

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Kayser, Jan**

## **Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung. FuE-Abschlussbericht B3952.04.04.10076**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105103>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

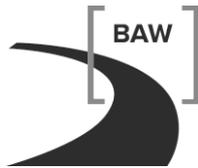
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung. FuE-Abschlussbericht B3952.04.04.10076. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

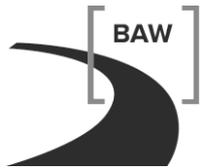
**FuE-Abschlussbericht**  
**Bemessung von geotechnischen Filtern**  
**unter instationärer Belastung**

**B3952.04.04.10076**



**Dezember 2016**





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**FuE-Abschlussbericht**  
**Bemessung von geotechnischen Filtern unter**  
**instationärer Belastung**

Beginn des Vorhabens: Juli 2002

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3952.04.04.10076

Aufgestellt von:           Abteilung:           Geotechnik  
                                  Referat:            Erdbau und Uferschutz – G4  
                                  Projektleiter     Dr. Jan Kayser

Karlsruhe, Dezember 2016

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Bundesanstalt für Wasserbau



## Zusammenfassung

Hydraulische Einwirkungen beeinträchtigen die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit von Erd- und Wasserbauwerken in besonderem Maß. Sie können zu Spannungsänderungen im Boden und Materialverlagerungen am Übergang zwischen Boden und Gewässer führen. Die meisten hydraulischen Einwirkungen an Wasserstraßen sind zeitlich veränderlich. Das können sein:

- Wind- und Schiffswellen
- Alternierende Gewässerströmungen z. B. durch Schiffe oder Tide induziert
- Wechselnde Wasserstände aus Hochwasser, Tideeinfluss oder Wasserbewirtschaftung
- Wasserauflauf und Wasserablauf an Uferböschungen

Sie kommen an vielen Stellen im Bereich von Binnen- und Seewasserstraßen vor und haben daher für bauliche Anlagen des Verkehrswasserbaus und für das Gewässerbett eine besondere Bedeutung.

In dem Forschungsvorhaben wurde die Stabilität von Kornfiltern für Böschungs- und Sohlensicherungen unter zeitlich veränderlichen hydraulischen Einwirkungen und dadurch induzierter wechselnder Durchströmung untersucht.

Die Untersuchungen zeigen, dass die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Wechseldurchströmungsanlage (WDA) sehr gut geeignet ist, die Prozesse im Boden bei zyklischen, schwellender und wechselnder Durchströmung zu untersuchen. Aus den visuellen Beobachtungen zusammen mit der Messung der Verformung und durch die Messung der hydraulischen Parameter konnte eine Beschreibung der geohydraulischen Prozesse (Kontakterosion, Kolmation und Suffosion) über den zeitlichen Verlauf erfolgen.

Bei einem Abstandsverhältnis zwischen Basis- und Filtermaterial von  $d_{15F}/d_{85B} > 4,3$  des untersuchten Materials zeigt sich, dass in Abhängigkeit der hydraulischen Einwirkung feineres Basismaterial an der Kontaktfläche ausgetragen wird. Diese Basis-Filter-Kombination ist somit unter oszillierender Strömung nicht filterstabil, während sie bei unidirektionaler Durchströmung filterstabil war.

Die Stabilität von Kornfiltern unter Wellenbelastung hängt außer von den geometrischen Relationen zwischen Basis und Filter auch von der hydraulischen Belastung, die sich aus der Wellenhöhe und der Wellensteilheit ergibt, und dem daraus im Untergrund resultierenden Druckgradienten ab.

Aus den Untersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage haben sich neue Erkenntnisse und weitere offene Punkte ergeben. Zur Bewertung der Filterstabilität ist die Beschreibung der zeitlichen Änderung der geotechnischen Parameter und damit der geohydraulischen Prozesse durch Materialumlagerung infolge von Kontakterosion, Kolmation und Suffosion erforderlich. Zusätzliche Langzeitversuche können Aufschluss über die dynamische Stabilität geben.



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Problemdarstellung und Ziel	1
2	Stand der Technik und des Wissens	2
3	Untersuchungen	5
3.1	Erste Untersuchungsphase zur Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung	5
3.2	Zweite Untersuchungsphase zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern unter instationären hydraulischen Bedingungen	8
3.2.1	Aufbau der Versuchsanlage	8
3.2.2	Untersuchungen zu den Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern mariner Strukturen (KOFIMARS)	12
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	22
5	Literatur	23

<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 1: Zeitlich veränderliche hydraulische Einwirkungen an Wasserstraßen	1
Bild 2: Prinzipieller Aufbau einer Böschungs- und Sohlensicherung als Deckwerk mit Kornfilter	2
Bild 3: Transport feiner Partikel im Korngerüst bei bidirektionaler Durchströmung	3
Bild 4: Filterprüfung unter wechselnden instationären und stationär wirkenden Gradienten (Köhler, 2000)	4
Bild 5: Druckwechsellanlage	6
Bild 6: Frontansicht der Wechseldurchströmungsanlage (Hintergrund) mit beispielhafter Versuchszelle im Zentrum	9
Bild 7: Anwendungsbereiche der Wechseldurchströmungsanlage (Kayser et. al. 2016)	11
Bild 8: Systemskizze der Versuchszelle mit Messeinrichtung (Schürenkamp & Oumeraci, 2015)	16
Bild 9: Kornverteilung der untersuchten Kornfiltermaterialien F1A, F1B, F1C und F2A im Anfangszustand (Schürenkamp & Oumeraci, 2015)	17
Bild 10: Visuelle Beobachtung des Filteraufbaus mit der Darstellung des Anfangs- und Endzustandes der Filterkonfiguration F1A2 (Kayser et al., 2016)	18
Bild 11: Kornverteilung der einzelnen Schichten der Filterkonfiguration F1A2 vor und nach Versuchsdurchführung (Kayser et al., 2016)	19
Bild 12: Vergleich der Filterstabilität unter unidirektionaler und oszillierender Strömung bei $\Delta p = 0,180$ bar (Schürenkamp & Oumeraci, 2015)	21

## **Anlagenverzeichnis**

Systemzeichnung der Wechseldurchströmungsanlage

## 1 Problemdarstellung und Ziel

Hydraulische Einwirkungen beeinträchtigen die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit von Erd- und Wasserbauwerken in besonderem Maß. Sie können zu Spannungsänderungen im Boden und Materialverlagerungen am Übergang zwischen Boden und Gewässer führen. Die meisten hydraulischen Einwirkungen an Wasserstraßen sind zeitlich veränderlich. Bild 1 zeigt zeitlich veränderliche hydraulische Einwirkungen. Das können sein:

- Wind- und Schiffswellen
- Alternierende Gewässerströmungen z. B. durch Schiffe oder Tide induziert
- Wechselnde Wasserstände aus Hochwasser, Tideeinfluss oder Wasserbewirtschaftung
- Wasserauflauf und Wasserablauf an Uferböschungen

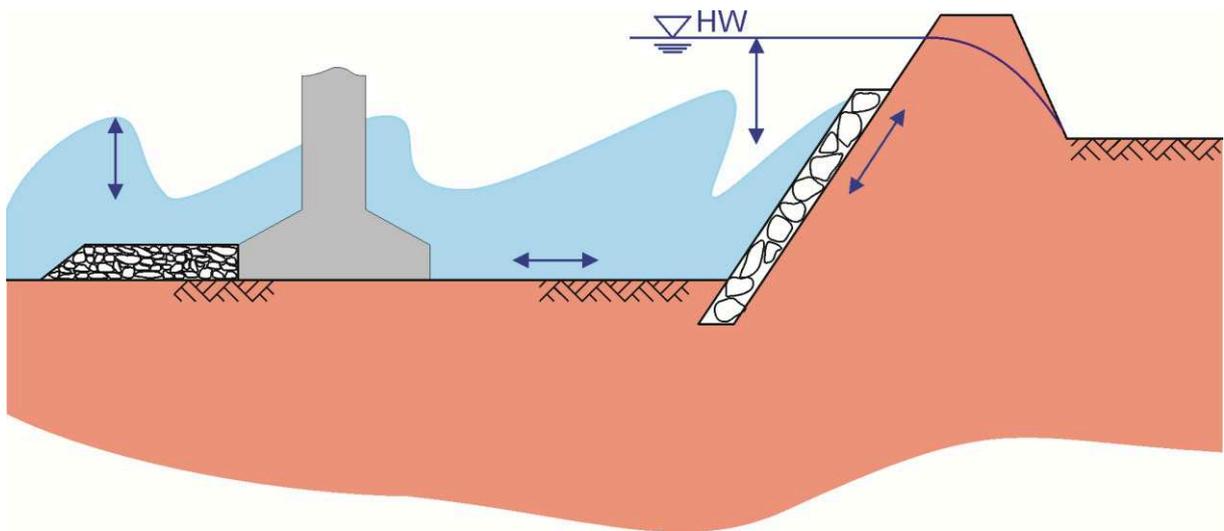


Bild 1: Zeitlich veränderliche hydraulische Einwirkungen an Wasserstraßen

Diese zeitlich signifikant veränderlichen hydraulischen Einwirkungen können durch weitere, zeitlich konstante oder nur langsam variierende hydraulische Einwirkungen, wie Grundströmungen oder Grundwasserzufluss überlagert werden. Sie kommen an vielen Stellen im Bereich von Binnen- und Seewasserstraßen vor und haben daher für bauliche Anlagen des Verkehrswasserbaus und für das Gewässerbett eine besondere Bedeutung.

Zeitlich veränderliche hydraulische Belastungen sind bei der Dimensionierung von Böschungs- und Sohlsicherungen sowohl in Binnengewässern als auch bei Offshore-Konstruktionen zu beachten. Ein typischer Aufbau einer entsprechenden Sicherung zeigt Bild 2. Die erosionssichere Schicht besteht aus einer Lage entsprechend dimensionierter Wasserbausteine. Da diese im Regelfall nicht filterstabil gegen den anstehenden Untergrund ist,

wird als Zwischenschicht ein Filter erforderlich. Diese Filter kann als Geotextil oder als mineralischer Filter (Kornfilter) ausgeführt werden. Gegenstand dieses Forschungsvorhabens sind Kornfilter.

