

## **Porenwasserdruckausbreitung im Boden, Messverfahren und Berechnungsansätze**

Porewater pressure spreading in submerged subsoil, measuring technique  
and numerical calculations

Le développement des pressions interstitielles dans le sol, techniques de mesure  
et méthodes de calcul

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ В ГРУНТЕ. ПРИМЕНЯЕМЫЕ  
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ.



Hans-Jürgen Köhler

Hans-Jürgen Köhler, Dipl.-Ing., wissenschaftlicher Angestellter in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Jahrgang 1941.

Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt von 1963 bis 1970, stellvertretender Leiter in der Baustoff- und Bodenprüfstelle Darmstadt von 1970 bis 1973, wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Ingenieurbüro für Grundbau und Bodenmechanik Hamburg von 1973 bis 1974, seit 1975 in der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, seit 1979 Lehrbeauftragter für Erd- und Grundbau an der Fachhochschule (FH) Karlsruhe.

### **Inhaltsangabe**

Schnelle Wasserspiegeländerungen verursachen Porenwasserdruckentwicklungen im unter Wasser stehenden Boden. Die Größe und Verteilung über die Bodentiefe  $z$  ist eine Funktion der Zeit  $t$ . In Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit  $k$  des Bodens wird eine Beziehung zur Absunkgeschwindigkeit  $t_A$  vorgestellt, die den für die erforderliche Sicherheitsberechnung maßgebenden instationären Porenwasserdruck beschreibt. Ergebnisse von numerischen Berechnungen und die Modellversuchstechnik zur Detektion von Bodenpartikelwanderungen werden angesprochen.

### **Summary**

In a submerged subsoil rapid changes in water level will initiate pore water pressure spreading over the soil depth  $z$ , depending on the elapsed time and soil water permeability  $k$ . A correlation between the draw down time  $t_A$  of the changing water level and water permeability  $k$  is described, which will allow to calculate safety factors due to the decisive transient pore water pressure state. Results will be presented of numerical calculations and the set up of model tests in use to detect particle movements.

## Résumé

Des fluctuations rapides du niveau de l'eau provoquent sur une profondeur  $z$  dans un terrain submergé des changements des pressions interstitielles, qui dépendent du temps écoulé et de la perméabilité du sol. On présente une corrélation entre le temps d'abaissement du plan d'eau  $t_A$ , la perméabilité du sol  $k$  et les pressions interstitielles. Cette corrélation peut être utilisée pour le calcul des coefficients de sécurité du terrain. On présente des résultats de calculs numériques, ainsi que les techniques d'essai sur modèle employées pour observer les mouvements des particules du sol.

## Аннотация

Быстрые изменения уровней воды приводят к развитию порового давления в грунтах, находящихся под водой. Его величины и распространение по глубине грунта зависят от времени  $t$ . В зависимости от водопроницаемости "к" грунта устанавливается связь со скоростью понижения уровня воды  $t_A$ , которая описывает неустановившееся поровое давление воды, являющееся необходимым расчетным фактором безопасности. В работе затрагиваются результаты математических расчетов и техника, применяемая для модельных исследований, направленных на определение движения частиц грунта.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	97
2 Porenwasserdruck	97
2.1 Böschungsparalleles Abgleiten	98
2.2 Aufschwimmen der Gewässersohle	99
2.3 Porenwasserdruckentwicklung und Ausbreitung	99
3 Messverfahren	100
4 Berechnungsansätze	101
5 Bodensetzung und Bodenhebung	106
6 Literatur	107



