Filterbemessung aus geotechnischer Sicht

H.-J. Köhler, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1. Einleitung

Werden Bodenschichtungen über-, unter- oder durchströmt, können Transportprozesse sowohl im Porenraum des Bodens als auch an Bodengrenzflächen ausgelöst werden. Auswaschungen und Bodenstrukturänderungen sind zu beobachten, die zu schädlichen Bodendeformationen bis hin zum völligen Bodengefügebruch führen können. Schäden dieser Art zu verhindern, ist eine der Aufgaben des Erd- und Grundbaues, die in ihrer Vielfältigkeit bis in die heutige Zeit hinein eine interessante Herausforderung des mit solchen Fragen konfrontierten Ingenieurs geblieben sind. Initiiert werden diese Bodenpartikelbewegungen durch Strömungskräfte, die durch hydraulische Gradienten bewirkt werden, deren Größe die jeweils örtlich maßgebenden Grenzbedingungen überschreiten. Aus ihrem Gefüge heraus erodierte Bodenpartikel werden solange im strömenden Medium in Suspension gehalten, bis die Verringerung der wirkenden Strömungskräfte eine Sedimentation dieser Teilchen am neuen Ort zuläßt oder diese in porigen Strukturen erzwungenermaßen wieder ausgefiltert werden. Veränderungen dieser Art sind natürliche Gleichgewichtsprozesse, wie sie z. B. an den Ufern und an der Gewässersohle eines Flusses immer wieder stattfinden. Mit den sich zeitlich ändernden Abflußbedingungen sind die jeweils wirkenden Erosions- und Sedimentationsprozesse in ihrer Wechselwirkung eng miteinander verknüpft. Die einhergehenden morphologischen Veränderungen zu beurteilen und zu beeinflussen, ist eine der typischen Aufgaben des Wasserbauingenieurs. An der Grenze zwischen dem fließenden Wasser und dem Boden an der Gewässersohle und an den Böschungen treffen sich die Belange der Wasserbauer und der Bodenmechaniker. Beide Berufsdisziplinen sind gefragt, wenn z. B. die Stabilität einer Gewässersohle oder die einer Böschung nach ingenieurmäßigen Kriterien auf Dauer gesichert werden sollen.

Während bei geotechnischen Beurteilungen der Standsicherheit von Bauwerken üblicherweise vorrangig nach dem Sicherheitsfaktor gefragt wird, sind bei den im natürlichen Gleichgewicht stehenden Erosions- und Sedimentationsprozessen einer Flußsohle schon der Erhalt dieses dynamischen Gleichgewichtes ein bedeutendes Ergebnis einer nach wasserbaulichen Kriterien durchgeführten und beurteilten Untersuchung. Hier unterscheiden sich die beiden Disziplinen. Im Wasserbau wird das natürliche Gleichgewicht allgemein zugelassen, im konstruktiven Ingenieurbau muß eine zusätzliche Sicherheit eingehalten werden. Diese ist nur mit zusätzlichen Bauvorkehrungen zu erreichen, die nach anerkannten Ingenieurstandards dimensioniert werden müssen, um das geforderte Sicherheitsniveau oberhalb des Gleichgewichtes ($\eta = 1$) nachzuweisen und zu gewährleisten. An Unterwasserböschungen erfolgt eine solche Sicherung durch zusätzliche Deckschichten, die den maßgeblichen Belastungen standhalten müssen. An überströmten Gewässersohlen könnte man ähnlich vorgehen, nur wäre dieser Eingriff in die natürlichen Abflußbedingungen mit erheblichen Kosten verbunden und die Auswirkungen auf den natürlichen Prozess des Geschiebetransportes könnten nach dem derzeitigen Wissensstand noch nicht einmal sicher genug eingeschätzt werden.

Die Notwendigkeit, Filter zu dimensionieren, erfordert die Beurteilung der bodenphysikalischen Kennwerte der betreffenden Bodenstrukturen und die Kenntnis der angreifenden Strömungskräfte nach Wirkdauer, Größe und Richtung. In der Geotechnik werden die allgemein anerkannten Filterregeln angewendet, die an körnigen Materialien unter stationärer, einseitiger Durchströmung untersucht wurden. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden zahlreiche Anwendungsregeln und Diagramme aufgestellt, die z. B. das erforderliche Abstandsverhältnis A_{50} der mittleren Korndurchmesser d_{50} des Filtermaterials gegenüber dem des zu schützenden Bodens beschreiben. Mit diesem Abstandsverhältnis werden geometrische Anforderungen gestellt, die den Korntransport verhindern sollen. Gleichzeitig aber soll auch eine ausreichend große Durchlässigkeit des Filtersystems erhalten bleiben, die ein Dichtsetzen verhindert, um die Dränfunktion des Filters auf Dauer zu gewährleisten. Obwohl in der Zwischenzeit viele Erfahrungen zur Anwendung von Filtern vorliegen, bleiben noch immer viele Unwegbarkeiten in der sicheren Dimensionierung eines Filtersystems bestehen. Dies gilt insbesondere für alle Belastungsarten und Strömungsbedingungen, bei denen wechselseitige Durchströmungsrichtungen und schnelle Gradientenänderungen auftreten. Bei der Anlage und Pflege von Wasserstraßen, Flußsystemen, Küstenschutzbauten bis hin zu Talsperren und Hochwasser-Retentionsbecken haben schnelle Belastungsänderungen einen wesentlichen Einfluß auf die Bauwerkssicherheit. Filtersysteme müssen auch diesen instationären Belastungen standhalten. Die Einhaltung der Kriterien zur mechanischen und hydraulischen Stabilität eines Filtersystems sind zwei diametral entgegengesetzt wirkende Eigenschaften, die es gilt zu kontrollieren und zu gewährleisten.

2. Durchströmte und wasserwechselbelastete Böschungen

Ufer-, Damm- und Deichböschungen, die durchströmt werden, sind in ihrer Standsicherheit nicht nur gefährdet durch den Strömungsdruck des fließenden Wassers, sie können auch durch innere und äußere Erosionsprozesse in ihrer Stabilität zerstört werden, wenn z. B. Schutzschichten fehlen und maßgebliche Filterkriterien zwischen unterschiedlichen Bodenschichten nicht eingehalten sind. Die Schadensmechanismen an wasserbelasteten Böschungen sind vielseitig.

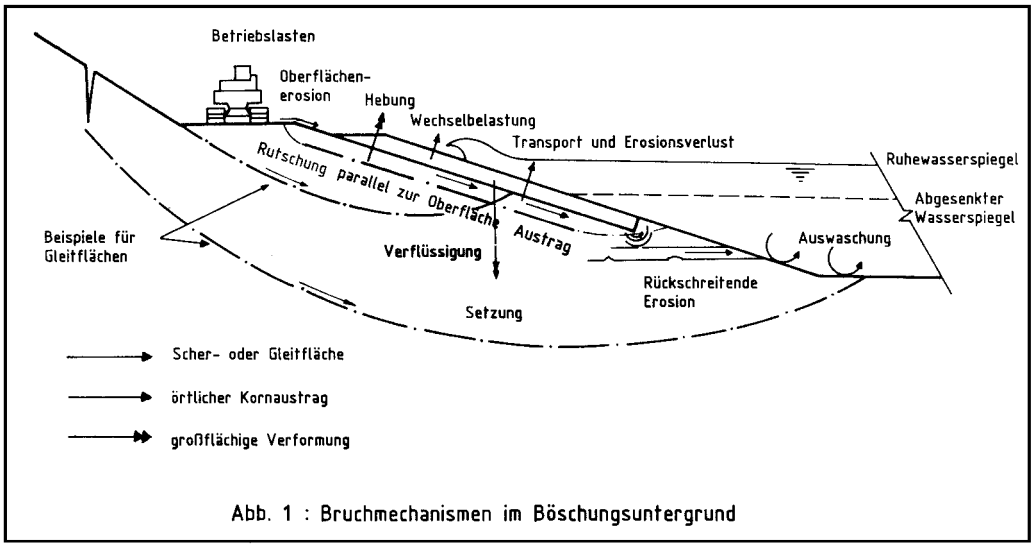


Abb. 1 Schadensmechanismen an wasserbelasteten Böschungen

Die Abbildung 1 beschreibt verschiedene Bruchmechanismen im Böschungsuntergrund, die von der Rutschung auf potentiellen Gleitzonen über großflächige Verformungen und örtlichen Bodenaustrag bis hin zur rückschreitenden Erosion reichen. Setzungen, Hebungen, aber auch Verflüssigungen des Bodens sind möglich. Letzteres gilt insbesondere für extern einwirkende schnelle Druckänderungen. Hier kommt nämlich noch ein weiteres Phänomen bei der Beurteilung von wasserdurchströmten Erddämmen und Deichen hinzu, das mit einer Druckdämpfung zu erklären ist, die bei wechselnden Druckgradienten im sogenannten wassergesättigten Boden auftreten. In der Ingenieurpraxis werden Böden, die dauernd unter Wasser liegen, als wassergesättigt angenommen. Dieser Zustand beschreibt den Boden als Zweiphasensystem, bestehend aus Feststoff- und Porenwasseranteil. Die Poren dieser Böden sind vollständig mit Wasser gefüllt und die Porenflüssigkeit wird als inkompressibel betrachtet. In Wirklichkeit enthält das Porenwasser natürliche Anteile von fein verteilten Gaspartikeln auch im sogenannten gesättigten Bodenbereich unter Wasser. Schon geringe Gasanteile verändern die physikalischen Eigenschaften der Porenflüssigkeit, was bei extern einwirkenden Druckänderungen erhebliche Auswirkungen auf das Verformungs- und Stabilitätsverhalten solcher Böden hat. Besonders bei schnell einwirkenden Druckänderungen müssen diese Eigenschaften berücksichtigt werden.

Die im Porenwasser eingeschlossenen Gasblasen reagieren bei extern einwirkenden Druckänderungen, dem Boyle-Mariotte´schen Gesetz folgend, mit entsprechenden Volumenänderungen, die lokale Porenwasserfliesszustände auslösen und die bei deren Verhinderung, z. B. infolge geringer Wasserdurchlässigkeit des Bodens, zu vorübergehenden Porenwasserdruckreaktionen führen. Solche extern einwirkenden Druckfluktuationen verändern damit auch die effektiven Spannungen im Boden unter Wasser, die bei Einführung des Modells eines Dreiphasensystems, bestehend aus Wasser, Bodenpartikel und dispers im Porenwasser verteilten Gasblasen, in ihrer Grösse berechnet und bei den sich daraus resultierenden Lastverformungseigenschaften solcher Art belasteter Böden berücksichtigt werden können. Oszillierende Wasserspiegel, schnelle Wasserspiegelabsenkungen (Außen- oder Grundwasser), schnell einwirkende statische oder dynamische Lasten aber auch barometrische Druckfluktuationen können Auswirkungen auf die Stabilität solcher Böden haben. Unter Beachtung der Steifigkeit E_s, Wasserdurchlässigkeit k und der jeweils wirkenden Spannungszustände im Untergrund sind die sich zeitlich verzögert einstellenden Druckreaktionen im unter Wasser liegenden Boden als Porenwasserdruckänderung $\Delta u(z,t)$ zu bestimmen. Kontrolliert wird dieser transiente Porenwasserdruckzustand durch den Prozess der Konsolidation und kann daher in seiner physikalischen Auswirkung auch mit dem Typ einer erweiterten Konsolidationsgleichung beschrieben werden, wie sie von Biot (1) erstmals aufgestellt wurde.

An Boden-Wasser-Grenzflächen gewinnen diese Druckänderungen erheblichen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Bodens unter Strömungs- und Wellenangriff. Ungeschützte Böschungen und Sohlen in natürlichen Fluss- und Küstenregionen unterliegen diesen Wasserbelastungen oftmals nicht ohne Schäden. Sie geben sich zu erkennen durch Verformungen und Rutschungen sowie progressiv fortschreitende Erosionsprozesse. An den durch die Schiffahrt belasteten Wasserstraßen sind Schäden dieser Art möglichst zu vermeiden, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Wassertransports zu gewährleisten, aber auch die Sicherheit der die Wasserstrassen begrenzenden Böschungen und die daran angrenzenden Bebauungsflächen nicht zu gefährden. Sohl- und Uferschutzkonstruktionen sollten daher ausreichend stabil gegen Abgleiten, Abheben, Verformung und Erosion sein und darüber hinaus einen ausreichend sicheren Filterschutz gegen Ausspülen und Auswaschen des Untergrundes möglichst auch langfristig gewährleisten.
Modellversuche und numerische Berechnungen haben gezeigt, daß die eindimensionale Konsolidationsgleichung benutzt werden kann, um die instationäre Porenwasserdruckreaktion im Untergrund zu beschreiben. Es konnte nachgewiesen werden, daß das Porenwasser einen beachtlichen Anteil von Luft in der Größenordnung zwischen 5 und 15 % enthält, wodurch die Druckdämpfung im Boden erklärt werden kann.
Die maßgebende Gleichung zur Beschreibung dieses Porenwasserdruckphänomens kann wie folgt angegeben werden:

$$k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = n\beta' \rho \, g \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

wobei gilt:

β'	=	Kompressibilität des Porenwassers (Wasser-Luft-Gemisch)
ε	=	volumetrische Dehnung im Boden
n	=	Porenvolumen des Bodens
z	=	Bodentiefe unterhalb des Wassers
t	=	Verlaufszeit
φ	=	piezometrische Druckhöhe
k	=	Wasserdurchlässigkeit
g	=	Gravitationskonstante
ρ	=	Dichte des Wassers

Bei Anwendung dieser Gleichung können die Porenwasserdruckraktionen im wasserdruckwechselbelasteten Boden nachgewiesen werden, die das Maß der Stabilität von Böschungen sowie Sohl- und Uferschutzkonstruktionen in nicht unerheblicher Größe beeinträchtigen. Auch in anderen bodenmechanisch relevanten Nachweisen ist diese Gleichung von Bedeutung.
Der Einfluß des Luftgehalts im Porenwasser sollte zukünftig nicht mehr außer Acht gelassen werden, insbesondere, was die Interaktion zwischen Wasser und Boden betrifft. Wasserspiegeländerungen rufen Druckreaktionen im unter Wasser stehenden Boden hervor, die die Standsicherheit von Böschungen gefährden. Rutschungen und Bodenverlagerungen werden ausgelöst, wenn Sunk- und Wellenerscheinungen auftreten. Besonders betroffen von dieser Belastung sind Uferbefestigungen entlang von Schiffahrtswasserstraßen, wo besonders schnelle, kurzzeitig wirkende Spiegeländerungen zu Schäden an den Böschungen führen können, die in der Regel durch Absunkgrößen von mehr als 60 cm erzeugt werden. Eine Ursache dieser dabei zu beobachtenden Druckdämpfung im Boden liegt an der im Porenwasser enthaltenen Luft, wodurch Porenwasserüberdruckreaktionen in potentiellen Gleitflächen zumeist böschungsparallele Rutschvorgänge auslösen.
In der Abbildung 2 sind zwei Beispiele von Belastungen aus Schiffahrt und Wind dargestellt. Mit Überlagerungen beider Belastungsvorgänge muß gerechnet werden.
Druckreaktionen dieser Art sind aber nicht nur für Böschungen gefährlich, sie treten im gesamten unter Wasser stehenden Boden auf und damit auch an der Gewässersohle. Natürlich reicht ihre Wirkung auch vor und hinter schräg oder senkrecht stehende Uferverbauwände, was zu ähnlichen Standsicherheitsbetrachtungen Anlaß gibt, wie sie für sunkbelastete Böschungen zur Anwendung kommen.
Die Ursache für die im Boden auftretende Porenwasserdruckdämpfung, die diese Porenwasserüberdruckreaktion auslöst, findet ihre Erklärung darin, daß das Porenmedium Wasser des Bodens relativ große Anteile von Luft und anderen gasförmigen Stoffen auch noch unterhalb des Grundwasser- und Kanalwasserspiegels enthält. Wir haben es also auch unterhalb des Wasserspiegels mit quasi ungesättigten Böden zu tun, so daß wir nicht von dem bisher üblicherweise angenommenen Zweiphasen-

system (Feststoff- und Wasseranteil) ausgehen können, sondern vielmehr auch die dritte Phase der gasförmigen Stoffe im Boden unterhalb des Wasserspiegels bis zur Größenordnung von 20 % berücksichtigen müssen.