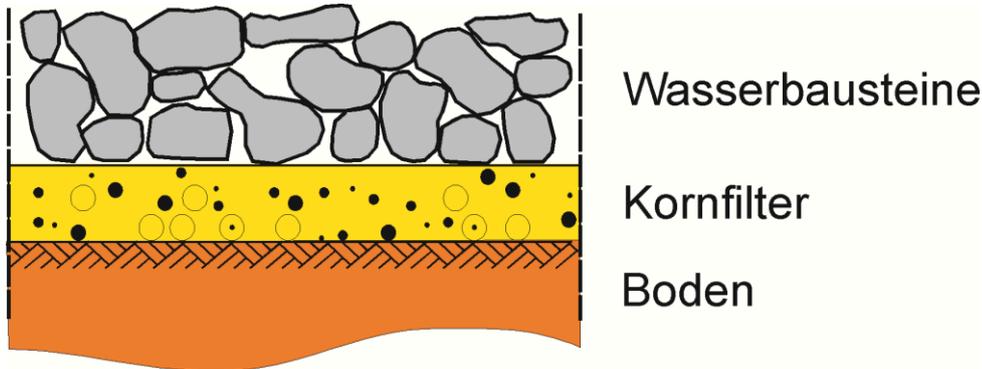


Bild 2: Prinzipieller Aufbau einer Böschungs- und Sohlensicherung als Deckwerk mit Kornfilter

Mögliche Schnittstellen für Kontakterosion liegen hier zwischen dem Boden und dem Kornfilter sowie zwischen dem Kornfilter und der Deckschicht aus Wasserbausteinen. In dem Forschungsvorhaben wurde die Stabilität an der Grenzschicht zwischen Boden (auch als Basis bezeichnet) und Filter untersucht.

Aufgrund der besonderen Bedeutung zeitlich signifikant veränderlichen Einwirkungen der damit verbundenen geotechnischen Prozesse für den Verkehrswasserbau wurde an der Bundesanstalt für Wasserbau eine Versuchseinrichtung zur Erzeugung wechselnder hydraulischer Strömungen entwickelt. Die Strömungsanlage und deren beispielhafte Verwendung im Rahmen eines Offshore-Forschungsprojekts werden nachfolgend vorgestellt.

## 2 Stand der Technik und des Wissens

Bei der Betrachtung geohydraulisch bedingter Veränderungen im Boden muss grundsätzlich zwischen unidirektionaler und bidirektionaler Strömung unterschieden werden. Der Unterschied kann anhand von Bild 3 erläutert werden.

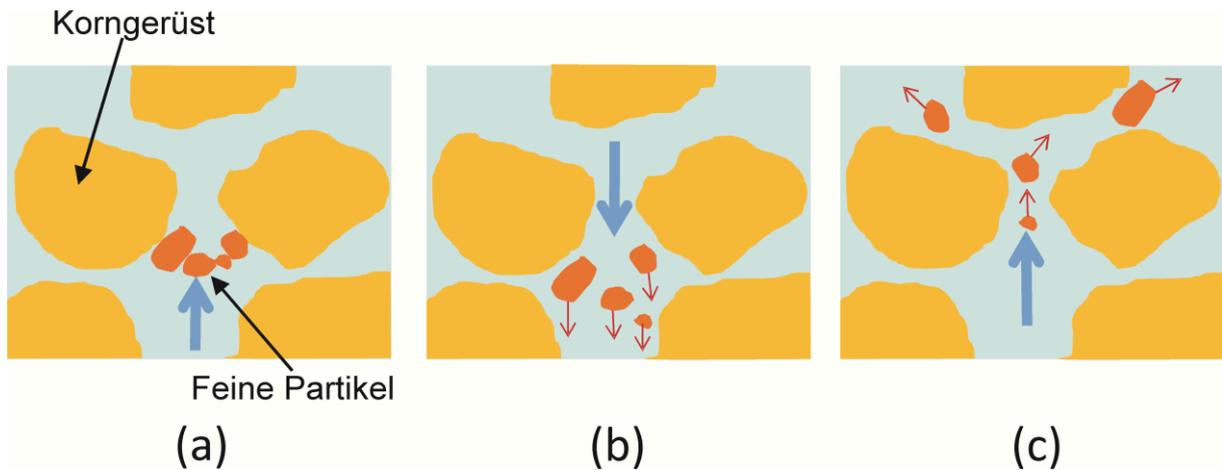


Bild 3: Transport feiner Partikel im Korngerüst bei bidirektionaler Durchströmung

Unter unidirektionaler Belastung können kleine Partikel, die geometrisch im Korngerüst beweglich sind, infolge Brückenbildung (Arching) im Korngerüst durch Korn-zu-Korn Spannung fixiert werden (Bild 3 (a)). Die Fixierung ist dauerhaft bei gleichbleibender Durchströmung. Bei Umkehr der Durchströmung wird die Korn-zu-Korn Spannungen aufgehoben und die Partikel sind mobil (b). Bei der nächsten Strömungsumkehr können die mobilen Partikel durch das Korngerüst hindurch abtransportiert werden (c).

Eine vollständige Sättigung wird in den für bautechnisch relevante Wassertiefen (d. h. Wasserdrücken) auch unterhalb des Wasserspiegels meistens nicht erreicht. Druckänderungen im Gewässer können daher nur gedämpft in den Boden eindringen, wodurch ein Porenwasserüberdruck im Boden entsteht. Diese Dämpfungen wurden sowohl in Naturversuchen (Köhler, 1989) als auch in Laborversuchen (Hameiri/Fannin, 2002) (Cazzuffi et al., 1999) (Köhler, 1993) festgestellt. Der Porenwasserüberdruck verringert die effektiven Spannungen im Boden. Defizite in der Standsicherheit und Bodenverformungen sind die Folge. Dieser Effekt wird u. a. in der Bemessung von Ufersicherungen für Wasserstraßen gegen den schiffsinduzierten Wasserspiegelabsenk berücksichtigt (Holfelder/Kayser, 2006).

Der durch den Porenwasserüberdruck erzeugte hydraulische Gradient bewirkt auch eine Porenwasserströmung, die unter Umständen Partikeltransport an Schichtgrenzen (Kontakterosion) oder im Porenraum (Suffosion) erzeugt.

Die hydraulischen Einwirkungen können senkrecht oder parallel zu Schichtgrenzen und Oberflächen verlaufen. Sie treten zyklisch (z. B. Windwellen) oder als Einzelereignisse (z. B. schiffsinduzierter Wasserspiegelabsenk) auf. Hinsichtlich der Wirkrichtung ist zu unterscheiden zwischen:

- Oszillierende Einwirkungen: Der Betrag und die Richtung der Einwirkung ändern sich.
- Schwellende Einwirkungen: Der Betrag ändert sich bei gleichbleibender Richtung.

Dabei ist zu beachten, dass durch schwellende Einwirkungen oszillierende Vorgänge im Boden ausgelöst werden können. So können schwellende Druckänderungen im Gewässer (z. B. durch Wellen) oszillierenden Gradienten im Porenwasser des Bodens initiieren. Diese Gradienten können an der Grenzfläche Wasser-Boden sehr hohe Gradienten erzeugen, wie es in Bild 4 (hier wurde die wechselnde Belastung an der Unterseite der Probe aufgebracht) dargestellt ist.

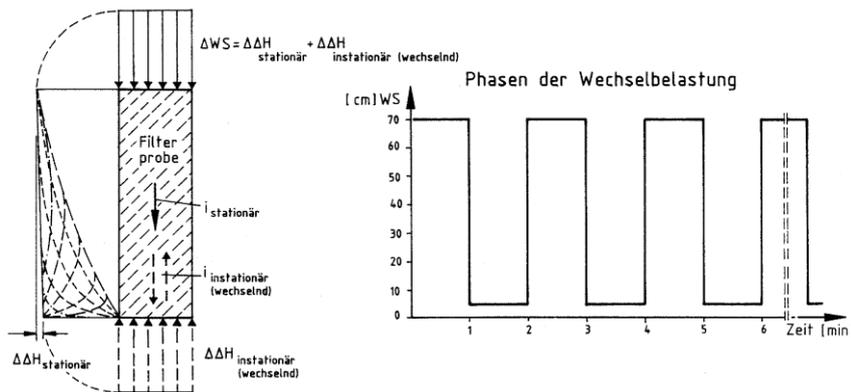


Bild 4: Filterprüfung unter wechselnden instationären und stationär wirkenden Gradienten (Köhler, 2000)

Diese Einwirkungen können verschiedene geotechnische Prozesse auslösen.

- (1) Kontakterosion an Kolk- und Ufersicherungen
- (2) Zyklische Änderungen des Porenwasserdrucks, dadurch ggf. Verflüssigung und/oder Materialtransport

Untersuchungen zum Einfluss wechselnder Belastungen wurden bisher im Wesentlichen im Zusammenhang mit Ufer- und Küstenschutzbauwerken durchgeführt. Molenkamp führte Untersuchungen in Triaxialzellen zur Kontakterosion an Grenzschichten im Boden unter zyklischen Spannungsänderungen durch (Molenkamp et al., 1979). De Graauw untersuchte Kornfilterschichten unter schichtparalleler und schichtorthogonaler sowie gleichförmiger und wechselnder Durchströmungen. Hierfür wurde eine „Filter Box“ mit Probengrößen von 1 m für die kontinuierliche schichtparallele Durchströmung und ein „Pulsating Water Tunnel“ für oszillierende, schichtparallele Durchströmung verwendet. Die schichtorthogonalen Versuche erfolgten in einem Permeameter mit 28 cm Durchmesser (de Graauw et al., 1983).

Am umfänglichsten wurden Untersuchungen unter Wechseldurchströmung zum Filtrationsverhalten von Geotextilien durchgeführt. Für Ufersicherungen an Wasserstraßen in Deutschland wurden vor über drei Jahrzehnten Testverfahren und Bewertungskriterien für das Filterverhalten unter wechselnden und dynamischen Strömungslastungen entwickelt (BAW, 1993; BAW, 1994).

Fannin führte Untersuchungen mit einem auf zyklische Durchströmung mit vertikaler Auflast angepassten Gradient Ratio Test an Proben mit ca. 10 cm Durchmesser durch (Fannin/Pishe, 2001) (Fannin/Hameiri, 2002). Cazzuffi, Chew und Chen verwendeten für Versuche mit Geotextilien jeweils ähnliche Permeameter mit einem Durchmesser von ca. 30 cm und der Möglichkeit, eine Vertikallast auf die Probe aufzubringen (Cazzuffi et al., 1999; Chew et al., 2000; Chen et al., 2008). Palmeira/Tatto führten Untersuchungen zum Filterverhalten von nonwoven Geotextilien unter einem Deckwerk in einer Wellenrinne (test flume) durch (Palmeira, Tatto, 2015). Zusammengefasst zeigen die Untersuchungen, dass Partikeltransport im Boden unter wechselnden Durchströmungen kritischer zu bewerten ist als unter ein-direktionaler Durchströmung.