## 1 Einleitung

Sowohl im freien Wasser oberhalb des Gewässerbettes als auch im Porenwasser des gesättigten Bodens gilt für den Wasserdruck  $p_w$  im strömungslosen Zustand die einfache Annahme der hydrostatischen Druckverteilung eines mit der Wasser- bzw. Bodentiefe ( $h_w$  bzw.  $z$ ) proportional ansteigenden Druckverlaufes. Es gilt die Beziehung  $p_w = \gamma_w (h_w + z)$ . Treten zeitliche Strömungsänderungen und/oder Veränderungen der Wasserspiegellagen auf, so gilt der stationäre Zustand nicht mehr, er wird jedoch in der Praxis bei kleinen Fließbewegungen und langsam ablaufenden Wasserstandsänderungen häufig noch als quasi stationär betrachtet, was für ausgesuchte Zeitintervalle  $\Delta t_i$  mit ausreichender Genauigkeit gerade noch gültig sein kann. Mit zunehmenden Geschwindigkeiten der in Bewegung gehaltenen Wasserteilchen (z.B. Orbitalbewegung) ist diese Vereinfachung auch im freien Wasser nicht mehr zulässig, je größer die Bewegungsfrequenzen und je tiefer der betrachtete Wasserhorizont reichen. Wellen auf der freien Wasseroberfläche bilden sich darüberhinaus im Druckverlauf über die Wassertiefe in deutlich gedämpfter Form ab, als es sich nach den auftretenden Geschwindigkeitsgrößen entsprechend der hierfür geltenden Bernoulli-Gleichung im bewegten Wasser in einer Druckabnahme bzw. -zunahme äußern sollte, was nach rein ingenieurmäßiger Betrachtung für ein inkompressibles Medium anzunehmen wäre. In Wirklichkeit ist auch im freien Wasser der jeweilige Anteil von Luft und anderen gasförmigen Stoffen nicht zu vernachlässigen, wenn instationäre Druckzustände erfaßt werden sollen. Im Porenwasser des unter Wasser stehenden Bodens sind die Verhältnisse noch ein wenig komplizierter. Hier gibt es eine Wechselwirkung zwischen dem Feststoffgerüst des Bodens und dem in seinen Porenräumen zirkulierenden bzw. auch ruhenden Wassermedium. Hier erst recht zeigt die vorhandene gasförmige Phase im Porenwasser ihre druckdämpfende Wirkung, was die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserdruckänderungen im Boden besonders nachhaltig beeinflusst. In der klassischen Grundwasserhydraulik wurde dieser Effekt bei im allgemeinen typisch stationären Gleichgewichtsbetrachtungen meist vernachlässigt, weil im Boden zu überwiegenden Teilen geringe

Fließgeschwindigkeiten bei laminarer Grundwasserströmung vorherrschen, darüber hinaus noch begünstigt durch kleine Grundwassergradienten. Der im Grundwasser angenommene Luftgehalt wurde gering bemessen und lag grob verallgemeinernd im Promille-Bereich bis maximal 1 %. Die damit bei der Berechnung von Grundwasserströmungen auftretenden Fehler waren auch vernachlässigbar, solange nach ingenieurmäßigen Maßstäben quasi stationäre Strömungsverhältnisse zu betrachten waren. Dieser Grundsatz mag für hergebrachte Abschätzungen auch weiterhin seine Berechtigung haben, bei instationären Belastungszuständen verliert er seine Bedeutung. Spätestens ab hier werden die bodenmechanischen Zusammenhänge doch etwas komplexer, als es die klassischen Regeln bisher empfehlen. Über eine relativ große Wassertiefe (bis maximal etwa 80 m WS) ist durch den Gehalt an gasförmigen Stoffen im Porenmedium Wasser mit druckdämpfenden Reaktionen zu rechnen, die ihren Einfluß erst recht wirksam werden lassen, wenn es sich um sogenannte schnelle Belastungsänderungen handelt. Hierbei erhält das Verhältnis der Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] zur Änderungsgeschwindigkeit  $v$  [m/s] eine besondere Bedeutung für die zu erwartende Druckreaktion im Boden und hier erst recht im oberflächennahen Bereich.