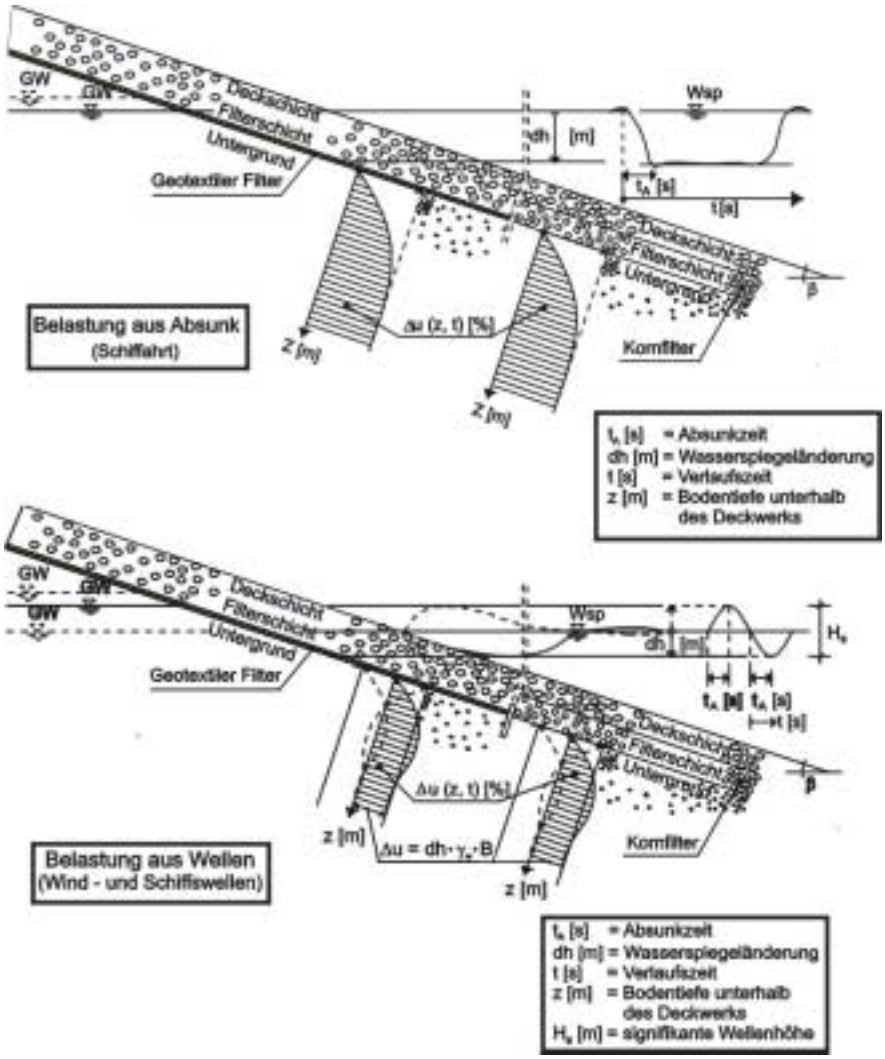


Abb. 2 Porenwasserüberdruck, induziert aus Schiffsabsunk sowie Schiffs- und Windwellen

In Wirklichkeit treten diese Porenwasserdruckdämpfungen stets auf, sie sind immer deutlich vorhanden, solange der Umgebungsdruck nicht wesentlich größere Werte als 20 [m WS] annimmt (Druckdämpfungen dieser Art sind erst in Wassertiefen von rund 80 [m WS] nicht mehr von Bedeutung). Unterhalb des wassersunkbelasteten Bodens entsteht ein zeitlich und tiefenabhängig veränderlicher Porenwasserdruck, der sich in unterschiedlichen Bodentiefen mit zeitlicher Verzögerung vereinfachend in einer exponentiellen Druckverteilung beschreiben läßt.

In der Abbildung 3 ist diese Druckwirkung dargestellt, verteilt über die Zeit t [s] und Bodentiefe z [m], senkrecht zur Eintragsfläche gerechnet. Als vereinfachender Rechenansatz zur Berücksichtigung des dabei wirksam werdenden instationären Porenwasserüberdrucks $\Delta u(z,t)$ wird nachfolgend das anzusetzende Absenkungsmaß der Wasserspiegeländerung - ($\gamma_w \cdot dh_W$) - mit dem Dämpfungsglied einer exponentiellen Übertragungsfunktion B(z,t) multipliziert.

$$\Delta u(z,t) = \gamma_w \cdot dh_W \cdot B(z,t) \qquad \text{Exponentialgleichung (1)}$$

$$\text{mit} \quad B(z,t) = (1 - a(t) \cdot e^{-b(t) \cdot z})$$

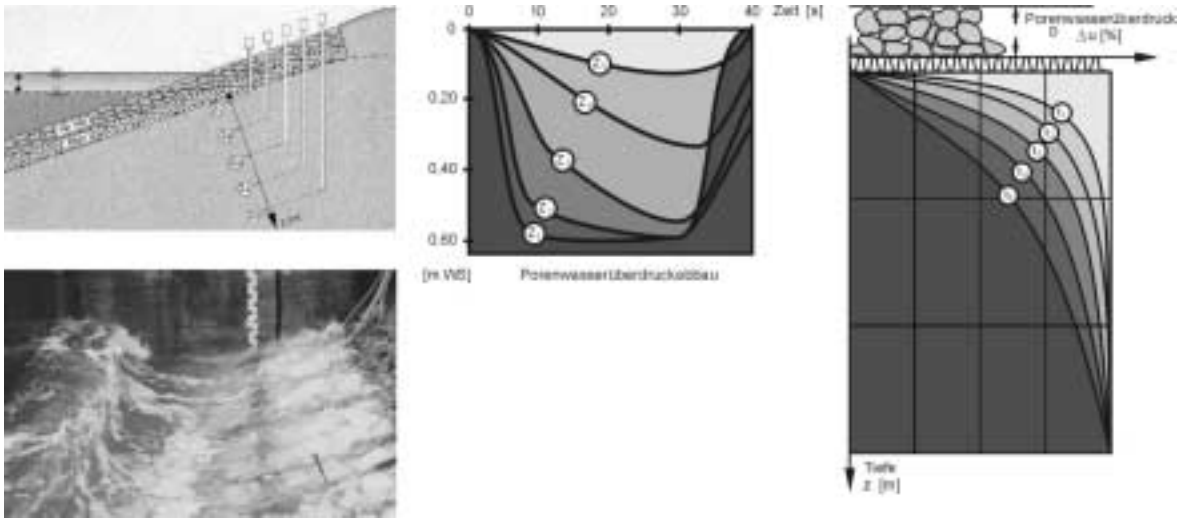


Abb. 3 Wirkung der Porenwasserdruckdämpfung in dem mit Wasserspiegelabsunk belasteten Untergrund

3. Belastung aus einer laufenden Welle

Gemessene Porenwasserdruckausbreitungen als Folge von Wasserspiegelhebungen und Wasserspiegelsenkungen haben deutlich gemacht, daß bei Anwendung der Diffusionsgleichung zur Berechnung von Porenwasserdruckentwicklungen unter dem Einfluß vorhandener Luft im Porenwasser das Phänomen der Porenwasserdruckdämpfung numerisch nachgebildet werden kann.
Die folgende Abbildung 4 zeigt die Auswirkung von Wellen auf die zeitliche Entwicklung des Porenwasserdruckverlaufs im Sohl- und Böschungsuntergrund analog zur Entstehung von Porenwasserüberdruck als Folge der schnellen Wasserspiegelsenkung bei Schiffahrtsbelastung. Ausgelöst durch oszillierende Wellen entstehen durch die wechselseitig einwirkenden instationären Porenwasserdrücke Δu(z,t) Ein- und Ausströmungsvorgänge in dem durch Wellen belasteten Boden, wodurch die in natürlichen Gewässern ständig stattfindenden Bodenumlagerungen an der Gewässersohle oder an brandungsbelasteten Sandböschungen eindrucksvoll zu begründen sind. Wellenstrukturen an der Wasseroberfläche bilden sich ab an der Oberfläche der Gewässersohle, die sich in verändernder Riffelbildung analog zur Änderung der einwirkenden Wellenstrukturen direkt widerspiegeln.

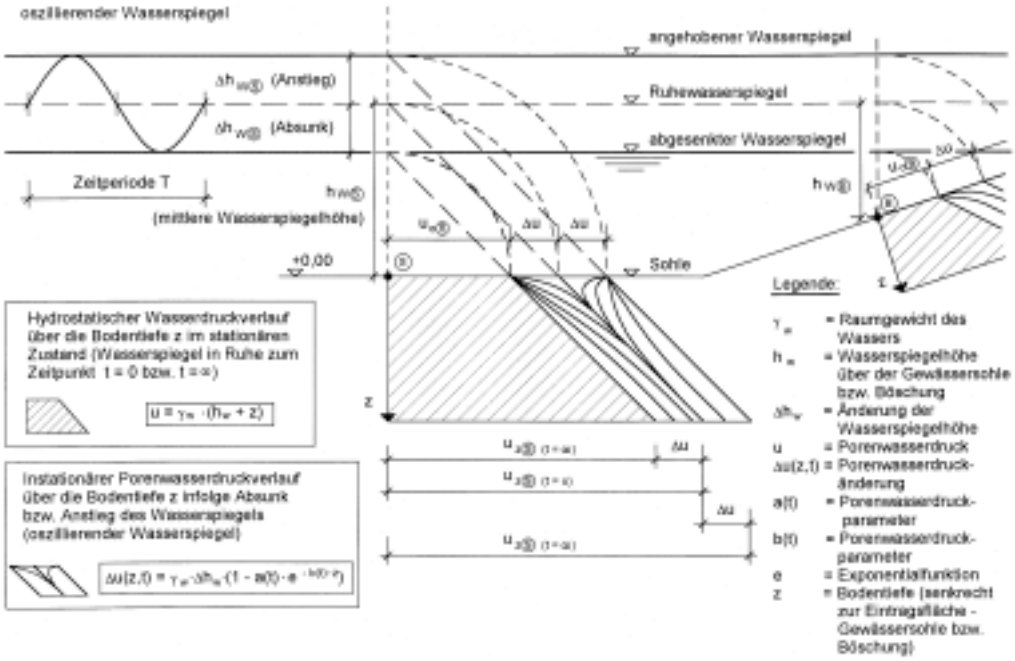


Abb. 4 Oszillierende Wasserspiegel - Wirkung auf Sohle und Böschung

Eindimensionale und zweidimensionale numerische Berechnungsverfahren mit dem Lösungsprinzip der finiten Differenzen genügen, um die an Wasserstraßen oder auf wellenbelasteten Böschungen einwirkenden Druckänderungen in ihrem zeitlichen Verlauf ausreichend genau vorauszuberechnen. Dabei ist es auch möglich, unterschiedliche Schichtungshorizonte im Boden sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Ausdehnung zweidimensional zu erfassen.

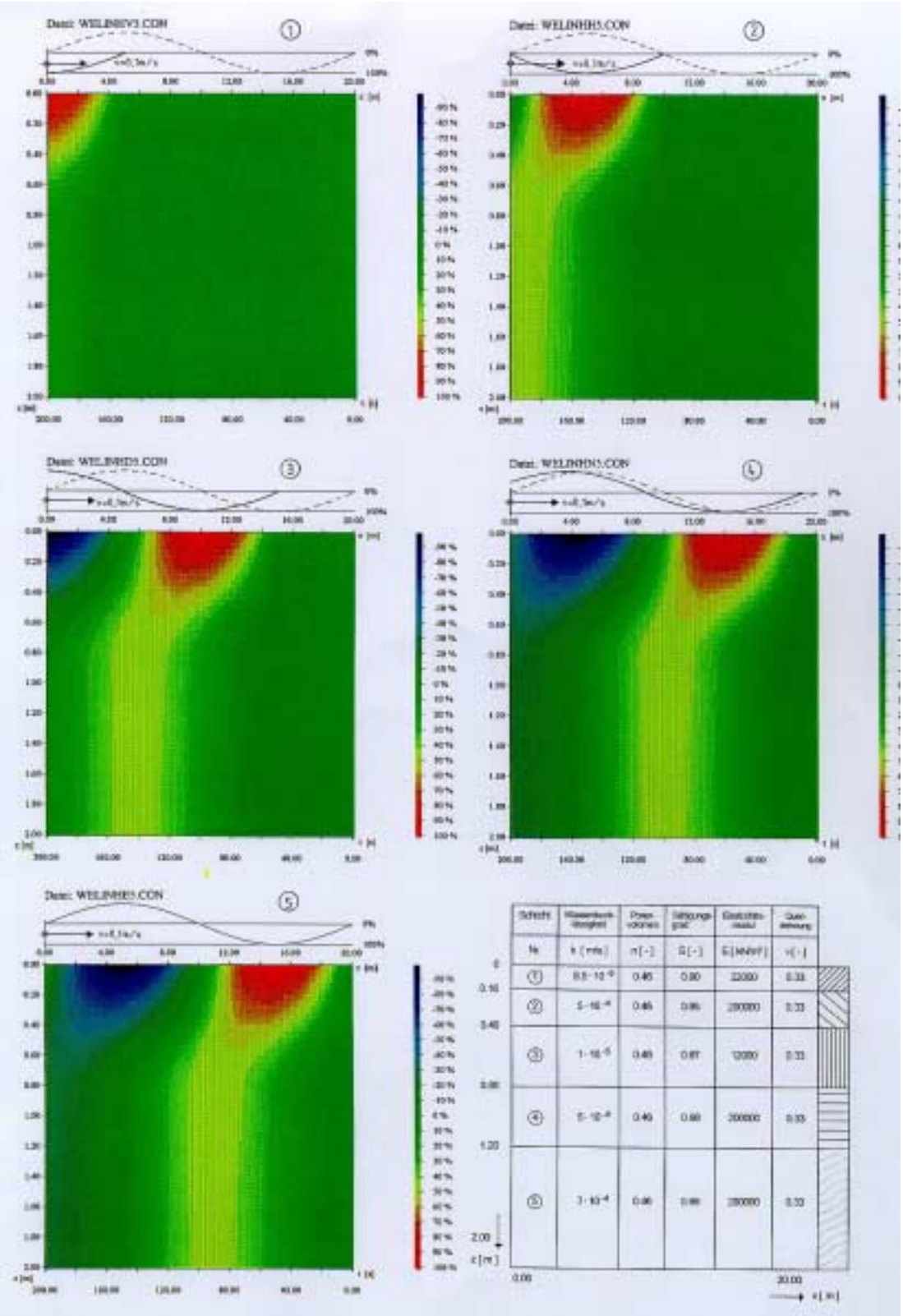


Abb. 5 Porenwasserdruck im unter Wasser liegenden Boden unter einer laufenden Welle – Ergebnisse einer zweidimensionalen numerischen Berechnung im inhomogenen Untergrund

