, und erreicht erst nach etwa 3 Minuten etwa das am oberen Ende vorgegebene Potenzial, kurz bevor der nächste Druckwechsel stattfindet. In Bild 13 ist der Porenwasserüberdruck in der Basis als Differenz aus dem am Punkt A und den an den darunter liegenden Aufnehmern gemessenen Drücken dargestellt. Hieraus lässt sich auch der zeitliche Verlauf der hydraulischen Gradienten ermitteln, die in den unterschiedlichen Tiefen wirksam sind (Bild 14).

In Bild 15 wird für unterschiedliche Zeitzustände bezogen auf den Zeitpunkt der Druckentlastung der Potenzialverlauf über die Probenhöhe gezeigt.



**Bild 14:** Zeitlicher Verlauf der hydraulischen Gradienten  $i$  [-] zwischen den einzelnen Messpunkten nach 2000 Zyklen



**Bild 15:** Potenzialverteilung entlang der Probe nach 10 und 2000 Zyklen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Ein vollständiges Versagen der Filter-Basis-Kombination wurde in keinem der Versuche beobachtet. Im Versuch VD4 wurde jedoch in den oberen 2 cm der Basis eine Durchmischung von Filter- und Basismaterial festgestellt. Hierdurch tritt der maximale hydraulische Gradient nach 2000 Lastzyklen nicht mehr wie zu Beginn des Versuches zwischen den Punkten A und B, sondern zwischen den Punkten B und C auf (s. Bild 14).

Bei gleichzeitiger Durchströmung des Gesamtsystems, hätte sich hieraus vermutlich ein Versagen des Filters ergeben.

Anhand der Ergebnisse konnte die Funktionstüchtigkeit der Druckwechselversuchsanlage nachgewiesen werden. In mittlerweile durchgeführten Versuchen mit feinerem Basismaterial (Schluff) und demzufolge stärkerer Systemdämpfung konnten auch hydraulische Gradienten bis  $i = 15$  nachgewiesen werden.

Der Entstehung von Porenwasserüberdrücken bei einem schnellen Wasserspiegelabsenk durch den Einfluss von Luft in den Poren konnte mit der Versuchsanlage nachgewiesen werden.

#### **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Die vorgestellten Laborversuche zeigen, dass Filter-Basis-Kombinationen unter instationärer Durchströmung besonderen Mechanismen ausgesetzt sind, die zu Bodenumlagerungen führen können. Die Filterversuche mit hohen stationären hydraulischen Gradienten haben die grundsätzliche Eignung der Anlage zur Untersuchung der Filtersicherheit von Filter-Basis-Kombinationen unter Beweis gestellt. Bei den bisherigen Untersuchungen konnten sowohl Abstandsverhältnisse von Filter-Basis-Kombinationen identifiziert werden, ab denen erste Kornumlagerungen stattfinden, als auch solche, die auch bei hohen Gradienten filterstabil waren. Es zeigte sich, dass das Filterkriterium nach Terzaghi auch für hohe Gradienten bei stationärer Durchströmung bei den verwendeten Materialien Gültigkeit hat. Darüber hinaus war es möglich, die hydraulischen Bedingungen innerhalb der Probe, die ein Versagen des Filters ankündigten - und letztlich auch auslösten - qualitativ wie quantitativ zu beobachten.

Bei den Versuchen an der DWA konnten auf Basis visueller Beobachtungen Kornumlagerungen identifiziert werden, die allerdings nicht zu einem Versagen im Sinne eines hydraulischen Durchbruches führten, sondern sich vielmehr in einem Eintrag von Basismaterial in den Filter äußerten. Eine gleichzeitige Durchströmung der Probe hätte jedoch vermutlich zu einem Versagen des Filters geführt. Die Ausbildung einer Fließwechselzone sowie von hydraulischen Gradienten bis  $i = 15$  in der Basis konnten messtechnisch nachgewiesen werden.

In Zukunft sollen mit einer vollständig überarbeiteten Wechseldurchströmungsanlage vergleichbare Versuche durchgeführt werden, in denen eine in der Realität normalerweise vorhandene Grundströmung aus der Böschung in Richtung offenes Gewässer abgebildet werden kann. Durch Überlagerung dieser Grundströmung mit den schiffsinduzierten Wellen werden im Bereich der Grenzfläche höhere Gradienten erwartet. Des Weiteren kann an dieser Anlage durch Aufbringen eines hohen Systemdruckes der Einfluss der Bodenluft auf die Druckausbreitung verhindert werden, und so systematisch vergleichende Versuche durchgeführt werden. Über das resultierende Systemverhalten wird berichtet werden.

#### **Literatur**

- [1] GBB: Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 78, Karlsruhe, 2004
- [2] KÖHLER, H.-J.: Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 66, S. 155 – 174, Karlsruhe 1989
- [3] MAK: Merkblatt Anwendungen von Kornfiltern an Wasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 1989
- [4] CISTIN, J. & ZIEMS, J. (1967): Entwurfsdiagramm für Kontakterosion (nach Versuchen von Cistin, im Bereich  $U \leq 4$  nach Versuchen von Ziems korrigiert).- In: STRIEGLER, W., WERNER, D. (1969) Dammbau in Theorie und Praxis, Springer-Verlag, Wien, New York, p. 225
- [5] KÖHLER, H.-J.; WARNECKE, W.; HOLFELDER T.: Filters subjected to transient hydraulic loading. In: Tagungsband zur Geofilters 2004, 4th International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering; Stellenbosch, South Africa, 21. Oktober 2004
- [6] KÖHLER, H.-J.: Filterbemessung aus geotechnischer Sicht. In: Schriftsammlung zum IfH-Workshop „Filter- und Interstitialforschung - Strömung und Turbulenz“, Universität Karlsruhe (TH), 5. April 2000, Mitteilungen Institut für Hydromechanik (IfH) der Universität Karlsruhe, 2001, Bericht Nr. 769, pp. IV, 1-IV, 22
- [7] SHERARD, J.L., DUNNINGAN, L.P., TALBOT, J.R. (1984): Basic properties of sand and gravel filters. ASCE Journal of Geotechn. Enging., 110, 6, pp. 684-700.
- [8] TERZAGHI, K., PECK, R. (1948): Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons Inc., New York.
- [9] ZIEMS, J. (1968): Ein Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation Dresden.

#### **Verfasser**

Dr.-Ing. Tilmann Holfelder  
Referat Erdbau und Uferschutz  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9726 – 2820  
E-Mail: [tilmann.holfelder@baw.de](mailto:tilmann.holfelder@baw.de)

Dr.-Ing. Jan Kayser  
Referat Erdbau und Uferschutz  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9726 – 3100  
E-Mail: [jan.kayser@baw.de](mailto:jan.kayser@baw.de)

Dipl.-Ing. Stefan Hoch  
Institut für Boden- und Felsmechanik  
Universität Karlsruhe (TH)  
Engler-Bunte-Ring 14, 76131 Karlsruhe  
Tel.: 0721 608 – 3295  
E-Mail: [stefan.hoch@ibf.uka.de](mailto:stefan.hoch@ibf.uka.de)