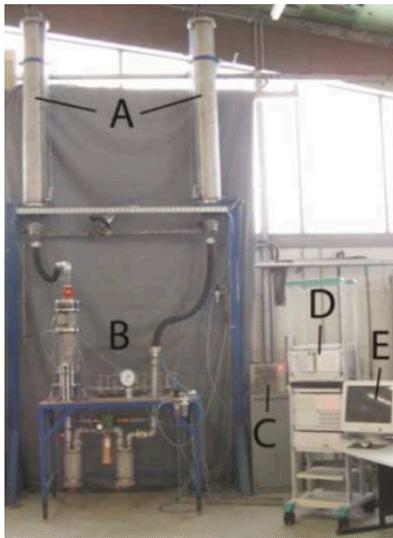
### **3 Untersuchungen**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase waren dies die Forschungsarbeit „Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung“ des Instituts für Bodenmechanik und Felsbau der TU Karlsruhe (IBF, 2006) und die Diplomarbeit „Experimentelle Bestimmung des Porenwasserdruckparameters zur Ermittlung von Porenwasserüberdrücken bei einem schnellen Wasserspiegelabsenk für feinkörnige, nichtkohäsive Böden“ (Demel, 2008).

In der zweiten Phase wurde aufgrund der Erkenntnisse der ersten Phase zunächst eine neue Versuchsanlage gebaut, die dann in Rahmen der Forschungsarbeit „Untersuchungen zu den Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern mariner Strukturen (KOFIMARS)“ des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig erstmals eingesetzt wurde (Schürenkamp, Oumeraci, 2015).

#### **3.1 Erste Untersuchungsphase zur Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung**

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten im Rahmen dieses experimentellen Forschungsvorhabens war der Aufbau einer geeigneten Versuchsanlage. Zunächst wurde auf eine in der BAW vorhandene Anlage zur Erzeugung wechselnder Drücke zurückgegriffen (s. Bild 5).



A Wasservorratsbehälter  
B Versuchsapparatur  
C elektronische Ventilsteuerung  
D Datenerfassung  
E Monitor für visuelle Datenkontrolle

Bild 5: Druckwechsellanlage

Die Druckwechsellanlage ermöglicht es, an der Unter- und der Oberseite des Probebehälter (B) unterschiedliche und wechselnde Drücke aufzubringen und damit wechselnde Durchströmungen zu initiieren. Diese Wechseldruckanlage wurde im Rahmen der ersten Untersuchungsphase verwendet.

Die Abteilung Erddamm- und Deponiebau am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF) der Universität Karlsruhe führte im Auftrag der BAW das Forschungsprojekt zum Thema „Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung“ durch. Die Untersuchungen sind in einem Forschungsbericht dokumentiert und werden nachfolgend kurz zusammengefasst (IBF, 2006).

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von Bemessungskriterien zur Dimensionierung von Kornfiltern für Uferböschungen an Wasserstraßen bei instationären Strömungsvorgängen, durch die hohe lokale hydraulische Gradienten hervorgerufen werden.

Die Arbeiten wurden im November 2003 aufgenommen. Bereits zu Anfang des Projektes wurde deutlich, dass die zur Durchführung der erforderlichen Untersuchungen verfügbare Versuchseinrichtung entgegen den Erwartungen nicht in allen Belangen den geforderten Anforderungen entsprach. Daher wurde die Versuchsanlage einer umfassenden Überprüfung mit nachgeschalteter Umgestaltung wesentlicher Komponenten unterzogen. Im Ergebnis zeigte sich, dass für die erforderliche Quantifizierung der Phänomene die Wechseldruckanlage nicht ganz ausreichend war, weil

- eine ausreichende Entlüftung der Anlage nicht möglich war,
- keine Durchflüsse messbar waren und
- das verfügbare Wasservolumen in den Vorratsbehältern zu gering war.

Als Ergänzung zur Wechseldruckanlage wurde daher ein einfacher Drucksäulenversuch konzipiert (Details s. IBF, 2006).

In beiden Versuchsanlagen wurden unterschiedliche Filter-Basis-Kombinationen untersucht. Die Auswahl der Korngrößenverteilungen der Basis-Filter-Kombinationen erfolgte auf Basis des zweistufigen Standardfilters nach MAK (BAW, 1989). Dieser Standardfilter kann in der Praxis der Deckwerksbemessung bei jedem suffossionsstabilen homogenen Untergrund („Basis“) angewendet werden, bei dem  $d_{15} < 0,06$  mm erfüllt ist.

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Basis-Filter-Kombination ist unter instationärer Durchströmung besonderen Belastungen ausgesetzt. Die resultierenden Mechanismen können zu massiven Bodenumlagerungen führen.
- Bei den Untersuchungen konnten Abstandsverhältnisse von Basis-Filter-Kombinationen identifiziert werden, ab denen unter hohen hydraulischen Gradienten erste Kornumlagerungen stattfinden bzw. ein Versagen eintritt. Es war möglich, die hydraulischen Bedingungen innerhalb der Probe, die ein Versagen des Filters ankündigten – und schließlich letztlich auch auslösten – qualitativ wie quantitativ zu beobachten.
- Die Untersuchungen an der Druckwechselversuchsanlage (DWA) haben die prinzipiellen hydraulischen Vorgänge im Bereich der Grenzfläche zwischen Basis und Filter unter Berücksichtigung der dämpfenden Wirkung der eingeschlossenen Bodenluft aufgezeigt. Mit den Versuchen der feineren Basis konnten tendenziell höhere Gradienten ermittelt werden, für welche die stärkere Dämpfung des Systems verantwortlich ist. Ebenso konnten in den feinen Basis-Materialien Fließrichtungswechsel messtechnisch ermittelt werden. An den Untersuchungen der Druckwechselversuchsanlage (DWA) hat sich gezeigt, dass mit Zunahme der Anzahl der Lastwechsel Druckumlagerungen innerhalb der Probe schneller von statten gehen als zu Anfang der Versuche. Weiterhin konnten auch bei den Versuchen an der DWA 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.
- Anhand von Erosionskriterien aus der Literatur konnte aufgezeigt werden, dass für stationäre Durchströmung sämtliche Kriterien die ermittelten Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite bestätigten. Insbesondere das von Sherard et al. (1984) modifizierte Kriterium von Terzaghi und Peck (1948) scheint nach den vorliegenden Untersuchungen die Verhältnisse am zutreffendsten zu beschreiben. Aus den Kriterien und den Versuchsergebnissen lässt sich ableiten, dass - soweit geometrisch sichere Verhältnisse vorliegen - das Ausmaß der stationären hydraulischen Belastung nicht von Bedeutung ist. Die Ergebnisse zeigen auf, dass es weiterhin sinnvoll ist, auch unter hydraulisch instationären Verhältnissen eine Grundströmung aufzubringen.

Ergänzend zu diesen Untersuchungen wurde im Rahmen einer Studienarbeit die Filterstabilität unter Belastung durch hohe Gradienten bis  $i = 40$  untersucht (Klein, 2004). Im Vorder-

grund standen die gängigen Stabilitätskriterien von Terzaghi, Cistin und Ziems. Als Ergebnis ist festzustellen, dass der Eintrag von Feinkorn in Filter mit dem Anstieg des hydraulischen Gradienten zunimmt. Jedoch war bei den untersuchten Filter-Basis-Kombinationen kein Versagen des Filters aufgetreten, d. h. die gängigen Filterkriterien können unter den spezifischen Randbedingungen der Untersuchungen auch unter hohen Gradienten bestätigt werden.

Teil der ersten Untersuchungsphase war auch die experimentelle Bestimmung des Porenwasserdruckparameters zur Ermittlung von Porenwasserüberdrücken bei einem schnellen Wasserspiegelabsenk für feinkörnige, nichtkohäsive Böden (Demel, 2008). Dazu sollte der theoretische Bemessungsansatz des für diese Berechnung notwendigen Porenwasserdruckparameters durch Versuche überprüft werden. Hierzu wurden Versuche an feinkörnigen, nichtkohäsiven Böden durchgeführt und ausgewertet.

Das Ziel der Untersuchungen konnte zwar nicht erreicht werden, aber die Versuche haben aufgezeigt worauf, in weiteren Untersuchungen zu achten ist und wie eine neuen Versuchsalnage zu konzipieren ist.

### **3.2 Zweite Untersuchungsphase zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern unter instationären hydraulischen Bedingungen**

#### **3.2.1 Aufbau der Versuchsanlage**

Aufgrund der grundsätzlichen Probleme in der ersten Untersuchungsphase wurde eine völlig neue Versuchsanlage erstellt. Die Versuchsanlage ermöglicht auch die Messung und Steuerung der Durchflüsse und wird daher im Folgenden als „Wechseldurchströmungsanlage“ (WDA) bezeichnet. Eine Systemzeichnung der WDA befindet sich in der Anlage zu dem vorliegenden Forschungsbericht.

Die physikalischen Prozesse, die sich bei wechselnden Durchströmungen an und im Boden abspielen, sind sehr unterschiedlich. Dies ist beim Konzept der Anlage berücksichtigt. Die Grundidee besteht in der Zweiteilung des Versuchsaufbaus in

1. eine Anlage zur Erzeugung der hydraulischen Belastung und
2. eine Versuchszelle.

Die gewünschte hydraulische Belastung wird als wechselnde oder gleichbleibende Strömung mit der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) erzeugt. Das eigentliche Experiment wird an dem Versuchsmedium in der Versuchszelle durchgeführt, die der jeweiligen Fragestellung und den dafür relevanten physikalischen Prozessen angepasst werden kann. Die WDA ist damit von der eigentlichen Versuchszelle klar abgegrenzt. Der für den Versuch erforderliche Durchfluss und/oder Wasserdruck wird an einer definierten Schnittstelle von der WDA an die jeweilige Versuchszelle übergeben. Die Trennung von Strömungsanlage und Versuchszelle

ermöglicht eine sehr große Flexibilität beim Versuchsaufbau. Die Versuchszelle wird nach dem jeweiligen Untersuchungsziel entwickelt.