Ein Beispiel einer solchen Berechnung zeigt die Abbildung 5 für den Lastfall einer über die Gewässersohle laufenden Welle mit einer Wellenlänge von 20 m für unterschiedliche Laufzeiten, mit der die Welle den 20 m langen Streckenabschnitt L [m] der Gewässersohle, ausgehend vom linken Rand, durchläuft. Die in den Kreisen eingezeichneten Numerierungen (1) bis (5) beschreiben hierbei den jeweiligen Einwirkungsort der mit einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit v = 0.1 m/s laufenden Welle
(1) x = 0.25 L [m], (2) x = 0.5 L [m], (3) x = 0,75 L [m], (4) x = 0,95 L [m] und
(5) x = 1.0 L [m]
Der inhomogene Bodenaufbau besteht bis in eine Tiefe von 2 m unterhalb der Gewässersohle aus fünf unterschiedlichen Bodenschichten. Die Porenwasserdruckausbreitung wird ganz wesentlich von den maßgeblichen Bodenkennwerten wie Wasserdurchlässigkeit k [m/s], Porenvolumen n [-], Sättigungsgrad S [-], Elastizitätsmodul E [kN/m^2] und Querdehnungszahl ν [-] charakterisiert.
In der Abb. 5 sind die jeweils wirkenden Porenwasserdruckverläufe für die einzelnen erreichten Standorte der laufenden Welle (1) bis (5) in den ausgewählten Vertikalschnitten x = 2 m, 4 m, ... bis 18 m dargestellt. Deutlich ist der sich ständig ändernde Einfluß der laufenden Welle auf die jeweilige Druckentlastungswirkung im inhomogenen Untergrund zu erkennen. Die Differentialgleichung zur zweidimensionalen Berechnung der jeweils wirkenden Standrohrspiegelhöhen φ [m] (Piezometer) über den Bodentiefen z [m] unterhalb der Gewässersohle, wie sie durch wandernde Oberflächenwellen oder den aus der Schiffahrt resultierenden Wasserspiegeländerungen im unter Wasser stehenden Untergrund hervorgerufen werden, kann vereinfachend wie folgt beschrieben werden,

$$\frac{\partial}{\partial t}\varphi(x,z,t) = D(z,t)\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\varphi(x,z,t) + \varepsilon(z,t)\frac{\Delta}{\Delta t}\varphi(x,z,t)$$

wobei die substantielle Ableitung $\Delta\varphi/\Delta t$ eine Änderung von φ darstellt, die in dem hier vorliegenden Anwendungsfall - hier vereinfachend nur als eindimensionaler Vorgang betrachtet – sich mit dem durch die Laufgeschwindigkeit der Sunk- bzw. Wellenbelastung ändernden Druckabbau in vertikaler Richtung des Bodens z [m] einstellt.
Die Änderung von φ erklärt sich durch die Berücksichtigung der vorherigen Entwicklung für das zur Zeit t - dt am Ort r(t) - v(x,z.t) dt beobachtete Element. Dieser Effekt wird als substantielle Ableitung in der Differentialgleichung berücksichtigt. Damit ergibt sich mit der substantiellen Ableitung

$$\frac{\Delta}{\Delta t}\varphi(x,z,t) = \frac{\partial}{\partial t}\varphi(x,z,t) - v(x,z,t)\,\nabla\varphi(x,z,t)$$

sowie der Diffusionskonstante D(z,t) als Funktion der Bodentiefe z [m] und Zeit t [s]:

$$D(z,t) = \frac{k(z,t)}{\rho\, gn(z,t)\left(\beta + \dfrac{1 - S(z,t)}{p_{atm.} + \rho\, gh_w + \rho\, gz}\right) + \rho\, g\,\alpha_E(z,t)}$$

und den folgenden Parametern bzw. Variablen:

- Kompressibilität des Wasser-Luft-Gemisches

$$\beta'(z,t) = \left(\beta + \frac{1 - S(z,t)}{p_{atm} + \rho g h_w + \rho g z}\right)$$

- Kompressibilität des sich elastisch verhaltenden Bodens

$$\alpha_E(z,t) = \frac{(1+\nu(z,t))\,(1-2\nu(z,t))}{E(z,t)\,(1-\nu(z,t))}$$

- die Volumendehnung eines Bodenelementes

$$\varepsilon(z,t) = \frac{\alpha_E(z,t)}{n(z,t)\cdot\beta'(z,t)+\alpha_E(z,t)}$$

mit den Kennwerten

- für den Boden

$E(z,t)$	[kN/m^2]	=	Elastizitätsmodul
$\nu(z,t)$	[-]	=	Querkontraktionszahl
$n(z,t)$	[-]	=	Porenvolumen
$S(z,t)$	[-]	=	Sättigungsgrad
$k(z,t)$	[m/s]	=	Wasserdurchlässigkeit
$\alpha_E(z,t)$	[m^2/kN]	=	Kompressibilität des Bodens
$\varepsilon(z,t)$	[-]	=	Volumendehnung
$E_S(z,t)$	[kN/m^2]	=	Steifeziffer des Bodens

- für die Flüssigkeit

ρ	[kg/m^3]	=	Dichte des Wassers
β	[m^2/kN]	=	Kompressibilität des Wassers
$\beta'(z,t)$	[m^2/kN]	=	Kompressibilität des Wasser-Luft-Gemisches

- und die sonstige Umgebung

$p_{atm.}$	[kN/m^2]	=	Atmosphärendruck (101.3 [kN/m^2])
$\rho g h_w$	[kN/m^2]	=	Hydrostatischer Wasserdruck oberhalb der Gewässersohle bzw. der Böschungsoberfläche (Funktion der Wasserhöhe h_w)
$\rho g z$	[kN/m^2]	=	Hydrostatischer Wasserdruck unterhalb der Gewässersohle bzw. der Böschungsoberfläche (Funktion der Bodentiefe z, gerechnet senkrecht zur Eintragsfläche)
g	[m/s^2]	=	Gravitationskonstante (9.81 [m/s^2])

Für den einfachen Fall einer homogenen Bodenschicht kann der maßgebende Verlauf des Porenwasserüberdrucks über die Bodentiefe z [m] für den Belastungsfall Schiffahrt unmittelbar in Relation zur Wasserdurchlässigkeit k [m/s] des Bodens der Abb. 6 entnommen werden. Das Diagramm beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Porenwasserdruckparameter b(t) und der Wasserdurchlässigkeit k des Untergrundes zum ungünstigsten Zeitpunkt t, unmittelbar nach Ablauf der Absunkzeit t_A mit dem Absunkmaß z_A, das für die Bemessung von Deckwerken an schiffahrtsbelasteten Wasserstraßen als maßgebend angenommen wird.
Der jeweilig maßgebende Porenwasserdruckparameter $b(t_A)$ korrespondiert mit der Wasserdurchlässigkeit k [m/s] des Bodens und gilt hierbei für die aus Schiffahrt resultierenden Absunkgeschwindigkeiten zwischen $v_{zA} > 12$ cm/s und $v_{zA} < 18$ cm/s.

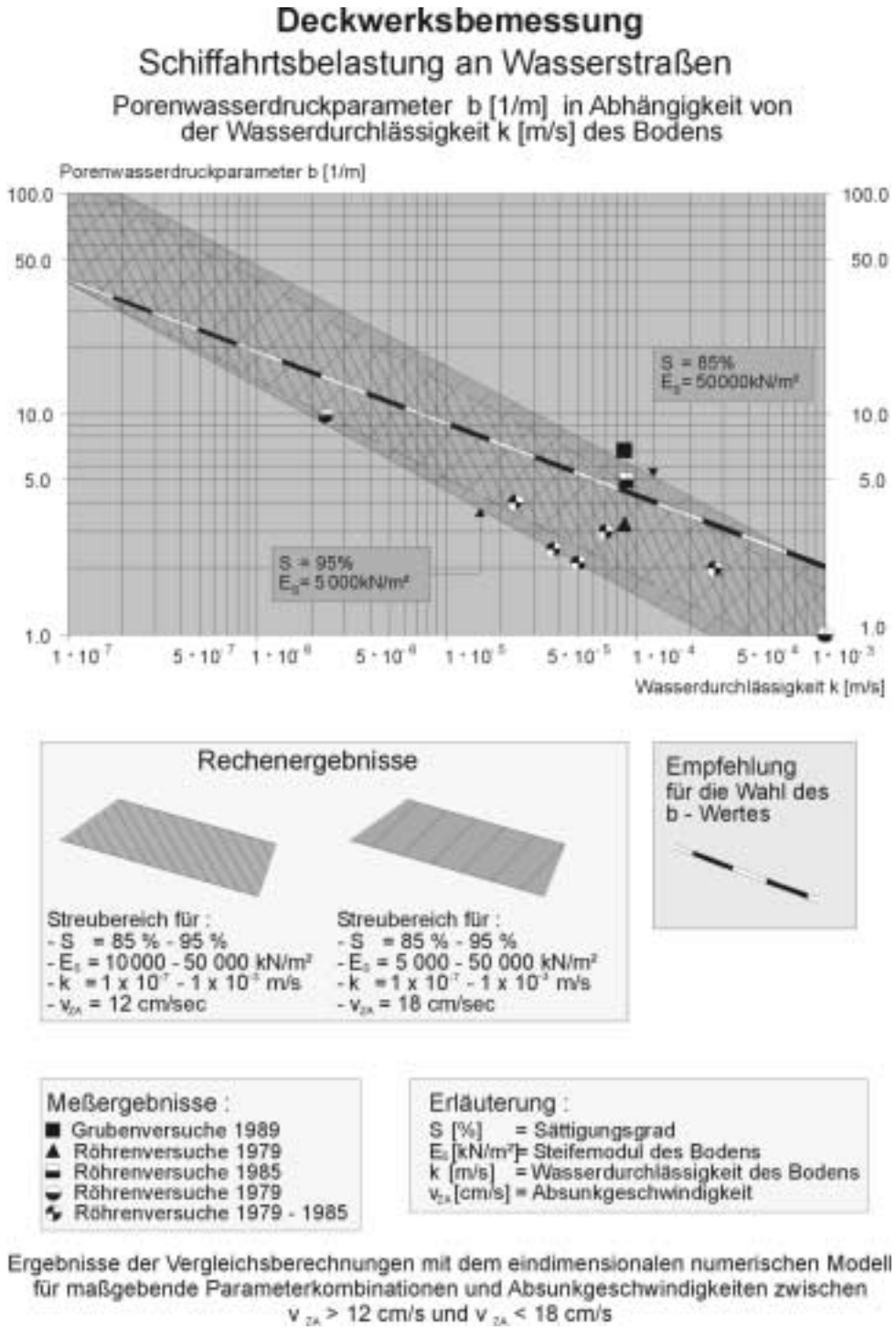


Abb. 6 Maßgebende Porenwasserdruckparamter b(t) [1/m] für den Lastfall Absunk z_A [m] aus Schiffsverkehr an Binnenwasserstraßen und ihre Zuordnung zur Wasserdurchlässigkeit k [m/s] des wasserdruckbelasteten Bodens

Eine noch weitergehendere Interpretation für den maßgebenden Porenwasserdruckparameter b(t) in Abhängigkeit von der Absunkdauer t_A [s] bis zum Erreichen des tiefsten Punktes der auf die Gewässersohle einwirkenden Wasserspiegelsenkung zeigt die Abbildung 7.

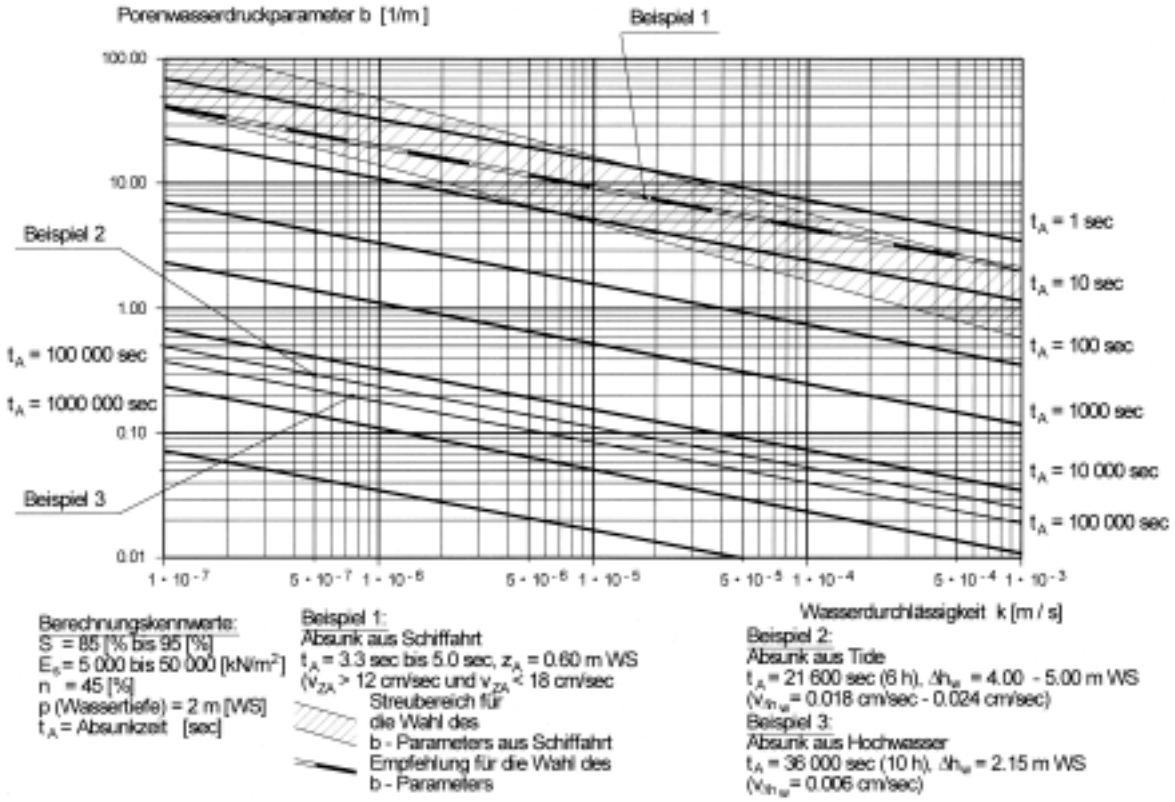


Abb. 7 Porenwasserdruckparameter b(t) [1/m] in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit k [m/s] des Bodens mit unterschiedlicher Absunkdauer t_A [s]

Das Beispiel 1 (Absunk aus Schiffahrt) beschreibt die Abhängigkeit des Porenwasserdruckparamters b(t) von der Wasserdurchlässigkeit k [m/s] des Bodens für eine Absunkdauer t_A = 3.3 bis 5.0 sec (Absunkgeschwindigkeiten zwischen v_{ZA} > 12 cm/sec und v_{ZA} < 18 cm/sec). Das Beispiel 2 steht stellvertretend für eine wesentlich langsamer ablaufende Wasserspiegelsenkung, wie sie z. B. für den Tideverlauf mit einer Absunkdauer t_A = 6 Stunden (Absunkgeschwindigkeit von v_{ZA} = 0.018 m/sec) oder in ähnlicher Größe oft auch für ablaufende Hochwässer (Beispiel 3) angenommen werden kann.
Das Diagramm bezieht sich auf die nachfolgend genannten Berechnungskennwerte des Bodens wie Sättigungsgrad S = 85 - 95 [%], Steifemodul E_S = 5.000 - 50.000 [kN/m^2], Porenvolumen n = 45 [%] und eine mittlere Wassertiefe über der Gewässersohle von z = 2 [m WS].
Der für einzelne Absenkungszustände maßgebende Porenwasserdruckverlauf wird durch die Exponentialgleichung (1) bestimmt. Aus dem Diagramm in Abb. 7 ist in Abhängigkeit von der Dauer der Absunkzeit t_A [s] und der Wasserdurchlässigkeit k [m/s] des Untergrundes der zugehörige Porenwasserdruckparameter b(t) auf der Ordinate abzulesen. Durch Einsetzen dieses Parameters b(t) [1/m] in die Exponentialgleichung (1) ergibt sich die Größe des jeweils instationär wirkenden Porenwasserdrucks $\Delta u(z,t)$ [kN/m^2] zum Zeitpunkt t_A [s], unmittelbar nach Erreichen der Absunkhöhe dh = z_A [m], wobei für den Parameter a(t) vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend den Wert von a(t) = 1.0 gesetzt werden kann.

$$\Delta u(z,t) = \gamma_w \cdot dh_w \left(1 - a(t) \cdot e^{-b(t) \cdot z}\right)$$

Mit dem Einsetzen der kritischen Tiefe z = $d_{B\,krit}$ kann der zum ungünstigsten Zeitpunkt nach Erreichen der maximalen Wasserspiegelabsenkung wirkende Porenwasserüberdruck $\Delta u(z,t)$ ermittelt werden und in die Böschungsstandsicherheitsberechnung eingeführt werden.

Diese Verformungszustände vor dem Erreichen des eigentlichen Bruchs können ein anderes, nicht minder schädliches Fehlverhalten einer Böschungsbefestigung bewirken, das durch wiederholt auftretende Hebungs- und Setzungseffekte („Atmen des Bodens“) in der gefährdeten Bodenzone unterhalb des Deckwerks Kornumlagerungen auslösen kann. Es kann zu langsam fortschreitenden Deckwerksverformungen führen.

Abb. 8 Beispiel einer Deckwerksberechnung (FE-Methode) für ein Deckwerk mit Fußeinbindung

Die Abbildung 8 zeigt die Größe eines solchen gefährdeten Bodenbereiches unmittelbar nach dem äußeren Wasserspiegelabsunk, wodurch große hydraulische Gradienten im Boden unmittelbar unterhalb des Deckwerks initiiert werden, ohne daß der Bruchzustand schon erreicht wäre. Destabilisierungen dieser Art können den geforderten sicheren Filterprozess erheblich stören. Sie führen dann meist zu den nicht mehr akzeptierbar großen Verformungen der Böschungskonstruktion, die den Sicherheitszustand des Deckwerks auf Dauer durch kontinuierlich fortschreitende Deckwerksverformungen zerstören können. Der betrieblich geforderte Gebrauchszustand eines solchen Deckwerks wird hierdurch erheblich abgemindert.

4. Hochwasserbelastung an durchströmten Erdkörpern

Für Böschungen und Uferwände können Hochwasserstände und Luftdruckschwankungen Einfluß auf die Standsicherheit haben. Hochwasserdeiche sind nicht nur bei ansteigendem Hochwasser durch die sich einstellende Druchströmung dieser Deiche von der Wasser- zur Luftseite hingerichtet beansprucht.

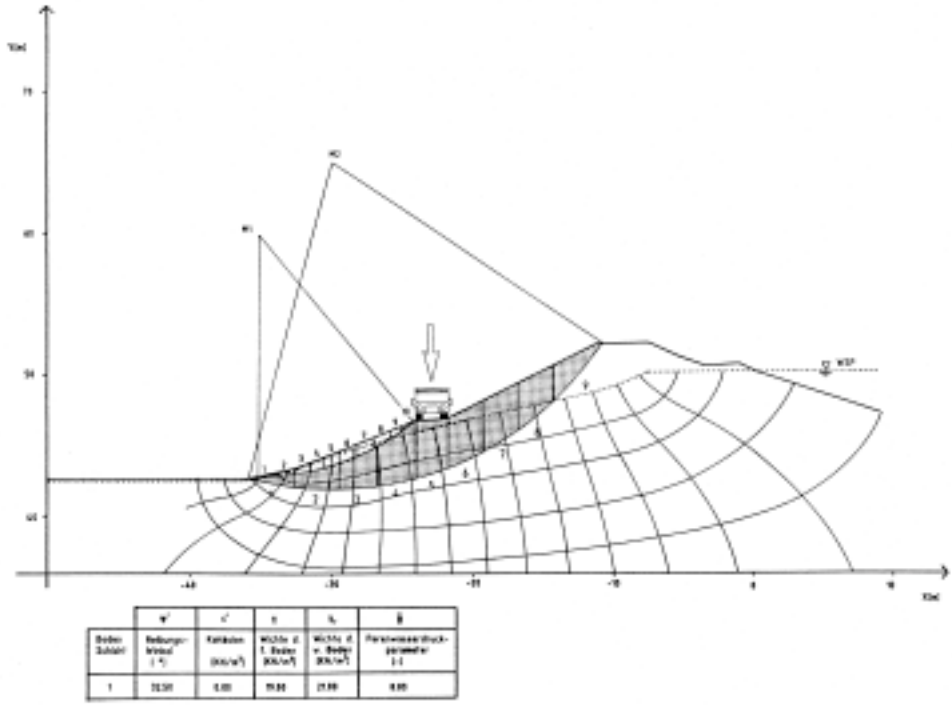


Abb. 9 Standsicherheitsberechnung der luftseitigen Dammböschung bei stationärer Durchströmung mit dem dazugehörigen Strom- und Potentialliniennetz

Abb. 10 Bild einer luftseitigen Böschungsrutschung während des Oder-Hochwassers 1997
(Bild entnommen aus der Zeitschrift „Der Spiegel“)

Rutschungen können ebenso leicht auftreten bei ablaufenden Hochwasserständen mit der Wirkung, daß durch die Aufsättigung der Dammkörper bei ablaufendem Hochwasser Rutschungen auf der Wasserseite eintreten können, die durch instationäre Porenwasserüberdrücke ausgelöst werden.

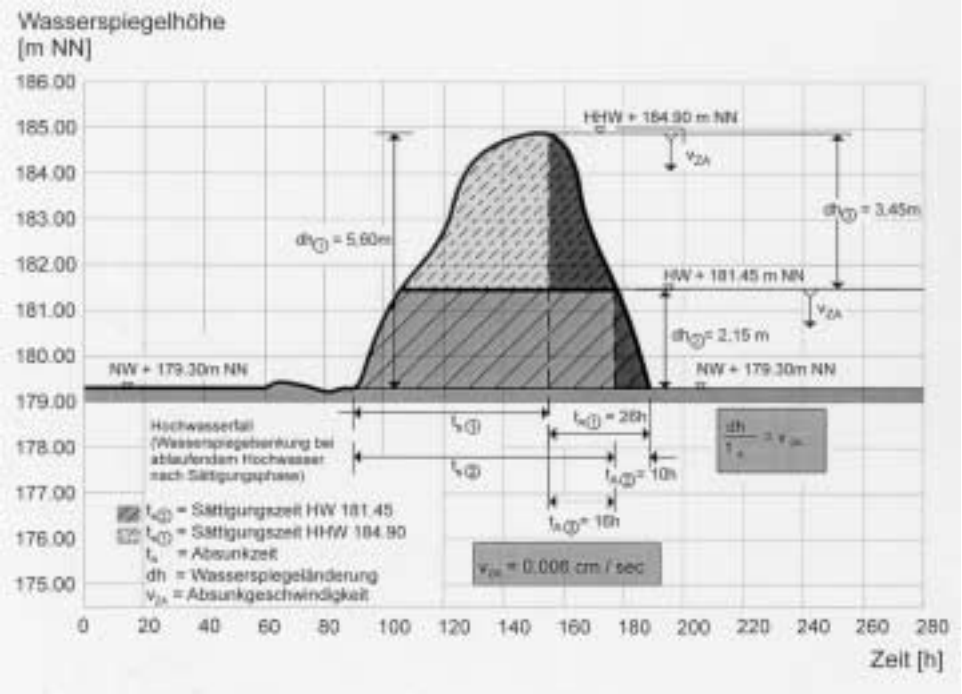


Abb. 11 Hochwasserganglinie (schematisiert).
Auf- und ablaufendes Hochwasser mit Sättigungs- und Absunkphase

Die Abbildung 11 zeigt einen schematischen Ablauf einer solchen Hochwasserwelle und die damit verbundenen Absunkgrößen dh [m] und Absunkgeschwindigkeiten v_{zA} [m/s] nach der Aufsättigungsphase, die nur von der Dauer der anhaltenden Hochwassersituation abhängig ist. Mit den maßgebenden Absunkzeiten t_A [s] und den vorherrschenden Wasserdurchlässigkeitswerten k [m/s] des Damm- und Untergrundmaterials läßt sich aus der Abbildung 7 der jeweilige Porenwasserdruckparameter b(t) bestimmen, der zusammen mit dem Wert a(t) = 1 den maßgeblichen Porenwasserüberdruck $\Delta u(z,t)$ [kN/m²] für den instationären Zustand beschreibt. Die Abbildung 12 zeigt ein Ergebnis einer solchen Berechnung für den Fall der ablaufenden Tide zwischen Tidehochwasser (THW) und Tideniedrigwasser (TLW).

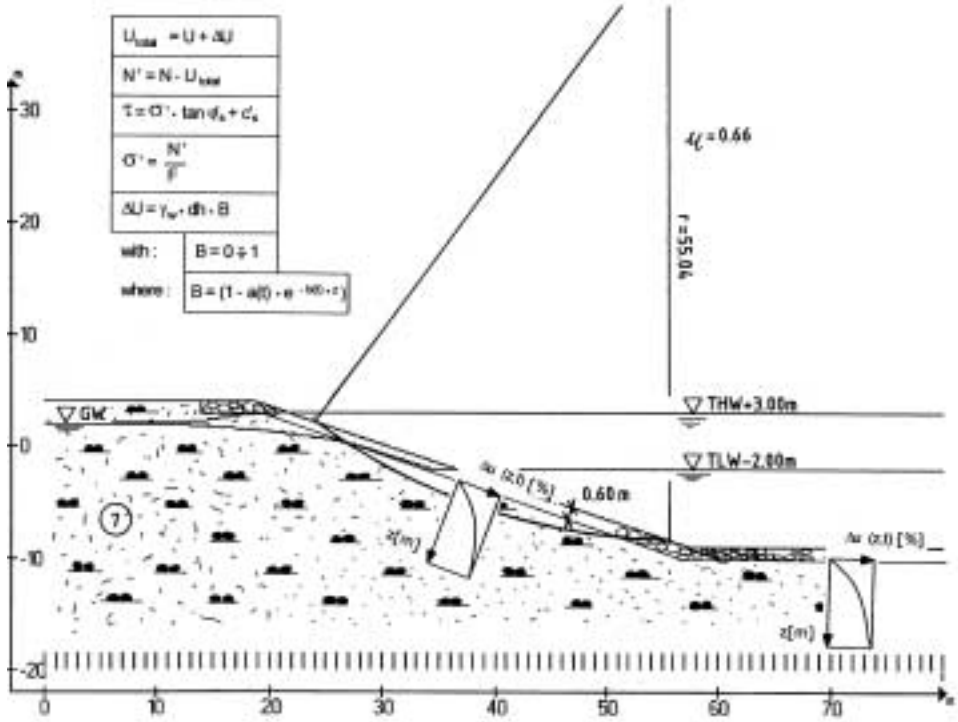


Abb. 12 Standsicherheitsberechnung bei ablaufendem Tide-Hochwasser.
Auf- und ablaufendes Hochwasser mit Sättigungs- und Absunkphase

5. Filterstabilität

In der Geotechnik werden Filter noch überwiegend nach geometrischen Kriterien bemessen, die in den zurückliegenden letzten achtzig Jahren von zahlreichen Forschern in aller Welt untersucht und für die praktische Anwendung aufbereitet wurden (2) (3) (4). In der Praxis werden Stufenfilter und Mischfilter unterschieden, die nach unterschiedlichen Abstandsverhältnissen bestimmter maßgebender Korndurchmesser zwischen dem zu schützenden Boden und dem ausgewählten Filtermaterial dimensioniert werden. Während bei den gleichkörnigen Stufenfiltern zwischen den jeweiligen Kornabstufungen der einzelnen Filterschichten diese geometrischen Abstandsverhältnisse der maßgebenden Korndurchmesser relativ sicher bestimmt werden können, treten bei der Bemessung von Mischkornfiltern immer noch große Unwegbarkeiten auf. Wie es der Name schon erkennen läßt, setzen sich die Mischkornfilter aus ungleichkörnigen Materialien zusammen, die unterschiedliche Kornfraktionen in unterschiedlichen Anteilen besitzen können. Besonders Kornmischungen mit relativ großen Ungleichförmigkeiten (C_U > 15) sind hinsichtlich ihrer Filterstabilität nur unzureichend sicher einzuschätzen. Die bei der Durchströmung ausgelösten Kornwanderungen innerhalb solcher Kornmischungen sind häufig nicht zu stoppen. Dies gilt insbesondere für Kornmischungen mit sogenannten Ausfallkörnungen. Solche Kornmischungen sind gekennzeichnet durch große Ungleichförmigkeit und das Fehlen einzelner Kornfraktionen. Sie sind in sich nicht filterstabil und werden deshalb als suffossionsgefährdet bezeichnet. Abhängig ist der jeweils ausgelöste Materialtransport innerhalb einer Kornstruktur von der Art und Größe der Strömung. Die in der geotechnischen Praxis allgemein angewendeten Filteregeln stützen sich hierbei jedoch ausschließlich auf stationäre und einseitig gerichtete Durchströmungen mit begrenzten hydraulischen Gradienten (i < 9). Aus der Vielzahl der von verschiedenen Forschern vorgelegten Ergebnisse solcher Filteruntersuchungen wurden unterschiedliche geometri-

sche Abstandsverhältnisse definiert, die die Anwendung in der Praxis zunächst sehr erschwert haben mußten. Besonders die für Mischkornfilter aufgestellten Anforderungen und Regeln dürften wohl lange Zeit für Verwirrung gesorgt haben. Unsere besondere Beachtung verdient deshalb das von Cistin und Ziems (5) aufgestellte Diagramm (Abb. 13), das diese Unklarheit in der Festlegung des jeweils zulässigen Abstandsverhältnisses weitestgehend beseitigt hat.

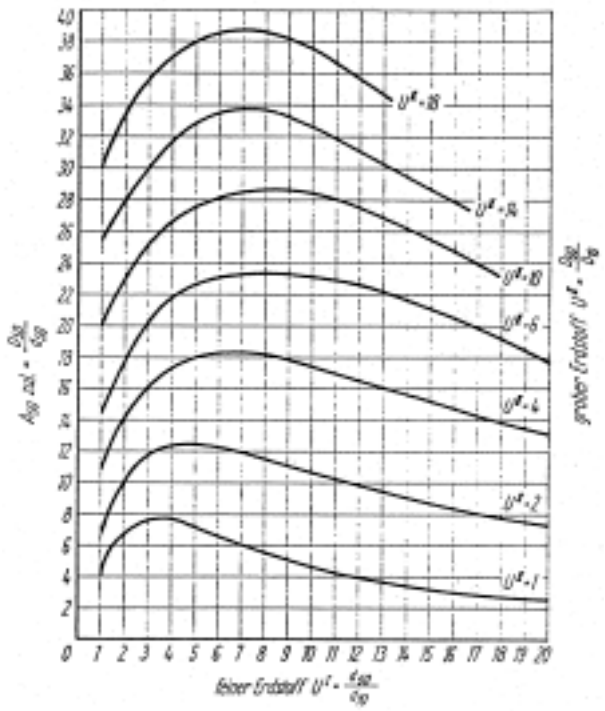


Abb. 13 Diagramm zur Abschätzung der Filterstabilität nach Cistin und Ziems

Das Diagramm erlaubt die Bestimmung des maßgeblichen Abstandsverhältnisses A_{50} für unterschiedliche Ungleichförmigkeitsgrade C_U sowohl bei der Auswahl der Filterkörnung als auch bei der jeweils vorliegenden Körnung des zu schützenden Bodens. Dem Diagramm liegt ein Sicherheitsbeiwert von $\eta = 1.5$ zu Grunde, der einen gewissen Teil der mit dieser Filterdimensionierung noch verbleibenden Unwegbarkeit in der Abschätzung der zu erzielenden Filtergüte abdecken soll. Das Diagramm gilt sinngemäß für stationäre Durchströmungen mit hydraulischen Gradienten $i < 9$ und erlaubt die Abschätzung zur Filterstabilität von nichtbindigen Kornmaterialien.
Bindige Erdstoffe besitzen häufig eine erhöhte Erosionsfestigkeit, die ihre Ursache in der Kohäsion dieser Materialien findet. Abschätzungen hierzu sind möglich nach Modellvorstellungen, wie sie z. B. von Davidenkoff, Rehfeld u.a. (6) (7) (8) (9) aufgestellt wurden. Einen allgemein gültigen Standard zur Abschätzung der Filterstabilität bindiger Böden, wie sie für nichtkohäsive, rollige Erdstoffe z. B. analog dem Diagramm von Cistin/Ziems angewendet werden, gibt es in der Ingenieurpraxis noch nicht.
Ähnliches gilt für beide Bodenarten (bindig oder nichtbindig) bei instationären Belastungen von Filtern, die insbesondere durch wechselnde Strömungsrichtungen und sich schnell ändernde hydraulische Gradienten gekennzeichnet sind. Besonders plötzlich einwirkende Druckänderungen und dynamische Belastungen sind zu nennen, die von den bisher bekannten Filterregeln noch nicht abgedeckt werden können.
Die Interaktion zwischen Boden und Filter wird weitestgehend bestimmt von den möglichen Partikelbewegungen im gefährdeten Boden, insbesondere unmittelbar unterhalb der Filterschicht, die maßgeblich von der Porenraumstruktur und der Porengröße abhängen. Akkumulationen eingewanderter Bodenpartikel innerhalb eines Filters können sowohl zu stabilen wie instabilen Filterprozessen führen. Mögliche sich einstellende Gleichgewichtszustände in einem solchen Filterprozess werden durch veränderliche Belastungszustände wiederholt gefährdet, die hauptsächlich durch vorübergehend wirkende hohe hydraulische Gradienten im Boden unmittelbar unterhalb der Filterschicht zu Störungen der Filtereigenschaften bis hin zum völligen Versagen des Filters führen können. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Änderung der effektiven Spannungen in einem verformbaren Porenmedium, das in Bezug zu setzen ist zur Variation des Flüssigkeitsdrucks in den Bodenporen und damit letztendlich

zu dem jeweils lokal wirkenden piezometrischen Druck. Die Kompressibilität des Porenmediums beeinflußt diese Bedingungen in erheblichem Umfang. Dem Wasser muß das ungehinderte Ausfließen aus dem sich verformenden Boden- und Filtermedium in der Weise erlaubt sein, daß die mit der Verformung einhergehende Verminderung des Porenvolumens in exakt gleicher Größe vonstatten gehen kann, wie es das aus der Filterebene ausgedrückte Volumen des austretenden Wassers beschreibt. Genau diese Filterprozesse sind es, die noch immer zu Mißeinschätzungen und Überforderungen der Filtrationseigenschaften von porigen Filterstoffen führen. Dieser Sachverhalt bezieht sich hauptsächlich auf instationäre Fließbedingungen, zyklische Belastungen und das mögliche Auftreten großer hydraulischer Wechselgradienten.
So wie auch Kornfilter unter solchen Belastungen häufig noch immer falsch eingeschätzt werden, kann die Anwendung der in jüngster Zeit immer mehr auf den Markt drängenden sogenannten geotextilen Filter zu noch erheblich schwierigeren Abschätzungen der zu fordernden sicheren Filtereigenschaften führen.