Bei der Konzeption der Anlage konnte auf Erfahrungen aus früheren Untersuchungen zurückgegriffen werden (Köhler, 1993) (Köhler/Koenders, 2003) (Demel, 2008). Die Strömungsanlage erfüllt die Grundanforderungen:

- Erzeugung unidirektionaler, zyklischer, oszillierender und schwellender Durchflüsse
- Erzeugung von unregelmäßigen Druckänderungen aus Zeitreihen
- Einsetzbar für Untersuchungen an sehr unterschiedlich durchlässigen Böden und Materialien
- Möglichkeit des Einbaus unterschiedlicher Messzellen für Durchströmung und/oder Überströmungen (vertikal, horizontal oder geneigt)
- Druckbereich entsprechend in den relevanten Wassertiefen von 2 bis 90 mWS
- Regelung über Druck, Durchflussraten oder über andere Messgrößen
- Steuerparameter über ein weites Spektrum einstellbar

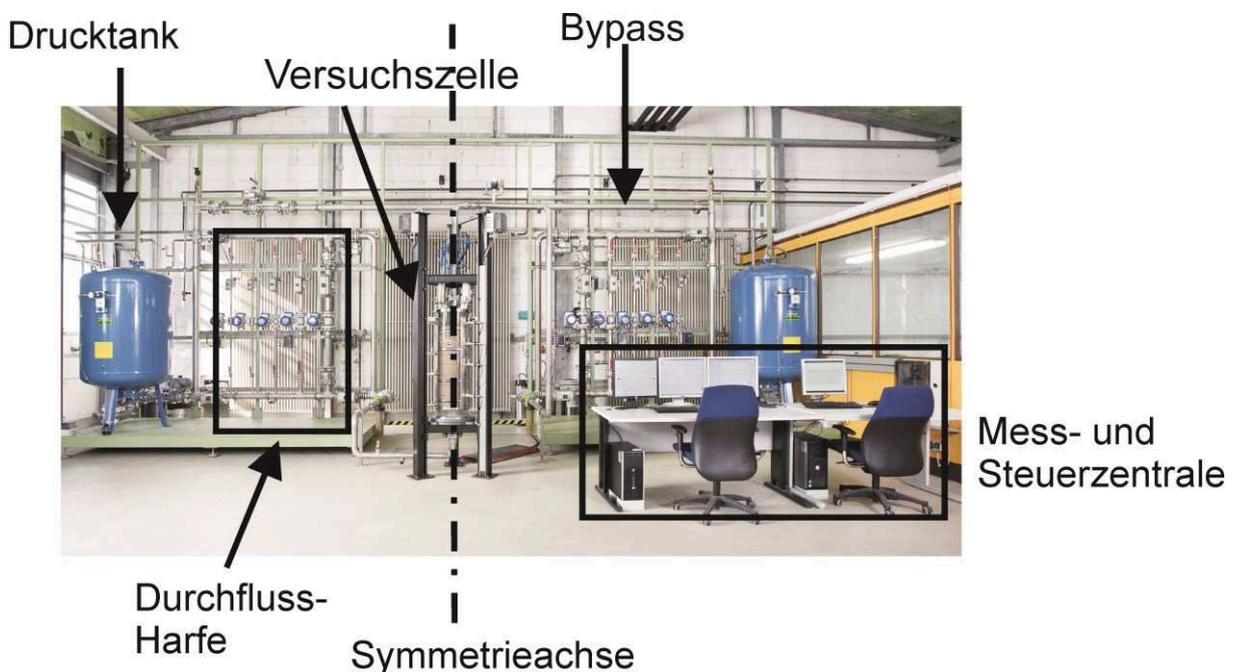


Bild 6: Frontansicht der Wechseldurchströmungsanlage (Hintergrund) mit beispielhafter Versuchszelle im Zentrum

Die Wechseldurchströmungsanlage (s. Bild 6) besteht im Wesentlichen aus zwei Druckbehältern, einem Rohrsystem zur Verbindung die Druckbehälter mit der Versuchszelle und einer entsprechenden Druckregelungseinrichtung zur Einstellung der Druckverläufe in den

Behältern. Mithilfe eines komplexen modellbasierten Regelalgorithmus werden über einen Computer vorgegebene Durchflüsse und Druckverläufe an definierten Regelungspunkten gesteuert. Hierzu ist das Rohrsystem mit entsprechenden hochgenauen Sensoren für die Druck- und Durchflussmessung ausgestattet.

Der Druckaufbau in den Druckbehältern erfolgt mithilfe von Druckluft. Die Druckbehälter sind in ihrem Inneren mit einer Membran versehen, welche Luft und Wasser voneinander trennt, um den Eintrag von Luft in das Wassersystem zu vermeiden. Jeder der beiden Druckbehälter ist mit einem separaten hochgenauen mechanischen Luftdruckregler mit hohem Volumenstrom (Be- und Entlüftung) ausgestattet, der von einem Präzisionsproportionaldruckregler mit kurzer Ansprechzeit vorgesteuert wird.

Durch die Regelung des Luftdrucks in den Druckbehältern kann der Wasserdruck innerhalb der Anlage genau eingestellt werden. Weiterhin ist es möglich, durch eine wechselseitige bzw. einseitige Druckerhöhung in den Druckbehältern das Wasser innerhalb der Anlage und durch eine eingebaute Probe sowohl in wechselnder, als auch in einer Richtung strömen zu lassen. Die Strömung wird hierbei durch den Druckunterschied zwischen den beiden Druckbehältern hervorgerufen.

Mithilfe eines mathematischen Modells wird das Anlagenverhalten online vorausberechnet, wodurch eine sehr genaue Steuerung realisiert werden kann. Das Modell berücksichtigt zahlreiche Faktoren wie kompressible Luftströmung, dynamische Temperaturänderungen durch Kompression und Expansion der Luft, Wärmetransport, Massenträgheit des Wassers, Strömungswiderstände der Rohrleitungen, mechanische Reibung, Spiel und Federvorspannkraft in den Druckreglern, sowie ein auf der Forchheimer Gleichung basierendes adaptives Modell zur Abbildung des Strömungswiderstandes der Bodenprobe.

Durchgeführt wird diese komplexe Regelung mithilfe eines Computers, der mit dem Mastergerät des zum Einsatz kommenden dezentralen Messsystems kommuniziert. Das verwendete Messsystem bietet durch seinen modularen dezentralen Aufbau störungsarme Signale durch eine sensornahe Digitalisierung, sowie hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit. Eine große Bandbreite an Ein- und Ausgangsmodulen für verschiedenste Signale ermöglicht die Anbindung unterschiedlichster Sensoren und Aktoren, wodurch die Sensorik einer separat entwickelten Versuchszelle direkt an das Anlagenmesssystem angebunden werden kann. Dies ermöglicht eine simultane Abtastung aller Messwerte und die automatisierte Einbindung, Anzeige und Speicherung aller Signale mithilfe des speziell entwickelten Steuerungsprogramms.

Zum einfacheren Wechsel zwischen verschiedenen Versuchsaufbauten werden die für die Sensorik der einzelnen Versuchszellen benötigten Messmodule an jeder Versuchszelle separat ausgeführt. Die zellenspezifischen Module lassen sich dabei einfach am Bus des Messsystems ab- bzw. ankoppeln. Zur Einbindung der Module in das Gesamtmesssystem müssen diese anschließend lediglich in die Konfiguration des Messsystems mitaufgenommen werden.

Für die Versuchsdurchführung steht eine grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung. Über ein Übersichtsfenster lassen sich Ventilstellungen, Behälterfüllstände, Druck- und Durchflusszustände überwachen und Ventilstellungen ändern. Ein zweites Fenster dient der Parametrierung der versuchsspezifischen Druck- und Durchflusssollverläufe. Hier stehen verschiedene Vorlagen für Standardkurvenformen wie Sinus, Trapez und Konstanten zur Verfügung. Weiterhin besteht die Möglichkeit, eigene Kurven in Form von Wertetabellen in das Programm zu laden. Einige Beispiele für die mögliche Druckverläufe (Wellenformen) der Anlage sind in Bild 7 dargestellt.

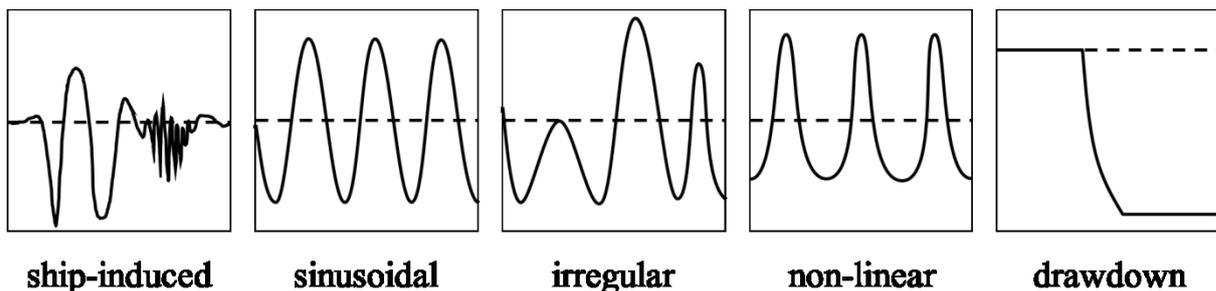


Bild 7: Anwendungsbereiche der Wechseldurchströmungsanlage (Kayser et al., 2016)

Abhängig von den Versuchsrandbedingungen und den untersuchten Medien (beispielsweise durch die Untersuchung verschiedener Proben unterschiedlichster Durchlässigkeit) kann der Durchfluss um mehrere Zehnerpotenzen variieren. Aus diesem Grund stehen in der Durchflussharfe fünf Stromröhren mit unterschiedlichen Durchmessern zur Verfügung (s. Bild 6). An jeder Stromröhre sind Durchflussmesser angebracht, deren Messbereiche auf den jeweiligen Durchfluss abgestimmt sind. Damit werden Durchflüsse und Messbereiche von bis  $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$  bis  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  abgedeckt.

Die beiden Druckbehälter sind zusätzlich zur Versuchszelle über einen Bypass miteinander verbunden, über den das Wasservolumen zwischen den beiden Behältern bei Bedarf ausgetauscht werden kann. Dies ermöglicht es, unidirektionale Experimente auch mit mehr als  $450 \text{ l}$  bewegtem Wasservolumen durchzuführen, allerdings mit gelegentlichen Unterbrechungen zur Rückführung des Wassers.

Des Weiteren sind zur Entlüftung des Wassersrohrsystems an den höchsten Punkten der Anlage automatische Entlüftungsventile angebracht, da größere Mengen Luft im Drucksystem oder in der Versuchszelle die Versuchsergebnisse verfälschen und die Druckregelung in erheblichem Maße beeinträchtigen würden. Die eingesetzten Entlüftungsventile lassen in der Anlage aufsteigende Luftblasen rein mechanisch mithilfe eines Schwimmers in die Umgebung entweichen. Um das Ansaugen von Luft durch die Entlüftungsventile im Falle eines versuchsbedingten Unterdrucks in der Anlage zu vermeiden, sind die Auslässe der Entlüftungsventile mit Rückschlagventilen versehen.