5.1 Faktoren, die die Filtereigenschaften beeinflussen

Beachtet man hauptsächlich den bodenmechanischen Aspekt einer Filterschicht, so hat diese in erster Linie als Schutzschicht gegen Bodenerosion zu agieren, die durch den wechselnden Wasserdurchfluß ausgelöst werden. Filter sollten den auftretenden Belastungen in akzeptabler Weise widerstehen können, bei fließendem Wasser sowohl senkrecht wie auch parallel zur Filterebene, ausgelöst durch stationäre wie auch veränderlich wirkende instationäre hydraulische Gradienten, sowohl in gegenläufigen Richtungen als auch in zyklischen Belastungszuständen, die häufig mit schnellen Belastungsänderungen und dynamischen Einflüssen verbunden sind (siehe Abb. 14 und 15).

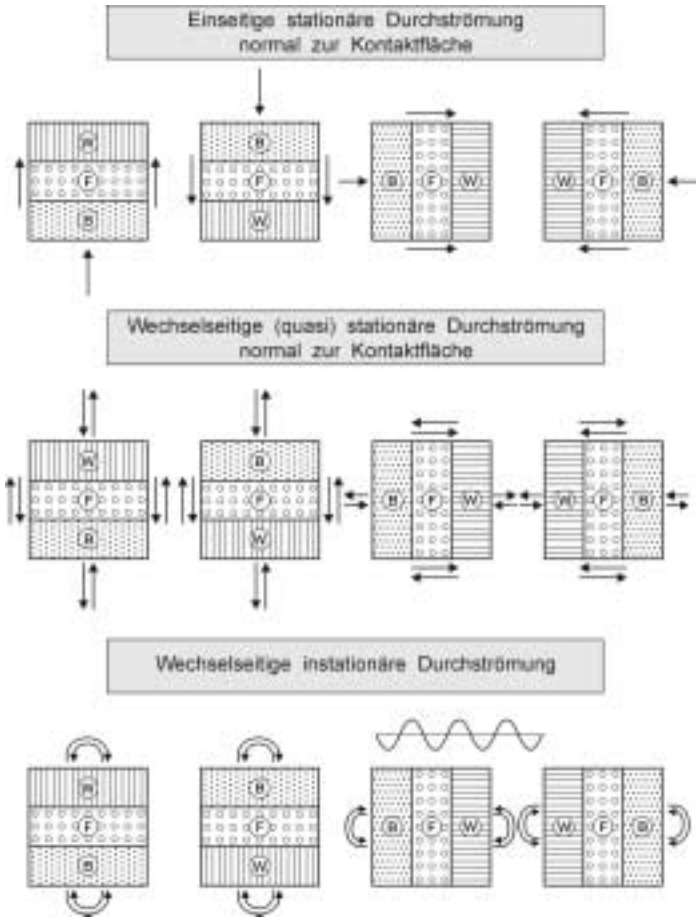


Abb. 14 Belastungsarten normal zur Kontaktfläche

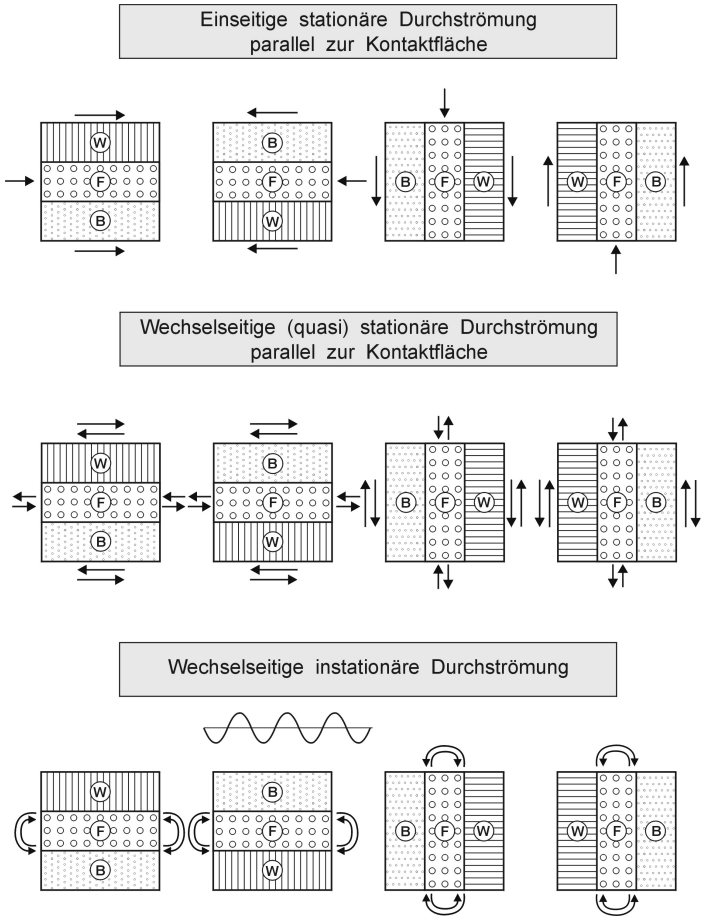


Abb. 15 Belastungsarten parallel zur Kontaktfläche

Oftmals ist die Lebenserwartung eines Bauwerks über einen geforderten Gebrauchszeitraum zu gewährleisten, so daß auch der erweiterte Schutz der jeweils gefährdeten Bodenbereiche auf diese Gebrauchsdauer sichergestellt werden muß.

Vier wesentliche Einflußfaktoren auf das Filterverhalten sollten erfüllt werden:

- die Fähigkeit zum Zurückhalten von Bodenpartikeln aus dem angrenzenden Boden unter den spezifizierten Belastungsanforderungen (Mechanischer Aspekt der Filterprozedur)
- die Fähigkeit als Drän zu fungieren gegen Sickerwasser und Wasserdruckänderungen (Hydraulischer Aspekt der Filterprozedur)
- die Fähigkeit zur flexiblen Reaktion gegen Untergrunddeformationen und damit die Fähigkeit des Filters, den auftretenden Verformungen schadlos folgen zu können.
- Die Fähigkeit zur ausreichend sicheren Reaktion gegen mögliche Einwirkungen von Scher- und Normalspannungen

Ohne auf noch weitere Belastungsanforderungen als die vier genannten wesentlichen Einflußgrößen einzugehen, haben die mechanischen Unterschiede zwischen dem traditionellen Kornfilter und dem neuerdings oft auch eingesetzten geotextilen Filter großen Einfluß auf das zu fordernde Verhalten des Filters unter den jeweils maßgebenden Belastungen.

5.2 Hydraulische Wechselbelastung

Währenddessen Kornfilter einer bestimmten Dicke mit meistens mehr als fünf Zentimeter bis hin zu ein, zwei oder mehreren Dezimetern durch Schütten unmittelbar am Einbauort in gleichmäßiger Dicke eingebracht werden, erfolgt die Verlegung des geotextilen Filters durch ebenmäßiges Ausbreiten oder Ausrollen auf dem Boden in relativ dünnen Schichten von 1 bis 10 mm, teilweise aber auch bis zu 20

mm Dicke. Abhängig von der im Filtermaterial vorhandenen Verbundwirkung kann ein geotextiler Filter Zugkräfte in Längs- und Querrichtung sowohl in geringer als auch starker Form mit ausgeprägt plastischen Dehnungen übertragen. Ein ungebundener Kornfilter kann derartige Zugkräfte nicht übertragen. Das Modellprinzip zum Transport von Bodenpartikeln durch die effektiven Öffnungsweiten maßgebender Porengänge basiert auf der Geschwindigkeit der durchströmenden Porenflüssigkeit und ist damit unmittelbar abhängig vom örtlich auftretenden hydraulischen Gradienten, sowohl unter stationären als auch veränderlichen, instationären hydraulischen Bedingungen. Die Menge eines das Boden-Filter-System durchlaufenden Wasservolumens wird kontrolliert durch das Kontinuitätsgesetz ($q = v \cdot F =$ const.). Wichtig ist hierbei, daß das Wasser den Filter möglichst ohne Behinderung passieren kann. Beim Auftreten von blockierenden oder sich gar zusetzenden Filtern kann es zu einem erheblichen Durchflußstau kommen, die dem wirkenden hydraulischen Gradient möglicherweise nicht mehr gewachsen sind. Häufig ergeben sich solche Schadenssituationen schon einfach dadurch, daß das zu fordernde Durchlässigkeitsverhältnisse zwischen dem zu schützenden Boden und dem angrenzenden Filtermaterial nicht eingehalten wurde. Ist dieses Durchlässigkeitsverhältnis andererseits zu groß, können ebenfalls schädliche Bodentransporte ausgelöst werden, die über längere Wirkungszeit ebenfalls zum nachhaltigen Verstopfen der Filterporen beitragen können. Speziell aus diesen Bedingungen des zu fordernden, sich nicht verstopfenden Dräns erwachsen die bekannten Schwierigkeiten einer erfolgreichen Filterdimensionierung. Geotextile Filter verhalten sich darüber hinaus völlig verschieden gegenüber den möglichen Reaktionen eines Kornfilters. Geotextile Filter können durch ihre Fähigkeit zur Übertragung von Zugkräften in Quer- und Längsrichtung Überdeckungen und Überspannungen von Bodenstrukturen mit relativ großen Hohlstellen und Überbrückungsweiten erzeugen, die wiederum Ausgangspunkt möglicher Partikelwanderungen und nachfolgender Verstopfungen sein können. Die nachfolgenden Abbildungen 16 und 17 zeigen das mechanisch mögliche Wirkungsprinzip eines Kornfilters und das eines geotextilen Filters. Durch hydraulische Wechselbelastung sind große Kornmobilitäten zu erwarten, die einen erhöhten Bodeneintrag in das Filtersystem zur Folge haben und damit maßgeblich zur Durchlässigkeitsverminderungen beitragen.

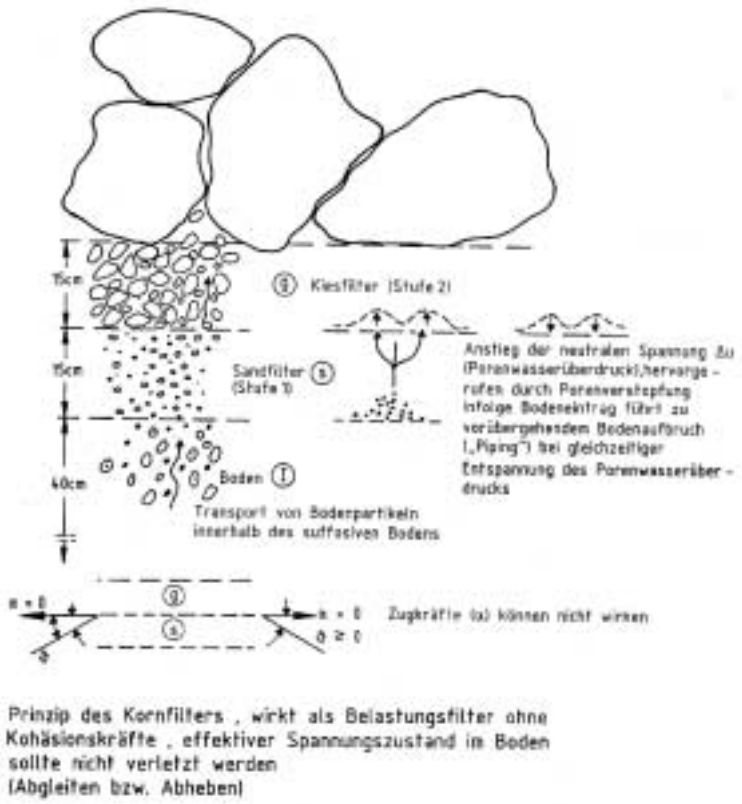


Abb. 16 Wirkungsprinzip eines Kornfilters unter hydraulischer Wechselbelastung

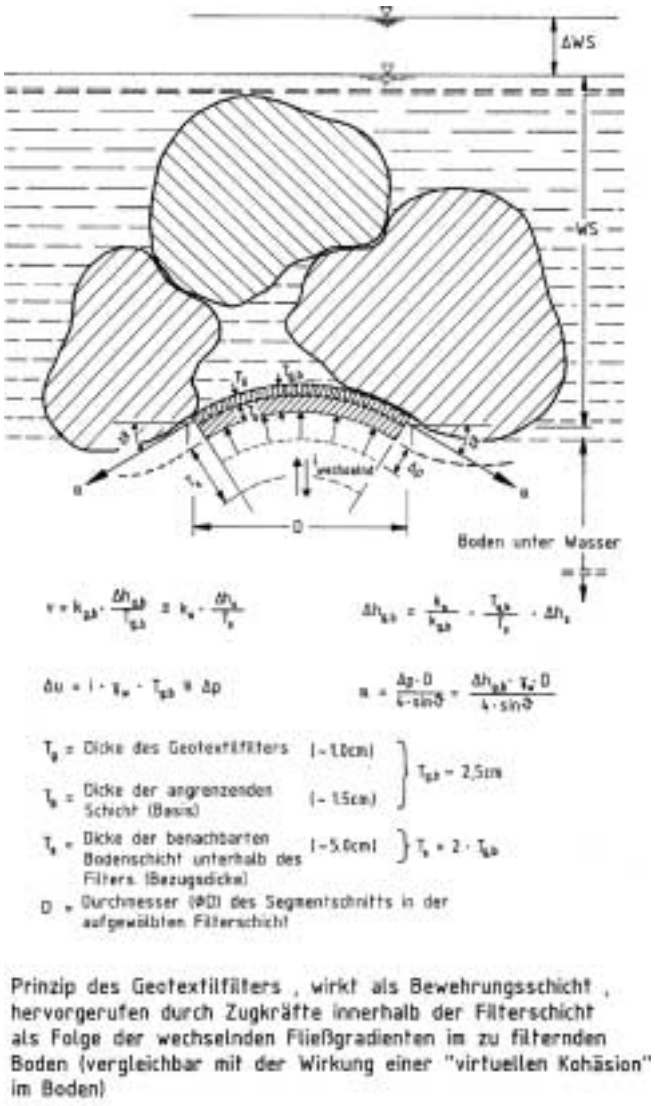


Abb. 17 Wirkungsprinzip eines geotextilen Filters unter hydraulischer Wechselbelastung

Wie aus der Abbildung 17 zu erkennen ist, kann beim geotextilen Filter durch die dauernde Wechselbelastung eine plastische Verlängung des Materials eintreten, die zu Aufwölbungen der flächig eingespannten Filterschicht führen kann, in deren frei werdendem Hohlraum unmittelbar unter der Filterschicht es zur konzentrierten Ansammlung von aus dem Boden heraus transportierten Feinteilen kommen kann, die den Filter nicht mehr passieren können. Solche Vorgänge können langfristig zur Blockade eines Filters führen und damit die geforderte Dränwirkung des Filters empfindlich stören. Diese Vorgänge sind gefürchtet, weil sie z. B. aus einem durchlässigen Deckwerk ein mehr oder weniger dichtes Deckwerk erzeugen können. Zusätzliche Gefährdungen der Standsicherheit durch den sich bei Wechselbelastung erhöht einstellenden Porenwasserüberdruck wären dann zu befürchten. In einem ungebundenen Kornfilter sind solche Blockaden aus mechanischen Gründen nicht möglich. Bauen sich vorübergehende Überdrücke im Kornfilter oder unmittelbar unterhalb des Kornfilters auf, so können sie durch örtliches Aufbrechen (vorübergehendes „Piping“) zu sofortiger und nachhaltiger Druckentlastung beitragen. So betrachtet, können sogar ungenügend auf den Boden abgestimmte Kornfilter eine noch hinreichende Schutzwirkungen gegen Ausspülung und Erosion des Untergrundes bewerkstelligen, wohingegen der sich möglicherweise dicht setzende geotextile Filter auf Grund der Fähigkeit zur Aufnahme von Zugspannungen die gesamte Böschungsbefestigung sogar langfristig in seiner Standsicherheit gefährden kann.
Die Frage nach dem richtig dimensionierten Filter muß sich deshalb beantworten lassen mit der sich möglicherweise einstellenden Langzeitwirkung, die auch nach längerer Gebrauchszeit eine noch aus-

reichend hohe Wasserdurchlässigkeit gewährleisten muß. Filtersysteme, die durch schnelle Wasserwechselbelastungen gefährdet sind, sollten daher grundsätzlich mehr als offene Filter dimensioniert werden, die sich dann in ihrer Langzeitwirkung positiv auf die Erhaltung der Böschungs- und Sohlstabilität auswirken. Zur sicheren Beurteilung solcher Filtersysteme liegen bis zum heutigen Tag noch keine allgemeingültigen Bemessungsregeln vor. In besonderen Versuchseinrichtungen können diese Belastungen jedoch wirksam simuliert werden (10). Die Abbildung 18 beschreibt das Prinzip eines solchen Filtertests, bei dem wechselnde hydraulische Belastungen auf das zu untersuchende Filtersystem aufgebracht werden. Durch parallel laufende Durchlässigkeitsprüfungen kann das Filtersystem neben der mechanischen Filterprüfung darüber hinaus auch eine sich im Laufe der Wasserwechselbelastung einstellende Veränderung der hydraulischen Stabilität überprüft werden.

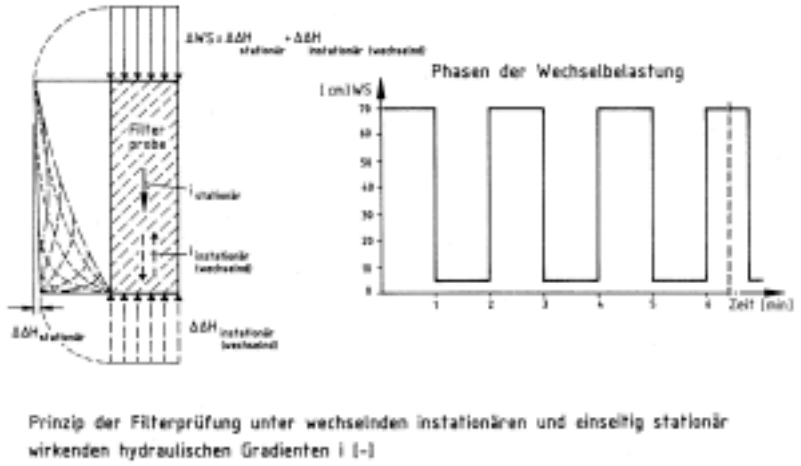


Abb. 18 Filtertest zur Untersuchung instationärer Gradienten unter hydraulischer Wechselbelastung

Um mit derartigen Filterprüfungen langfristig auch zu allgemeingültigen Bemessungsregeln zu gelangen, sind solche Versuche möglichst unter hohem Umgebungsdruck in speziellen Druckzellen durchzuführen, um den Einfluß der im natürlichen Porenwasser eingeschlossenen Luft und die dadurch ausgelösten instationär wirkenden Druckgradientenverteilungen in der Filterprobe auszuschalten. Damit wird es möglich, Kriterien zur geometrischen und hydraulischen Stabilität von instationär belasteten Filtern nach reproduzierbaren Versuchsergebnissen zu testen, die langfristig zu einer allgemein anwendbaren Beurteilung von Filtern in unterschiedlichen Anwendungsbereichen sowohl nach geometrischen und als auch hydraulischen Kriterien führen wird.

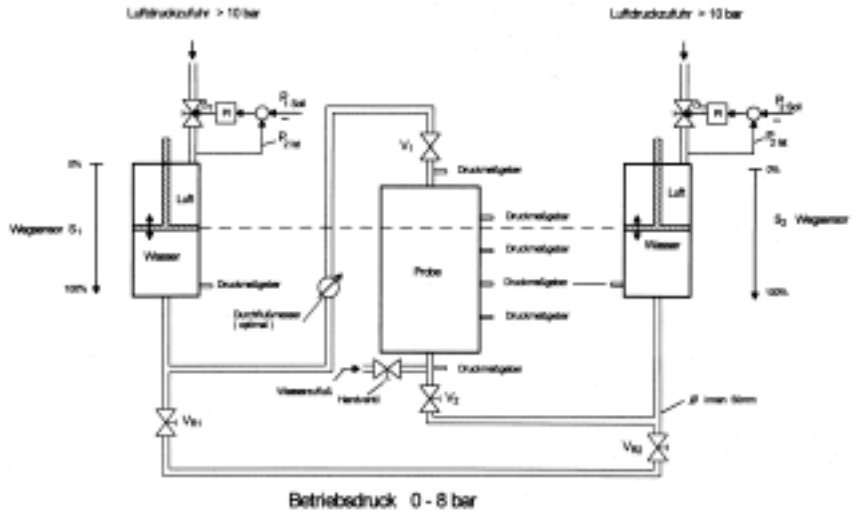


Abb. 19 Filterprüfeinrichtung zur Untersuchung instationärer Gradienten unter hydraulischer Wechselbelastung

Ein Beispiel einer solchen Versuchsanlage zur Filterprüfung im Zwei- und Dreiphasensystem (Bodenpartikel, Gasblasen und Porenwasser) zeigt die Abbildung 19. In der Bundesanstalt für Wasserbau wurde eine solche Versuchseinrichtung bereits gebaut und entsprechende Versuchstests sind konzipiert.

5.3 Filtereinfluß auf die Deckwerkserosion durch Wellenangriff

Die Stabilität von Deckwerken unter Wellenangriff, insbesondere die von Deckwerken in Form loser Steinschüttungen, variiert in großem Maße mit der Art der unterlagernden Filterschichten. Modellversuche an losen Steinschüttungen wurden in den zurückliegenden Jahren in der BAW mit verschiedenen Filterschichtsystemen durchgeführt (11). Die Ergebnisse dieser Versuche haben eine deutliche Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsverhalten der verschiedenen Filterschichtkonstruktionen gezeigt. Die in den Modellversuchen im Maßstab 1:1 (siehe Abb. 20) mit verschiedenen Schüttsteindicken und unterschiedlichen Schüttsteingrößen ermittelten Schadensgrade konnten verglichen werden mit dem von HUDSON aufgestellten Schadenskriterium. Darüber hinaus wurden die experimentell gewonnenen Ergebnisse mit der Methode der finiten Differenzen rechnerisch nachgebildet (12).
Die mit Hilfe des Programmcodes „STEENZET/1“ durchgeführten numerischen Simulationen haben gezeigt, daß die Deckwerksstabilität gegen Wellenangriff durch kurzzeitig entstehenden Wasserüberdruck direkt in der Filterschicht unterhalb der Steinschüttung erheblich reduziert werden kann, wenn kombinierte Filterschichten aus Geotextil- und Kornfilterlagen in einer ganz bestimmten Form zur Ausführung gelangen. Wird der geotextile Filter zwischen der Kornfilterlage und der Steinschüttung eingebaut, kann es frühzeitig zu Beschädigungen der losen Steinschüttung kommen. Zusätzlich durchgeführte kombinierte, großmaßstäbliche Wasserdurchlässigkeitsversuche mit fallender Druckhöhe (Maßstab 1:1) haben es ermöglicht, die Ursachen der Deckwerksschäden infolge Wellenangriff auch experimentell zu begründen. Die Wasserdurchlässigkeiten solcher kombinierter Deckschichtsysteme weichen markant von den im Labor üblichen kleinmaßstäblichen Indextests ab. Die Wasserdurchlässigkeit war bei diesen speziell durchgeführten Versuchen durchweg kleiner gegenüber den an den einzelnen Filterproben im Labor ermittelten Werten.

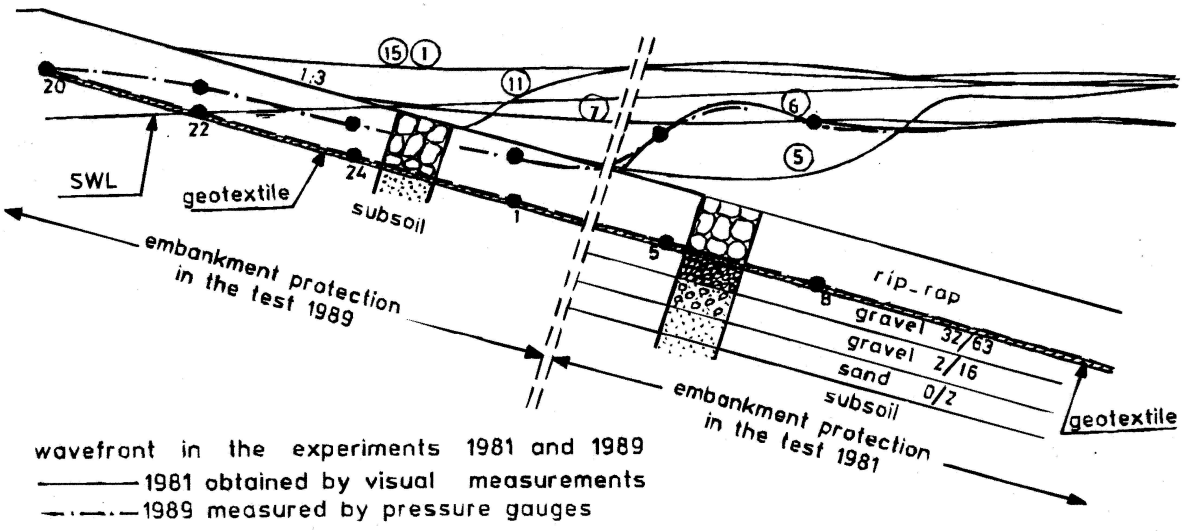
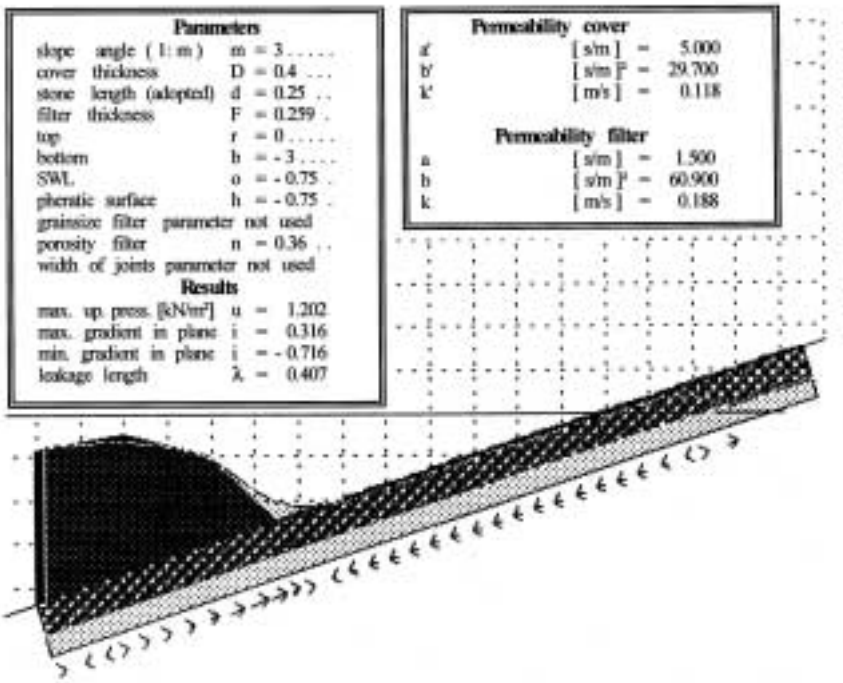


Abb. 20 Testquerschnitt des untersuchten Deckwerks unter Wellenangriff (Wellenversuchsgrube der BAW)

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen den Testquerschnitt im experimentellen Versuch und die mit dem Steenzet-Code erhaltenen Berechnungsergebnisse nach der Methode der finiten Differenzen. Im oberen Teil der Abbildung 21 ist der kurzzeitig im Filter wirkende Wasserdruck unterhalb der Deckschicht dargestellt, wie er in der numerischen Simulation mit den aus dem Labor vorliegenden Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten jeder einzelnen Filterlage berechnet wurde. Der auftretende Wasserdruck war mit den errechneten Werten als nicht besonders gefährlich für den Erosionsangriff aus Wellen einzustufen. Hiernach hätten die Erosionsschäden durch Verlagerung von Schüttsteinen aus der losen Schütt-

steindeckschicht, wie sie in den Wellenangriffsversuchen ermittelten wurden, nicht in dieser Größe auftreten dürfen.



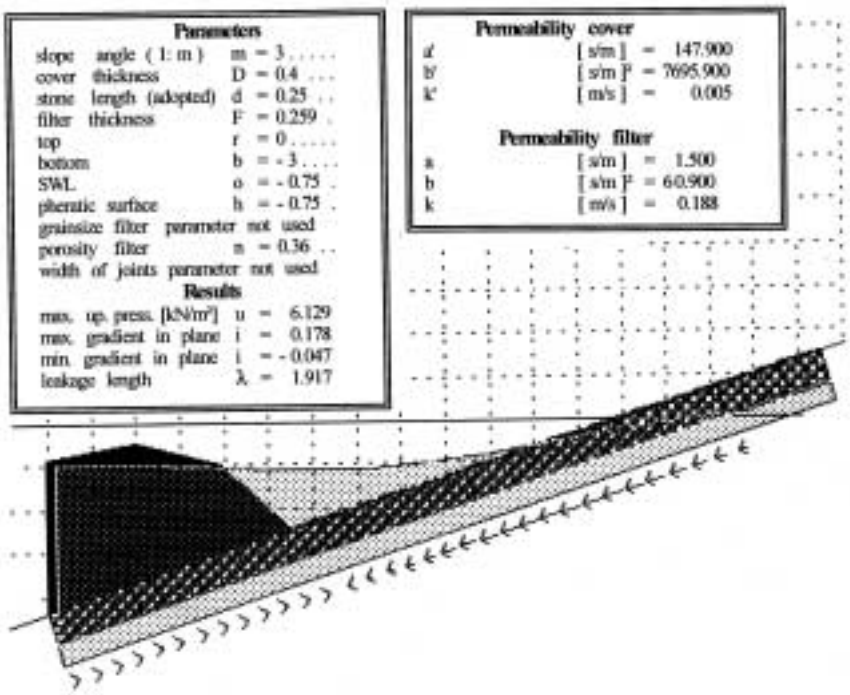


Abb. 21 Ergebnisse der numerischen Simulation mit dem Programm STEENZET/1

Mit dem tatsächlich vorhandenen Wasserdurchlässigkeitswert des gesamten Deckschichtsystems, wie er aus den speziell im Maßstab 1:1 durchgeführten Systemprüfungen in den Wasserdurchlässigkeitsversuchen experimentell gemessen wurde, ergaben sich in der numerischen Simulation wesentlich höhere Wasserdrücke in der Filterschicht, wie es der untere Teil der Abbildung 21 deutlich zeigt.