Der Eintrag von Feinpartikeln aus der Versuchszelle in das Rohrleitungssystem wird durch Filterkerzen verhindert. Die hohe Härte des Karlsruher Leitungswassers macht eine gesonderte Entkalkungsvorrichtung erforderlich.

Technische Daten der Anlage:

- Wasserdruck (relativ) 0.2 bar bis 9 bar
- Drucksensoren mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  % FS
- Durchfluss: Bis zu 7 l/s, 10 Durchflussmesser mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,15$  % vom Messwert + 1 mm/s
- Wasservolumen: 450 l (als Gesamtvolumen in den Druckbehältern)
- Druckänderung: Bis zu 0,5 bar/s
- Regelgenauigkeit: Bis zu  $\pm 5$  mbar
- Datenaufnahme: Abtastung mit 10 kHz, Mittelung auf 100 Werte pro Sekunde  
Auflösung: 24 Bit

Der verwendete Kompressor hat einen Volumenstrom von 4 Nm<sup>3</sup>/min (Nm<sup>3</sup> = Normkubikmeter, auf 1 bar absolut normiert) und kann täglich bis zu 8 Stunden unter Volllast betrieben werden. Im Normalfall hält der Kompressor den Druck im angeschlossenen Vordruckbehälter immer zwischen 10 und 11 bar absolut.

Der limitierte Volumenstrom des Kompressors sowie Rohr- und Düsenquerschnitte, Armaturen, Krümmer, Verengungen, Aufweitungen und Rauigkeiten bestimmen im Wesentlichen die Grenzen der Wechseldurchströmungsanlage hinsichtlich des Durchflusses und der Geschwindigkeit von Druckänderungen. Eine wichtige Randbedingung ist dabei auch die Transmissivität des Versuchsaufbaus, die wiederum durch die Geometrie und die Eigenschaften des durchströmten Mediums bestimmt wird.

Unterschiedliche Fragestellungen ergeben sich zum Beispiel aus der Einwirkung von Windwellen, Schiffswellen oder schnellen Wasserstandsänderungen. Die jeweiligen Druckverläufe können für den gewählten mittleren Wasserstand in der Wechseldurchströmungsanlage generiert werden. Weiterhin können Zeitreihen aus Messungen von numerischen oder hydraulischen Modellversuchen oder aus Naturmessungen in die Steuerungssoftware importiert werden.

### **3.2.2 Untersuchungen zu den Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern mariner Strukturen (KOFIMARS)**

Der Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen der zweiten Untersuchungsphase liegt in der Filterstabilität von Kornfiltern für Sohlsicherungen im Küsten- und Offshore-Bereich. Im folgenden Abschnitt ist dazu die Anwendung zu regelmäßigen sinusförmigen Windwellen im Übergangsbereich zwischen Flachwasser und Tiefwasser dargestellt.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der BAW und dem Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig durchgeführt. Sie sind ein Teil des Forschungsvor-

habens, das vom Leichtweißinstitut mit Förderung der DFG (Förderzeichen DFG Ou 1/16-1, Ou 1/16-2) durchgeführt und voraussichtlich 2017 abgeschlossen wird. Ziel des Forschungsprojektes ist es, das Verständnis der geohydraulischen Prozesse zu verbessern, um ein theoretisches Modell für die Filterstabilität unter dem Einfluss von oszillierenden Strömungen zu entwickeln. Dies dient zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern für Hafen-, Küsten- und Offshore-Bauwerke. Insbesondere zielen die Untersuchungen auf folgende Schwerpunkte:

- a) besseres Verständnis der geohydraulischen Prozesse im Korngefüge von Filtern unter Wellenbelastung und Strömungen orthogonal und parallel zu den Schichtgrenzen,
- b) Erfassung des hydraulischen Gradienten, der Porenwasserdrücke, der Strömungen und der Schubspannungen, die zum Bewegungsbeginn und zum Transport des Basis- und Filtermaterials führen und
- c) Herleitung von prozessbasierten und generischen Berechnungsansätzen zur Filterstabilität unter der Einwirkung von oszillierenden Strömungen.

Der Schwerpunkt der hier dargestellten Untersuchung der Kontakterosion zwischen Basis- und Filterschicht unter der Einwirkung schichtorthogonaler, lotrechter Durchströmung. Hierzu wird die Wechseldurchströmungsanlage (WDA) eingesetzt, die durch eine am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) in Zusammenarbeit mit der BAW entwickelten Versuchszelle erweitert wird.

An Wasserstraßen, Hafen-, Küsten- und Offshore-Bauwerken werden Filter aus Gesteinskörnungen in Sohl- und Böschungssicherungen eingesetzt. Die Funktion dieser Kornfilter liegt in

- (i) der Sicherung des Untergrunds vor dem Ausspülen/Erosion
- (ii) der Gewährleistung einer ausreichend hohen Auflast zur Stabilisierung der Gewässer-  
sohle und Böschung und
- (iii) der Sicherung von Deckwerkelementen gegen das Einsinken infolge von Kontakterosion.

Aus der Analyse des Wissensstands zur Stabilität von Kornfiltern unter schichtorthogonaler, oszillierender Strömung bestehen Wissenslücken zum Einfluss der Filterauflast und der Wellenparameter (Wellenhöhe, Wellenfrequenz) in Abhängigkeit des Wasserstands. Bisher existieren keine systematischen Untersuchungen zur Stabilität von weit gestuften Kornfiltern in Abhängigkeit der Wellensteilheit und des Brecherindex. Weiterhin besteht Forschungsbedarf zum Verhalten von Kornfiltern unter oszillierender Strömung in Abhängigkeit von hydraulischen Eigenschaften wie Filtergeschwindigkeit ( $v_f$ ) und hydraulischer Gradienten ( $i = \Delta h / \Delta L$ ) sowie von geometrischen Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials wie Abstandsverhältnis ( $d_{15F} / d_{85B}$ ), Ungleichförmigkeit ( $C_u = d_{60F} / d_{10F}$ ) und Porosität ( $n$ ).

Aus den Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983) geht hervor, dass die Gefahr von Kontakterosion unter oszillierender Strömung wesentlich größer ist als unter gleichgerichteter Strömung. Die Kriterien zur Gewährleistung der geometrischen Filterstabilität, definiert als Abstandsverhältnis zwischen den charakteristischen Korngrößen vom Filtermaterial und dem Basismaterial, sind unter Wechselbelastung deutlich strenger als unter unidirektionaler Strömung. Damit ist die Anwendbarkeit der in der Geotechnik üblichen Filterkriterien (z. B. Terzaghi, Laflour) unter Wechselbelastung zu überprüfen.

Im Hinblick auf eine zuverlässige Bemessung von Sohlsicherungen im Offshore-Bereich unter der Einwirkung von Windwellen wurden geohydraulische Modellversuche zur Grundlagenermittlung geplant. Hierzu wurde eine neue Versuchszelle zum Einsatz in der Wechseldurchströmungsanlage entwickelt. Die Ziele der experimentellen und theoretischen Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens liegen

- (i) in der Verbesserung des Verständnisses von hydraulischen und geohydraulischen Prozessen im Filteraufbau unter oszillierender Strömung orthogonal zur Schichtgrenze,
- (ii) Erfassung des hydraulischen Gradienten, des Porenwasserdrucks und der Filtergeschwindigkeit, die zum Bewegungsbeginn und zum Transport des Basis- und Filtermaterials führen,
- (iii) in der Entwicklung eines theoretischen Modells zur Abbildung der hydraulischen Stabilität von Kornfiltern und
- (iv) in der Herleitung von prozessbasierten und generischen Berechnungsansätzen zur hydraulischen Stabilität von Kornfiltern unter der Einwirkung von oszillierender Strömung.

Aus der Analyse des Wissenstands und den bestehenden Wissenslücken wurde ein Versuchsaufbau mit der Wechseldurchströmungsanlage zur Untersuchung der Stabilität von Filtern unter oszillierender Strömung geplant. Im folgenden Abschnitt wird hierzu der Aufbau des Versuchs mit den hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen beschrieben.

### **Versuchsaufbau**

Zur Entwicklung des Versuchsaufbaus und der Methodik für die hydraulischen Modellversuche wurden im ersten Schritt die hydraulischen Parameter und die Randbedingungen der Wechseldurchströmungsanlage untersucht. Hierzu wurden die Untersuchungen von de Graauw et al. (1983), Wenka & Köhler (2007) und Köhler (1996) und Moffat (2005) auf die hydraulischen Bedingungen analysiert. Bei der Entwicklung wurden die bisherigen Erfahrungen für die Optimierung des Versuchsaufbaus berücksichtigt.

Weiterhin wurden die Anforderungen an die Funktionsweise der Versuchszelle definiert und wie folgt umgesetzt (Schürenkamp & Oumeraci, 2015):

- Lastaufbringung zwischen 5 kN/m<sup>2</sup> und 30 kN/m<sup>2</sup> durch Pneumatikzylinder mit Druckplatte zur Einstellung der Filterauflast über Druckregler

- Magnetisches Wegmesssystem zur Messung der Setzung der Druckplatte
- Kraftmesszelle mit einer Druckplatte unterhalb der Probe zur Erfassung der Wandreibung im Permeameter
- Anordnung von präzisen Druckmesszellen in einem Raster zur Messung des Drucks innerhalb, oberhalb und unterhalb der Probe
- Transparente Versuchszelle mit Maßeinteilung zur visuellen Beobachtung von Materialbewegungen

Der maximale Innendruck wurde entsprechend der Wassertiefe in der Natur von 45 m und Wellenhöhen von bis zu 20 m auf 6 bar festgelegt. Die Abmessungen sind zum einen durch die hydraulischen Anforderungen und zum anderen durch technische Grenzen in Bezug auf den maximalen Innendruck festgelegt. Die Gesamthöhe der Zelle beträgt 1000 mm bei einem Innendurchmesser von 330 mm. Die maximale Einbauhöhe der Probe beträgt 800 mm, da sich im oberen Bereich das System zur Auflastregelung und sich im unteren Bereich der Zulauf mit der Kraftmessung befindet. Die Zelle wird über einen Stahlrahmen verspannt und somit gegen den Innendruck abgedichtet. Das Rohr der Versuchszelle besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA), gestützt durch Stahlbleche mit Stahlringen zur Reduzierung der Verformungen. Der obere und untere Deckel wurden aus Edelstahl gefertigt und dienen zur Aufnahme der Messtechnik sowie zum Anschluss der Rohrleitung der Wechseldurchströmungsanlage. Die Entlüftung der Versuchszelle erfolgt über die Anschlüsse der Drucksensoren sowie über das obere Anschlussrohr mit einem Entlüftungsventil. In Abbildung 6 ist die Systemskizze der Versuchszelle mit der Anordnung der Drucksensoren, des Auflastsystems und der Kraftmesszelle dargestellt.

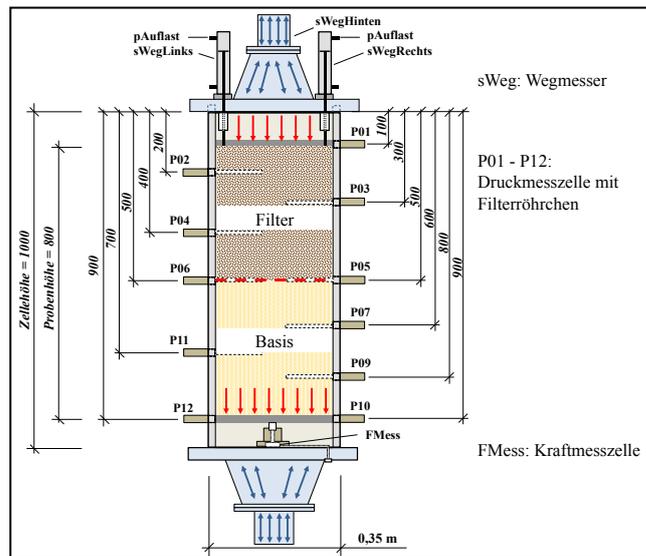


Bild 8: Systemskizze der Versuchszelle mit Messeinrichtung (Schürenkamp & Oumera-ci, 2015)

Die Versuchszelle wurde in einem Tragrahmen verspannt und an das Rohrleitungssystem der Wechseldurchströmungsanlage angeschlossen. In Bild 8 ist die Versuchszelle mit einer eingebauten Probe dargestellt, angeschlossen an die Wechseldurchströmungsanlage.

### Hydraulische Belastung

Mit dem Ziel, die Stabilität von Kornfiltern unter der Einwirkung von Wellen zu untersuchen, wurde die Wellenbelastung an Sohlsicherungen in drei Wassertiefen von  $d = 5 \text{ m}$ ,  $25 \text{ m}$  und  $45 \text{ m}$  mit der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  ermittelt. Unter Anwendung der linearen Wellentheorie nach Airy wurde die maximale Wellenhöhe  $H$  in Abhängigkeit der Wassertiefe  $d$  über die Grenzbedingung  $H/d = 0,78$  (kritischer Brecherindex nach McCowan, 1891) für gewählte Wassertiefen ermittelt. Der kritische Brecherindex beschreibt die maximale Wellenhöhe einer Einzelwelle in Abhängigkeit der Wassertiefe.

Aus diesen äußeren Belastungen stellt sich im Probekörper ein hydraulischer Gradient ein, der im Versuch mit Hilfe der Druckaufnehmer ermittelt wurde.

### Filtermaterialien

In Bezug auf einen einschichten Filteraufbau für Sohlsicherungen wurden Filtergemische mit typischer Kornverteilung gewählt. Es wurden geometrische Filterkriterien nach Terzaghi (Terzaghi and Peck, 1948) und de Graauw et al. (1983) sowie Filter mit größerem Abstandsverhältnis gewählt, um eine Bandbreite von potentiell stabilen (geometrisch geschlossenen) Filtern sowie dynamisch stabilen und potentiell nicht stabilen (geometrisch offenen) Filtern zu erhalten. Die Filtermaterialien unterscheiden sich im Abstandsverhältnis zum Basismaterial ( $d_{15F}/d_{85B}$ ), in der Ungleichförmigkeit ( $C_U = d_{60F}/d_{10F}$ ) und in der Durchlässigkeit  $k$ . Das Größtkorn des Filtermaterials wird dabei in Anlehnung an DIN 18130-1 mit maximal einem Zehntel

des Durchmessers der Versuchszelle wie folgt gewählt:  $D_{\text{Zelle}} = 328 \text{ mm}$ ,  $d_{100} \leq 33 \text{ mm}$ . Hierzu sind die Kornverteilungen in Bild 9 dargestellt.

Das gewählte Filtermaterial besteht aus rundkörnigem Material (Sand bis Kies) mit Korngrößen im Bereich von  $d_0 = 0.06 \text{ mm}$  bis  $d_{100} = 31.5 \text{ mm}$  und einer Kornrohdichte von  $2650 \text{ kg/m}^3$  und wurde aus verschiedenen Kornfraktionen unter Wasser gemischt. Bei jeweils gleichem Basismaterial wurden vier Filterkonfigurationen (F1A, F1B, F1C und F2A) untersucht. Die Filterschicht wurde jeweils unter Wasser in der Zelle locker eingebaut und anschließend durch die Auflast verdichtet. Unter einem Druck von 6 bar wurden Zelle, Probe sowie die Filterröhrchen der Drucksensoren über Ventile entlüftet. Für das Filtermaterial F1A wurden insgesamt vier Versuchsreihen zu unterschiedlichen hydraulischen Einwirkungen durchgeführt (F1A1, F1A2, F1A3 und F1A4). Nach starker Veränderung der Probe wurde der Filter F1A erneut eingebaut, um Wiederholungsversuche mit annähernd gleichen Bedingungen zu erreichen. Der initiale Schichtaufbau betrug für die Basis- und Filterschicht jeweils 400 mm. Die Kornverteilung der einzelnen Filtermaterialien ist in Bild 9 zusammen mit der Kornverteilung des Basismaterials dargestellt. Das Basismaterial hat einen mittleren Korndurchmesser von  $d_{50B} = 0.25 \text{ mm}$  und weist eine Ungleichförmigkeit von  $C_U = 1.29$  sowie eine Krümmungszahl von  $C_C = 1.16$  auf.

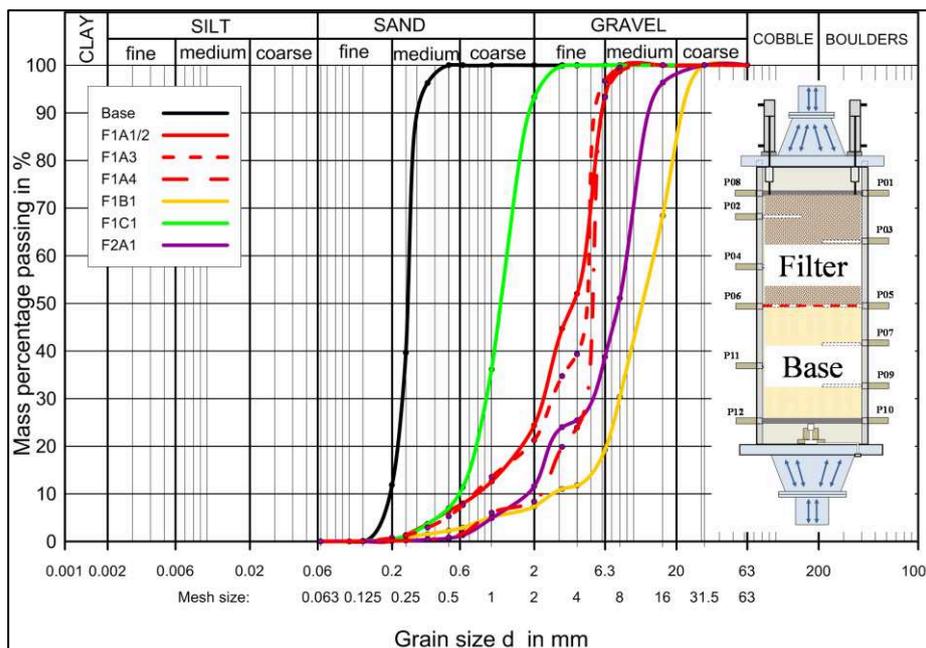


Bild 9: Kornverteilung der untersuchten Kornfiltermaterialien F1A, F1B, F1C und F2A im Anfangszustand (Schürenkamp & Oumeraci, 2015)

Insgesamt wurden rund 120 Modellversuche inklusive Wiederholungsversuchen mit lokalen Wellenhöhen an der Gewässersohle von 3,44 bis 11,47 m (entsprechend Wellenhöhen an der freien Oberfläche von 5 bis 20 m) durchgeführt.

### Bewertungskriterien zur Stabilität

Ein Versuch wurde dann als stabil bewertet, wenn über anfängliche Setzungen hinaus keine kontinuierlichen Vertikalverformungen an der Oberseite der Probe auftraten und wenn visuell keine fortschreitende Bodenverlagerung feststellbar war. Kontinuierliche Vertikalverformungen an der Oberseite resultieren aus anhaltenden Verlagerungen von Basismaterial in den Porenraum des Filters und zeigen damit instabile Verhältnisse an.

Das Verhalten des Filteraufbaus wurde durch visuelle Beobachtung mit Videokameras analysiert. Durch die schrittweise Steigerung der hydraulischen Einwirkung konnte die Materialbewegung an der Schichtgrenze und im Porenraum des Filters von außen beobachtet werden. Hierdurch war eine erste Einstufung der Filterstabilität möglich. Bild 10 zeigt einen nicht filterstabilen Aufbau mit Filter F1A2 vor und nach dem Versuch. Erkennbar ist die Setzung der Oberfläche, der Eintrag von Basismaterial in den Filter oberhalb der initialen Grenzschicht und das Einsinken des Filters in die Basis unterhalb der initialen Grenzschicht.