Mit diesen Rechenergebnissen konnte nachgewiesen werden, warum der Schadensgrad im Experiment unerwartet hoch ausgefallen war. Das Ergebnis dieser Untersuchungen lehrt, daß es oft sinnvoll ist, nicht nur die üblichen im Labor angesetzten Indextests durchzuführen, sondern bei dynamisch wirkenden Lastangriffen, wie sie z. B bei auflaufenden und brechenden Wellen zu erwarten sind, auch Systemprüfungen im Maßstab 1:1 in den Untersuchungsaufwand einzubeziehen..

6. Hydrodynamische Bodendeformation

Einschnitts- und Auftragsbauwerke im Wasserstraßennetz der WSV enthalten eine Vielzahl hydrodynamisch belasteter Grenzschichten, die in ihrem Stabilitätsverhalten oft Ausgangspunkt von schädlichen Bodenumlagerungen und Verformungen sind, die in der Folge hydrodynamischer Prozesse häufig durch Partikelwanderungen ausgelöst werden.
Aus Untersuchungen der BAW an Boden-Wasser-Grenzflächen, die in einem speziellen Drucktank (siehe Abb. 22) durchgeführt wurden, liegen zahlreiche Bildsequenzen als mikroskopisch kleine Bildausschnitte der Größe 6 x 6 [mm] vor, die mit Endoskopen erfasst wurden.

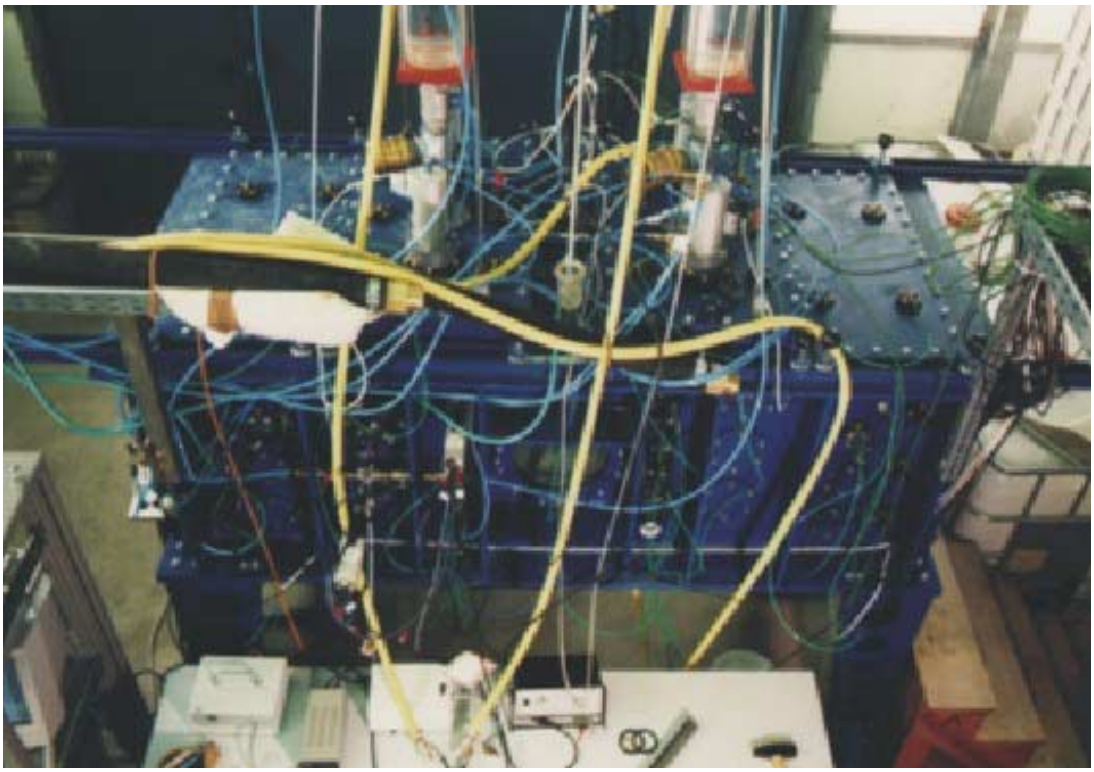


Abb. 22 Druckversuchstank zur Untersuchung von Wasser-Boden-Grenzflächen unter hydraulischer Wechselbelastung bis zu einem Umgebungsdruck von 20 m WS zur Beobachtung von instationären Fließbewegungen des Porenwassers im Dreiphasensystem (Bodenpartikel, Wasser, Luft)

Der durch schnelle Wasserdruckänderungen ausgelöste Bewegungsbeginn an den Grenzflächen kann damit dokumentiert werden. Auftretende örtliche Verformungsgrößen und Porenwasserströmungen werden hierdurch visuell und betragsmäßig nachgewiesen. In Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen der angrenzenden Porensysteme und der einwirkenden Wasserdruckänderungen sind die Materialverlagerungen und Bodeninstabilitäten mit hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung sowohl qualitativ als auch quantitativ nachzuweisen. Ausgelöst werden diese Bewegungen durch die im Porenwasser eingeschlossenen Luftblasen, die je nach Druckänderungsgeschwindigkeit und Druckänderungsgröße unterschiedliche Bewegungshäufigkeiten im Bodenkörper verursachen (siehe Abb. 23). Hierbei spielt der Umgebungsdruck zu Beginn der Absenkung, die Größe der vertikalen Bodenauflast und die Druckänderungsgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle für das Verhalten des Bodens an der wasserbelasteten Grenzfläche. Diese Einflussgrößen haben direkte Auswirkungen auf die Intensität, mit der die Bodeninstabilitäten ausgelöst werden.

Unmittelbar unterhalb der zu beurteilenden Grenzschicht zwischen Sand und Kies können Bildsequenzen ausgewertet werden, die mögliche Verformungen und Strukturveränderungen im porigen Untergrund beschreiben.

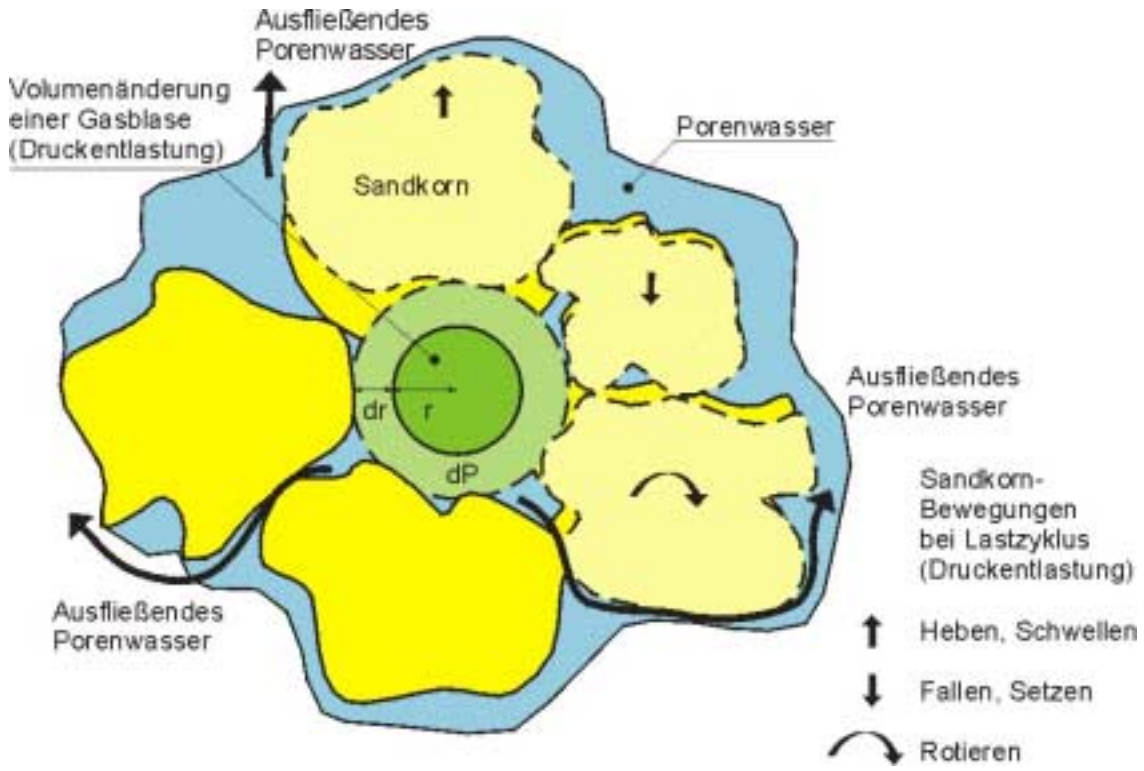


Abb. 23 Modellvorstellung mit Änderung der Luftblasengrößen bei Wasserdruckänderung und ausgelöste Kornwanderung durch instationäre örtliche Fließbewegungen des Porenwassers – Schwellen und Senken des Bodenkörpers

Mit einer Datentaktrate zwischen 25 und 50 Hertz wurden die Bildsignale und die Druckmessungen simultan aufgezeichnet und in verschiedenen Zwischenschritten auf einem Speichermedium für die weitere Auswertung gesichert. Ausgehend von einer Ausgangswasserdruckhöhe (Umgebungsdruck) von etwa 4,2 [m WS] bis hinunter auf eine mittlere Wasserdruckhöhe von etwa 2,3 [m WS] wurden Wasserdruckentlastungen zwischen 0,65 und 1,75 [m WS] simuliert, wobei unterschiedlich große Auflasten (Deckschichtgewichte) angewendet wurden. Ziel solcher Untersuchungen war es, die Porenwasserdrücke aus unterschiedlichen Bodentiefen zusammen mit den Videobilddaten der beobachteten Bodensegmente aufzuzeichnen. Die hierbei festzustellenden Bodenbewegungen und Veränderungen der Bodenstruktur wurden anschließend ausgewertet. Die während dieser Druckentlastungsphasen wirkenden instationären Porenwasserdruckgradienten wurden mit den gemessenen örtlichen Bodenbewegungen verglichen.
Die Abbildung 24 zeigt einen Bildausschnitt einer Boden-Filter-Grenzfläche während einer Druckentlastung zusammen mit dem gemessenen Geschwindigkeitsfeld während der Druckentlastungsphase, das mittels einer speziell entwickelten digitalen Bildverarbeitungstechnik aus dem Original des erfaßten Videobildes am beobachteten Bodensegment ausgewertet wurde (13).
Die durchgeführten Versuche beziehen sich auf die typische Situation an einer Binnenwasserstraße mit einer Wassertiefe von etwa 4 [m WS].
Aus der beobachteten Bildfolge sind langsam ablaufende Hebungen und Setzungen während des gesamten Lastzyklus mit auffälligen Bodenstrukturänderungen festzustellen. Diese sind insbesondere dort zu erkennen, wo durch die im Porenwasser des Bodens eingebetteten Luftblasen Volumenänderungen eintraten, die zu örtlichen Bewegungen innerhalb des Bodensegments geführt haben. Auch relativ hohe Auflasten haben teilweise örtliche Strukturänderungen im Boden nicht verhindern können. Bei entsprechenden Belastungsgrößen können sich auch ganze Bodenbereiche verflüssigen, was zu erheblichen Schäden an den Deckwerken führen kann.

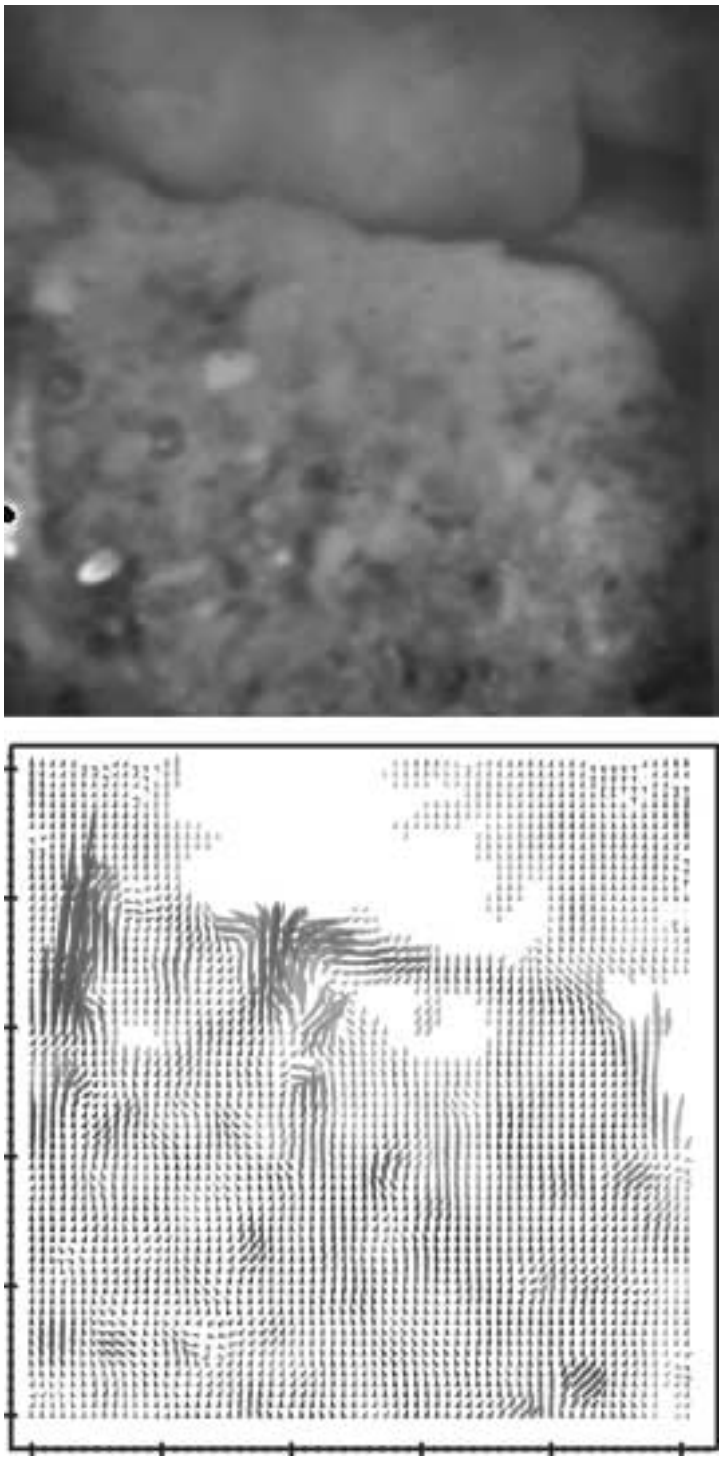


Abb. 24 Beispiel einer Bildauswertung zur Untersuchung von hydrodynamischen Bodendeformationen im Druckversuchstank unter hydraulischer Druckwechselbelastung

In dem Bildausschnitt von der Größe 6 x 6 [mm] sind die auftretenden Korn-Durchmischungen in horizontaler und vertikaler Richtung erkennbar. Durch speziell entwickelte Bildauswertealgorithmen sind diese Bewegungen in Vektordarstellung nach Größe und Richtung aufgetragen (vergl. Abb. 24, Bild unten). Diese Auswertungen enthalten darüber hinaus eine Wertung hinsichtlich der tatsächlich wirkenden Auftretenswahrscheinlichkeit. Die Rasterpunkte des Vektorfeldes in weißer Darstellung deuten auf Ruhezonen, die schwarzen Bildpunkte auf tatsächlich stattgefundene Bewegungen hin. Die Größe und Richtung der Vektorpfeile verdeutlichen das Bewegungsfeld an den einzelnen Punkten während

bestimmter Zeitausschnitte. Rotations- und Translationsbewegungen von Bodenveränderungen und Wasserströmungen wurden mit zeitlicher und örtlicher Zuordnung detektiert.
Im Ergebnis dieser Untersuchungen zum interaktiven Verhalten von Boden und Wasser wurde es möglich, die Beschreibung von Schadensursachen und ihre ingenieurmäßige Auswertung zu dokumentieren. Die Interaktion zwischen Filter und Boden ist besonders an wasserbelasteten Böschungen und Sohlen von maßgeblicher Bedeutung. Aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse aus speziell durchgeführten Druckwechselbelastungen mit theoretischen Ansätzen und numerischen Berechnungen zur auftretenden Druckdämpfung im Boden und Filter kann auf die Stabilität von Sohl- und Uferschutzeinrichtungen geschlossen werden. Entstehende Porenraumverstopfungen oder auch Aufweitungen von wasserdruckbelasteten Porensystemen können in Beziehung gesetzt werden zu den sich einstellenden Strukturveränderungen im Boden und insbesondere an den Grenzschichten, die sich aus den hydraulischen Wechselbelastungen ergeben.
Mögliche Strukturänderungen durch Kornwanderungen wurden hierbei in zeitlich abgestuften Bildfolgen visuell dargestellt. Aus der nachfolgenden Abbildung 25 ist das Ergebnis eines solchen Versuches mit eingefärbten Sandkörnungen zur Visualisierung von Fluidisierungsvorgängen zu ersehen.