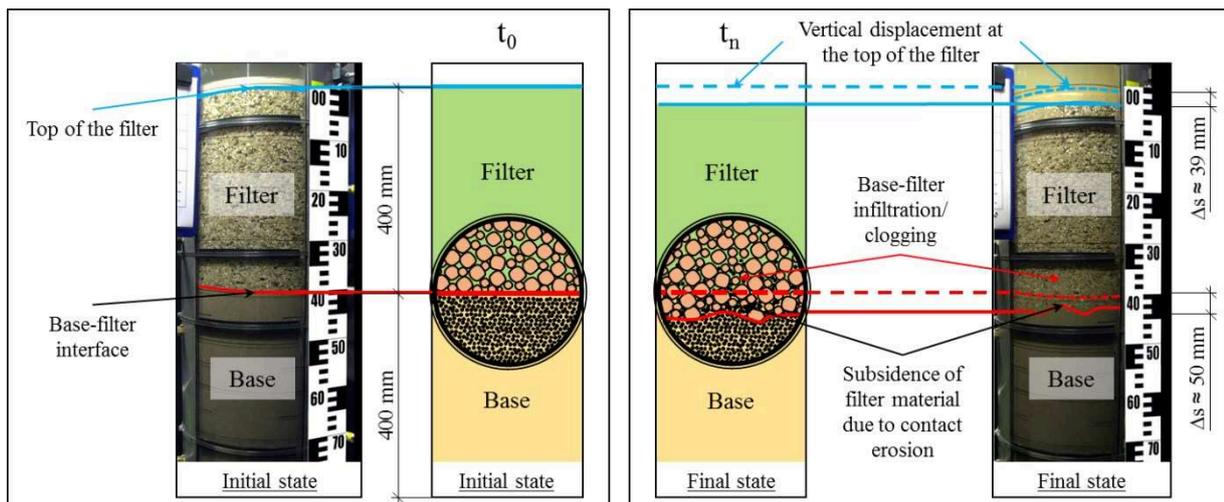


Bild 10: Visuelle Beobachtung des Filteraufbaus mit der Darstellung des Anfangs- und Endzustandes der Filterkonfiguration F1A2 (Kayser et al., 2016)

Es hat sich gezeigt, dass die Setzung der Filteroberkante in der gleichen Größenordnung der Verschiebung der Schichtgrenze nach unten liegt. Somit ist es möglich die Kontakterosion simultan zwischen visueller Beobachtung und der Setzungsmessung zu beschreiben.

Nach der Durchführung einer Versuchsreihe mit steigender hydraulischer Belastung wurde das Material schichtweise ausgebaut und kornanalytisch untersucht. Ein Ergebnis dieser Analyse ist in Bild 11 mit den Kornverteilungen der einzelnen Schichten für die Filterkonfiguration F1A2 dargestellt.

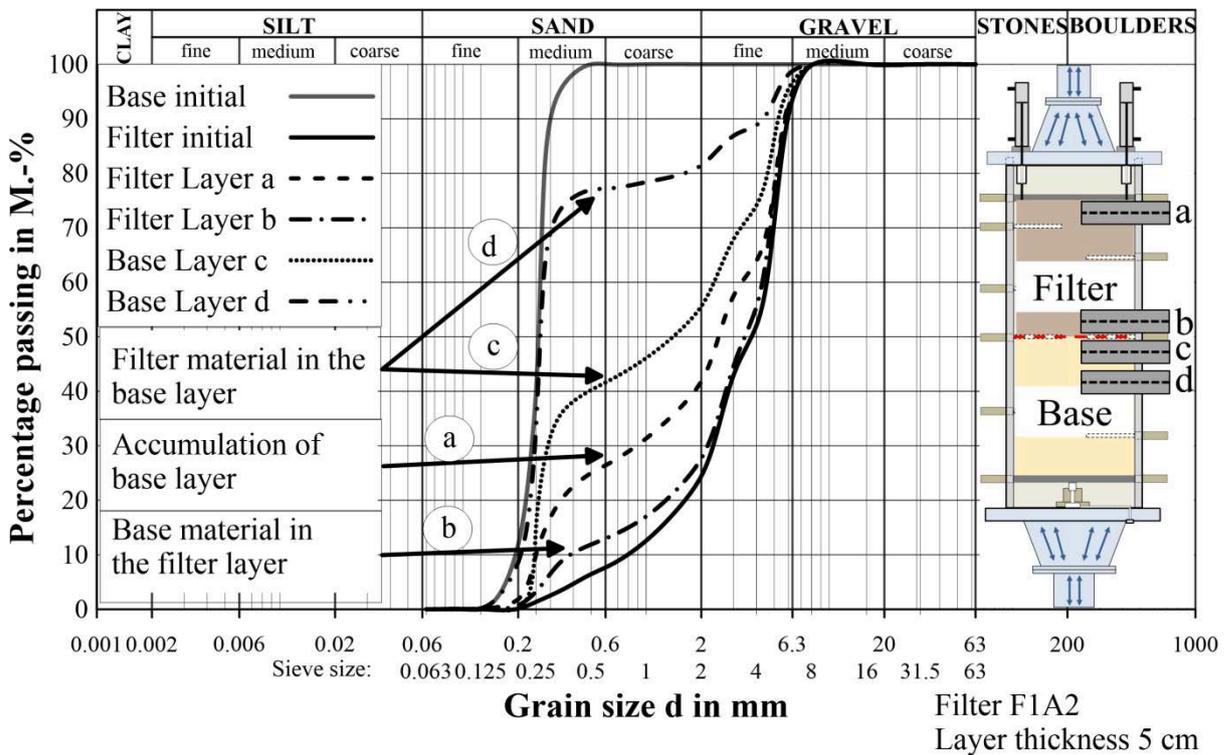


Bild 11: Kornverteilung der einzelnen Schichten der Filterkonfiguration F1A2 vor und nach Versuchsdurchführung (Kayser et al., 2016)

Aus der Kornverteilung lässt sich zusammen mit der visuellen Beobachtung deutlich erkennen, dass das Basismaterial in den Filter durch Kontakterosion eingetragen wurde. Direkt oberhalb der Schichtgrenze verändert sich der Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang von 0,8 mm auf 0,4 mm wodurch die Durchlässigkeit des Filters in diesem Bereich abnimmt. In der Basisschicht an der Schichtgrenze bis 10 cm unterhalb der Schichtgrenze ist eine deutliche Änderung der Kornverteilung durch das Einsinken des Filters erkennbar. Für die Filterkonfiguration F1A2 konnte Filtermaterial in einer Tiefe von bis zu 10 cm unterhalb der Schichtgrenze in der Basisschicht festgestellt werden. Im mittleren Teil des Filters bleibt der Ausgangszustand nahezu gleich. Im oberen Teil des Filters nimmt der Feinanteil erneut zu, da das feinere Material am geotextilen Filter der Kopfplatte zurückgehalten wird. In einem Filteraufbau mit freier Oberfläche würde dieses Basismaterial ausgetragen.

Ergänzend wurden Änderungen im geohydraulischen Verhalten, die auf Veränderungen der Kornzusammensetzungen an der Grenzschicht Boden-Filter zurückzuführen sind, als Kriterium für die Bewertung der Stabilität einer Basis-Filter-Kombination hinzugezogen (Kayser et al., 2016).

### Wesentliche Ergebnisse

Es konnte der hydraulische Gradient zusammen mit der Filtergeschwindigkeit über die zeitliche Änderung der geotechnischen und geohydraulischen Eigenschaften infolge von Kontakterosion beschrieben werden.

Aus den visuellen Beobachtungen zusammen mit der Messung der Verformung und durch die Messung der hydraulischen Parameter konnte eine Beschreibung der geohydraulischen Prozesse (Kontakterosion, Kolmation und Suffosion) über den zeitlichen Verlauf erfolgen.

Die Stabilität von Kornfiltern unter Wellenbelastung hängt neben den geometrischen Relationen zwischen Basis und Filter auch von der Wellenhöhe, der Wellensteilheit und dem daraus im Untergrund resultierenden Druckgradienten ab.

Im Basismaterial an der Schichtgrenze bis zu 10 cm unterhalb der Schichtgrenze konnte bei hoher hydraulischer Einwirkung lokale Verflüssigung beobachtet werden. Zeitgleich konnte durch die deutliche Abnahme des Verhältnisses von hydraulischem Gradienten zur Filtergeschwindigkeit  $a = i/v_f$  die lokale Verflüssigung und eine Erhöhung der Durchlässigkeit durch den vergrößerten Porenraum nachgewiesen werden.

Bisherige Untersuchungen zur Kontakterosion beziehen sich fast ausschließlich auf unidirektionale aufwärts oder abwärts gerichtete Strömung. Zum Vergleich wurde eine Versuchsreihe von unidirektionaler (aufwärts gerichteter) Strömung im Vergleich zu oszillierender Strömung bei gleichem hydraulischen Gradienten mit der Wechseldurchströmungsanlage durchgeführt.

Für die unidirektionale Durchströmung wurde der konstante Druckunterschied  $\Delta p$  zwischen dem oberen und unteren Zulauf entsprechend der Druckamplitude  $a$  eingesteuert. Der Druckunterschied ergibt sich dabei zu  $\Delta p = a$ . In Bild 12 sind die Zeitreihen des hydraulischen Gradienten und der Setzung der Filteroberkante in zwei Versuchen gezeigt. Zum einen wurde durch eine konstante Druckdifferenz von  $\Delta p = 0.18$  bar eine unidirektionale Strömung erzeugt und zum anderen wurde eine oszillierende Strömung mit der Amplitude  $a = 0.18$  bar erzeugt.

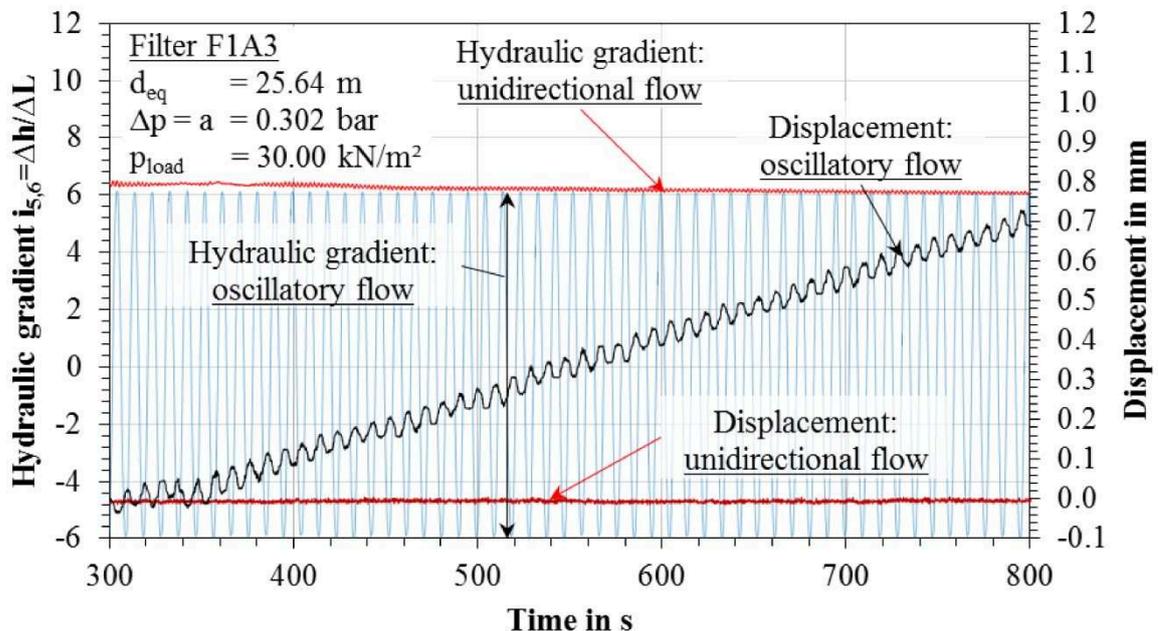


Bild 12: Vergleich der Filterstabilität unter unidirektionaler und oszillierender Strömung bei  $\Delta p = 0.180$  bar (Schürenkamp & Oumeraci, 2015)