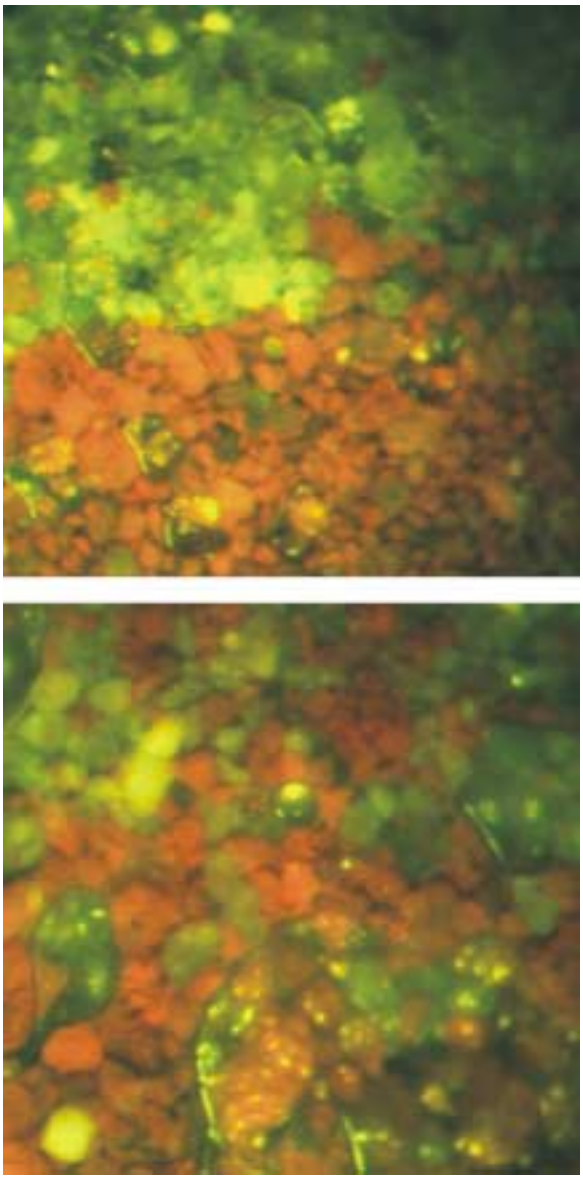


Abb. 25 Durchmischung von grün (hell dargestellt) und rot (dunkel dargestellt) eingefärbten horizontalen Sandlagen als Folge der Wasserdruckwechselbelastung in der Größe zwischen 0,6 und 1,8 [m WS]. Das obere Bild zeigt den Anfangszustand, das untere Bild den völlig durchmischten Endzustand nach insgesamt 70 Lastwechseln.

Die Bildfolgen beschreiben den Vorgang der völligen Durchmischung von beiden Sandlagen während der Druckwechselbelastung. Strukturänderungen dieser Art sind immer dann zu erwarten, wenn hohe hydraulische Druckgradienten als Folge großer Wasserspiegeländerungen an druckwechselbelasteten Grenzschichten einwirken. Die Abbildung 25 zeigt das Ergebnis einer solchen hydraulischen Beanspruchung. Die obere Sandlage war grün eingefärbt und ist hier zur besseren Unterscheidung zur unten liegenden rot eingefärbten Sandlage in Kontrast zwischen hell und dunkel dargestellt. Schon nach etwa 35 Wasserdruckwechseln war die völlige Durchmischung eingetreten. Der gesamte Bodenbereich war zeitweise fluidisiert, weil die fehlende Auflast ein Verwirbeln der vorgegebenen Sandstruktur zuließ. Im Zusammenhang mit den die Boden-Bewegungen auslösenden Volumenänderungen der im Porenwasser enthaltenen Gasblasen konnte die Zuordnung der gemessenen Bewegungsgrößen und Geschwindigkeiten mit der Modellvorstellung nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte nachgewiesen werden. Wie schon in vorangegangenen Untersuchungen gezeigt werden konnte, wurden durch schnelle Druckwechsel Volumenänderungen der im Porenwasser eingeschlossenen Luftblasen ausgelöst, deren Änderungsgeschwindigkeiten berechnet und mit den gemessenen Verformungsgeschwindigkeiten im belasteten Bodensegment verglichen wurden. Hierbei konnte nachgewiesen werden, daß die auftretenden kleineren Boden-Verformungen, die noch im elastischen Bereich eingeordnet werden können, sich mit den aus der Modellvorstellung einer sich ändernden Luftblasengröße nicht nur in ihrer auftretenden Größe, sondern auch in ihrem zeitlichen Verlauf unmittelbar verglichen werden können. Erst im Zustand einer sich verändernden Kornstruktur nach völliger Durchmischung im sogenannten fluidisierten Zustand kann diese Modellvorstellung die gemessenen Verformungen nicht mehr in Ihrer Größe und in ihrem zeitlichen Verlauf beschreiben. Die auftretenden Verformungen sind dann wesentlich größer.
Ein Vergleich dieser Modellvorstellung für die beiden Situationen ist in der Abbildung 26 dargestellt. Im sich elastisch verhaltenden Bodenverformungszustand gilt diese Modellvorstellung, der Boden verhält sich noch stabil. Im völligen Durchmischungszustand überwiegen die plastischen Verformungen mit deutlich einhergehender Strukturänderung des druckwechselbelasteten Bodens.

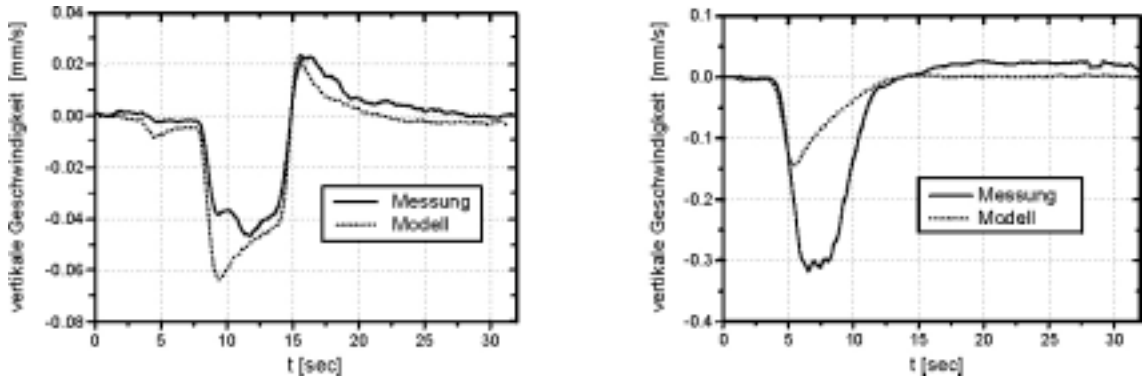


Abb. 26 Gemessene und entsprechend der Modellvorstellung berechnete vertikale Änderungsgeschwindigkeiten des Bodensegments, a) stabile Situation, b) instabile Situation

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Phänomen der Porenwasserdruckdämpfung im Boden unter Wasser hat seine Ursache im Gehalt von fein im Porenwasser verteilten Luftblasen. Die unter Druckänderung sich einstellenden Volumenänderungen dieser Luftblasen lösen örtlich instationären Porenwasserfluß aus, der bei geringer Wasserdurchlässigkeit des Porenmediums und hoher Steifigkeit zu erheblichen Verzögerungen der Porenwasserdruckanpassung an die äußeren Lastbedingungen führt. Dieser Effekt hat im gesamten Bereich der bodenmechanischen Berechnungsverfahren eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung. Die hierbei ausgelösten Verformungen im unter Wasser liegenden Boden sind bei der Interaktion zwischen Wasser und Boden zu beachten. Deckwerke an Wasserstraßen, Deiche für den Hochwasserschutz im Binnen- und Küstenbereich, Schleusen und andere von wechselnden Wasserstandsänderungen belastete Bauwerke unterliegen diesen Belastungen in besonderer Weise. Das von der Bundesanstalt für Wasserbau aufgestellte Merkblatt Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB) trägt diesem Umstand Rechnung (14).
Eindeutige, allgemeingültige Regeln zur Filterbemessung an hydraulisch instationär belasteten Grenzflächen liegen bis zum heutigen Tage noch nicht vor. Die für stationäre Durchströmung aufgestellten

geotechnischen Filterregeln können für diese Belastungen nur mit großen Einschränkungen benutzt werden. In vielen Fällen sind sie überhaupt nicht anwendbar, weil die sich örtlich und zeitlich stark ändernden hydraulischen Gradienten bei diesen instationären Belastungen teilweise Größenordnungen annehmen können, die die für stationäre Belastungen gültigen Grenzgradienten weit überschreiten.
An überströmten Wasser-Boden-Grenzflächen ist der Beginn von Erosion ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Sohlstabilität von Fließgewässern und Wasserstraßen. Mit den zur Zeit allgemein angewendeten Bemessungskriterien nach Shields (15) sind die kompliziert ablaufenden Erosions- und Sedimentationsprozesse bisher nur unzureichend zu beschreiben. Auf der Grundlage neuer Forschungsergebnisse aus den Bereichen der Geotechnik (16) (17) und des Wasserbaus (18) (19) (20) (21) soll versucht werden, an Hand von Druckmess- und digitalen Bildauswertetechniken aussagekräftigere Verformungs- und Transportvorgänge an überströmten Sedimentschichten zu erfassen und mit den bisher vorhandenen Kriterien zu vergleichen. Ziel wird es sein, das kompliziert ablaufende Druckwechselfeld und die damit einhergehenden Strömungsgrößen in unmittelbarer Nähe der Wasser-Boden-Grenzfläche und in ihrer Wirkung in das Porensystem einer Kiesüberdeckung oberhalb der zu schützenden Sandschicht hinein zu erkunden. Am Ende solcher Untersuchungen steht die Aufgabe zur Simulation solcher Prozesse mit dem Ziel der Bemessung von Sohlstabilität unter hydraulisch definierbaren Strömungsbelastungen.

8. Literatur

(1) BIOT, M. A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation.- In: J. Appl. Phys., 12, p.155 -164
(2) ZWECK, J. & DAVIDENKOFF, R. (1956): Über die Zusammensetzung von Filtern.- In: Mitteilungsblatt der BAW, Karlsruhe, Nr. 12, p. 15 - 28, ISSN 0572-5801
(3) BUSCH, K. & LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik, Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, 2.Auflage
(4) SCHULER, U. & BRAUNS, J. (1993): Behaviour of coarse and well-graded filters.- In: BRAUNS, J. ET AL. (eds.): Proc. of the 1st Int. Conf. "GEO-FILTERS", Karlsruhe, 1992: Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Rotterdam, Balkema, p. 3 – 17, ISBN 9054103426
(5) CISTIN, J. & ZIEMS, J. (1967): Entwurfsdiagramm für Kontakterosion (nach Versuchen von Cistin, im Bereich $U^I \leq 4$ nach Versuchen von Ziems korrigiert).- In: STRIEGLER, W., WERNER, D. (1969) Dammbau in Theorie und Praxis, Springer-Verlag, Wien, New York, p. 225
(6) DAVIDENKOFF, R. (1976): Anwendung von Filtern im Wasserbau, Berlin, Ernst & Sohn
(7) REHFELD, E. (1967): Die Erosionsbeständigkeit bindiger Lockergesteine.- In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Dresden, Nr. 5/67, p. 1431 - 1437
(8) MÜLLNER, B. W. (1993): Erosion resistance of widely graded cohesive soils.- In: BRAUNS, J. ET AL. (eds.): Proc. of the 1st Int. Conf. "GEO-FILTERS", Karlsruhe, 1992: Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Rotterdam, Balkema, p. 241 - 247, ISBN 9054103426
(9) JUNG, D. (2000): Zur Gefahr der Kontakterosion bei geschichtetem Boden unter Wechsellasten.- In: Geotechnik 23, Nr. 4, Essen, Verlag Glückauf GmbH, p. 248 - 256
(10) KÖHLER, H.-J. (1993): The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process.- In: BRAUNS, J. ET AL. (eds.): Proc. of the 1st Int. Conf. "GEO-FILTERS", Karlsruhe, 1992: Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Rotterdam, Balkema, p. 225 - 240, ISBN 9054103426
(11) KÖHLER, H.-J. (1985): Modellversuche für die Dimensionierung von Deckwerken an Wasserstraßen – Stabilität loser Steinschüttungen.- In: Mitteilungsblatt der BAW, Karlsruhe, Nr. 56, p. 69 - 101, ISSN 0572-5801
(12) KÖHLER, H.-J. & BEZUIJEN, A. (1994): Permeability influence of filter layers on the stability of rip-rap revetments under wave attack.- In: Proc. of the 5th Int. Conf. of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, (SEAC-IGS), Vol. 2, p. 767 - 770, ISBN 981-00-5822-5
(13) SPIES, H.; HAUSSECKER, H. & KÖHLER, H.-J. (2000): Material transport and structure changes at soil-water interfaces.- In: WOLSKI, W. ET AL (eds.): Proc. of the 3rd Int. Conf. on Filters and Drainages, Warsaw, Geofilters 2000, Rotterdam, Balkema, p. 91 - 97, ISBN 9058091465
(14) BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (1999): Merkblatt Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB), Entwurf November 1999, ISSN 0572-5801
(15) SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.- In: Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Heft 26
(16) KÖHLER, H.-J. & KOENDERS, M. A. (2001): Direct visualisation of underwater phenomena in soil-fluid interaction.- In: Journal of Hydraulic Research, IAHR, Delft, the Netherlands, (submitted)
(17) ROUSSELL, N.; KÖHLER, H.-J. & KOENDERS, M. A. (2000): Analysis of erosion protection measures in partially saturated subsoils.- In: WOLSKI, W. ET AL (eds.): Proc. of the 3rd Int. Conf. on Filters and Drainages, Warsaw, Geofilters 2000, Rotterdam, Balkema, p. 75 - 81, ISBN 9058091465
(18) SHIMIZU, Y.; TSUJIMOTO, T. & NAGAKAWA, H. (1990): Experiment and macroscopic modelling of flow in highly permeable porous medium under free-surface flow.- In: Journal Hydroscience and Hydraulic Engineering, No. 8 (1), p. 69 - 79

(19) DIETRICH, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturhaher Fließgewässer.- In: Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Heft 198
(20) HOFFMANNS, G.J.C.M.; DEN ADEL, H. & VERHEIJ, H.J. (2000): Shear stress concept in granular filters.- In: Conference Proceedings GeoEng2000.- In: Int. Workshop on Scour Foundations (TC33), Melbourne
(21) KOENDERS, M. A.; REYMANN, S. & KÖHLER, H.-J. (2000): Theoretical and experimental analysis of flow in a turbulent filter layer.- In: WOLSKI, W. ET AL (eds.): Proc. of the 3rd Int. Conf. on Filters and Drainages, Warsaw, Geofilters 2000, Rotterdam, Balkema, p. 67 - 73, ISBN 9058091465