Unter unidirektionaler Strömung konnte im Vergleich zur oszillierenden Strömung keine Materialbewegung beobachtet werden. Bei gleichen hydraulischen Gradienten wurde unter oszillierender Strömung eine fortschreitende Setzung der Filteroberkante aufgezeichnet und Kontakterosion konnte visuell beobachtet werden. In diesem Fall wurde das Filtermaterial F1A3 mit einem Abstandsverhältnis von  $d_{15F}/d_{85B} = 4.3$ ,  $d_{15F}/d_{50B} = 4.6$  und  $d_{50F}/d_{50B} = 19.3$  verwendet (siehe Bild 9). Das verwendete Filtermaterial liegt aufgrund der Ungleichförmigkeit von  $C_{U,F} \approx 6.7$  außerhalb der Anwendungsgrenzen des geometrischen Kriteriums nach Terzaghi ( $C_{U,F} < 2$ ) (BAW, 2013). Im Vergleich verschiedener geometrischer Filterkriterien für die verwendete Materialkombination liegt ein geometrisch stabiler Filter vor:

- Nach Terzaghi  $d_{15F}/d_{85B} = 4.3 \leq 5$  ist das Kriterium erfüllt,
- nach Laflaur (1989) mit  $d_{15F}/d_{50B} = 4.6 \leq 5$  ist das Kriterium erfüllt,
- nach Cistin und Ziems (1969) mit  $d_{50F}/d_{50B} = 19.3 \leq 18$  ist das Kriterium nicht erfüllt.

Die oben gezeigten Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche haben gezeigt, dass der Filter bei einem Gradienten von  $i = 6$  unter gleichgerichteter Strömung stabil ist und dass unter oszillierender Strömung (bei einer signifikanten Wellenhöhe von  $H_{1/3} = 12.18$  m und einer signifikanten (Peak-)Wellenperiode von  $T_p = 9.52$  s) die Kontakterosion begonnen hat und fortschreitet. Es ist zu beachten, dass bei dem gemessenen Setzungsverlauf der Filteroberkante die Summe aller Umlagerungsprozesse, die zu einer Verdichtung des Filteraufbaus führen, erfasst wird. Weitere Prozesse wie zum Beispiel die Verdichtung des Filters, sind in dieser Messung beinhaltet.

Die Filterkonfiguration F1C ist im untersuchten Bereich mit einem hydraulischen Gradienten von  $\Delta h/\Delta L = i < 24$  unabhängig von der hydraulischen Einwirkung filterstabil, sodass bei einem Abstandsverhältnis von  $d_{15F}/d_{50B} = 2.4$  ( $d_{15F}/d_{85B} = 2.3$ ) und einer Ungleichförmigkeit von  $C_{U,F} = d_{60F}/d_{10F} < 2.3$  (bei einer ausreichend hohen Filterauflast) ein geometrisch stabiler Filter erreicht wurde. Die Ergebnisse werden durch die Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983) bestätigt, in denen die geometrische Filterstabilität unter oszillierender Strömung bei einem Abstandsverhältnis von  $d_{15F}/d_{50B} < 4$  ( $n_F = 4$ ) erreicht wurde.

Eine geometrische Stabilität ist also unter Anwendung bisheriger geometrischer Kriterien von unidirektionaler Strömung nicht auf oszillierende Strömung in mariner Umgebung übertragbar. In der Betrachtung von fortschreitenden Windwellen mit Wellenhöhen an der physikalischen Grenze, beschrieben durch den Brecherindex  $H/d$  und der Wellensteilheit  $H/L$ , wird eine statische Stabilität nur bei sehr geringem Abstandsverhältnis von Basis und Filter erreicht.

#### 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Wechseldurchströmungsanlage (WDA) sehr gut geeignet ist, die Prozesse im Boden bei zyklischer, schwellender und wechselnder Durchströmung zu untersuchen. Ein wesentliches Ergebnis ist, dass die Bemessung von Kornfiltern unter zyklischer Beanspruchung deutlich enger vorzunehmen ist als unter unidirektionaler Durchströmung.

Aus den Untersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage haben sich neue Erkenntnisse und weitere offene Punkte ergeben. Zur Bewertung der Filterstabilität ist die Beschreibung der zeitlichen Änderung der geotechnischen Parameter und damit der geohydraulischen Prozesse durch Materialumlagerung infolge von Kontakterosion, Kolmation und Suffosion erforderlich. Es ist das Ziel, die geometrische Charakteristik von Basis- und Filter zusammen mit den hydraulischen Parametern (Wellenhöhe, Wellenperiode, Wassertiefe) in einem hydraulischen Stabilitätskriterium zu beschreiben.

Zusätzliche Langzeitversuche können Aufschluss über die dynamische Stabilität geben. Bei der Betrachtung von semi-stabilen oder dynamisch stabilen Kornfiltern werden Selbstheilungsprozessen bzw. das Erreichen eines Gleichgewichtszustands berücksichtigt. Weiterhin besteht Forschungsbedarf zu Materialkombinationen in Bezug auf sehr weit gestuftes, gebrochenes Filtermaterial und zu suffosiven Filtermaterialien.

Neben den geotechnischen Parametern bedarf es ebenfalls weiterer Untersuchungen zu unregelmäßigen Druckänderungen aus natürlichem Seegang und der Kombination aus verschiedenen Strömungskomponenten wie z. B. senkrecht oszillierender Strömung und paralleler unidirektionaler Strömung.

Durch den anpassbaren Aufbau der Wechseldurchströmungsanlage ist es möglich, weitere Materialien mit unterschiedlichen Schichtungen und Neigungen sowie verschiedener hydraulischer Einwirkungen zu untersuchen.

## 5 Literatur

BAW (1989): Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

BAW (1994): Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien,(RPG), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

BAW (2013): Merkblatt Materialtransport im Boden, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Cazzuffi, D.A.; Mazzucato, A.; Moraci, N.; Tondello, M. (1999): A new test apparatus for the study of geotextiles behaviour as filters in unsteady flow conditions. Relevance and use, *Geotextiles and Geomembranes* 17, p 313-329

Chen, R.-H.; Ho, C.-C.; HSU C.-Y. (2008): The effect of fine soil content on the filtration characteristics of geotextile under cyclic flow, *Geosynthetics International*, 15, No.2, p. 95-106

Chew, S.H.; Zhao, Z.K.; Karunaratne, G.P.; Tan S.A.; Delmas, P.H.; Loke, K.H. (2000): Retention of Geotextile Filter Subjected to Cyclic Wave Loading, in: *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*, Proceedings of sessions of Geo-Denver

de Graauw, A.; van der Meulen, T.; van der Does de Bye, M. (1983): Design criteria for granular filters. Delft: Delft Hydraulics (Publication / Delft Hydraulics; 287).

Demel, U. (2008): Experimentelle Bestimmung des Porenwasserdruckparameters zur Ermittlung von Porenwasserüberdrücken bei einem schnellen Wasserspiegelabsenk für feinkörnige, nichtkohäsive Böden, Diplomarbeit Technische Fachhochschule Georg Agricola zu Bochum, nicht veröffentlicht

Fannin, J.; Pishke, R. (2001): Testing Specifications for Geotextiles Filters in cyclic Flow applications, Proceedings to Geosynthetics 2001, IFAI, Roseville, MN. Conference Portland, pp. 423-435.

Hameiri, A, Fannin, RJ (2002): A Cyclic Gradient Ratio Test Device, in: *Geotechnical Testing Journal*, Volume 25, Issue 3

Holfelder, T., Hoch, S., Kayser, J. (2006): Effectiveness of granular filter under transient flow conditions, Proceedings 31. PIANC Kongress - 14. - 18. Mai 2006, Estoril, Portugal

IBF (2006): Bemessung von geotechnischen Filtern und instationärer Belastung, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Institut für Bodenmechanik und Felsbau (IBF), TH Karlsruhe, nicht veröffentlicht

Kayser, J.; Schürenkamp, D., Karl, F., Schwab, N., Oumeraci, H. (2016): A Test Apparatus for Alternating Flow in Geotechnical Engineering, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 39, No. 5, 2016, pp. 1–14, GTJ20150252

Köhler, H.-J. (1989): Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 66, S. 155 – 174, Karlsruhe

Köhler, H.-J. (2000): Filterbemessung aus geotechnischer Sicht, IfH-Workshop Filter- und Interstitialforschung–Strömung und Turbulenz, am 05.04.2000, Universität Karlsruhe

Klein, S. (2004): Überprüfung von Filterkriterien zur Bemessung von granularen Filtern zur Sicherung von Böschungen an Schifffahrtsstraßen, Vertieferarbeit Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Darmstadt, nicht veröffentlicht

Molenkamp, F., Calle, E.O.F., Heusdens, J.J. and Koenders, M.A. (1979), Cyclic filter tests in a triaxial cell, 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, England, 2: 97-101.

Palmeira, E.M., Totto, J., 2015, "Behaviour of geotextile Geotextile filters Filters in armoured Armoured slopes Slopes subjected Subjected to the action Action of wavesWaves", Geotextiles and Geomembranes No. 43, Ppp. 46-55

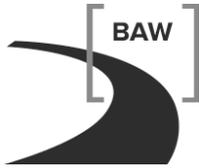
Schürenkamp, D., Oumeraci, H. (2015): "Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern – Zwischenbericht", Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI), Abt. Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, LWI-Bericht Nr. 1057, Braunschweig

Sherard, J. L., Dunnigan, L-P., Talbot, J.R. (1984): Basic properties of sand and gravel filters, Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 110(6), p. 684-700

Terzaghi, K.; Peck, R.-B. (1948): Soil mechanics in engineering practice, Wiley, New York

Bundesanstalt für Wasserbau

Karlsruhe, Dezember 2016



## **Anlage**

# **Systemzeichnung der Wechseldurchströmungsanlage**

Anlage: Systemzeichnung der Wechseldurchströmungsanlage