## 2 Porenwasserdruck

Der Porenwasserdruck  $u$  eines unter Wasser stehenden Bodens steht in direkter Wechselbeziehung zur jeweiligen Standrohrspiegelhöhe (Piezometerhöhe) über dem betrachteten Tiefenhorizont eines beliebig kleinen Bodensegments und beschreibt den jeweils im Porenraum wirkenden Wasserdruck unabhängig davon, ob das Porenwasser sich in einem Bewegungs- oder Ruhezustand befindet. Überlagert werden diese stationären Druckfelder häufig durch zeitliche Änderungen der Strömungsbedingungen, hervorgerufen durch äußere Lasteinwirkungen oder Wasserspiegellagenänderungen, was zur Entstehung des instationären Porenwasserdrucks führt. Insbesondere in wenig durchlässigen Böden entsteht durch Belastungssteigerung ein Porenwasserüberdruck, wie er aus der klassischen Konsolidierungstheorie her bekannt ist. Aber auch der von Damm-



bauingenieuren nicht zu Unrecht gefürchtete Lastfall der schnellen Spiegelsenkung kann Porenwasserüberdruck im Böschungsuntergrund hervorrufen, der zu Stabilitätsverlust in der Böschung führt. Hierbei wird die effektive Spannung im Boden durch den Porenwasserüberdruck bekanntlich soweit vermindert, daß die Mobilisierung der für die Böschungsstandsicherheit erforderlichen Reibungskraft entsprechend der Bedingung von Coulomb verringert wird. Maßgebend ist dabei die Größe der Wasserspiegeländerung und die Sunkgeschwindigkeit. Aber auch schon relativ kleine Sunkgrößen können für wasserbelastete Böschungen gefährlich werden, wenn die Absunkgeschwindigkeit  $v$  [m/s] groß ist.

## 2.1 Böschungspalleles Abgleiten

Soll die Böschungsrutschung verhindert werden, so darf der Böschungswinkel  $\beta$  einen bestimmten Wert nicht übersteigen. Am Beispiel eines körnigen Haufwerks kann mit einem einfachen Experiment die gerade noch zulässige Grenzneigung ermittelt und damit auch der demonstrative Nachweis erbracht werden.

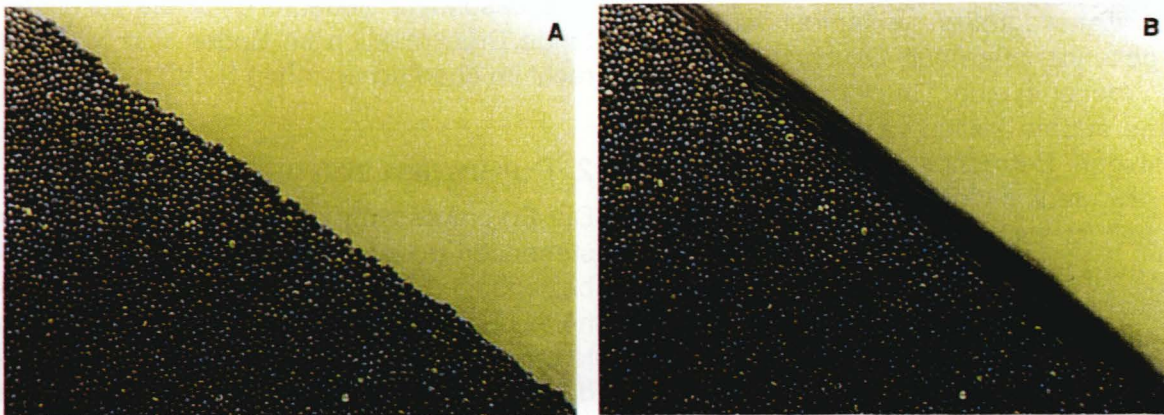


Bild 1 Grenzneigung eines körnigen Haufwerks (JAEGER, NAGEL, 1992)

In Bild 1 (JAEGER, NAGEL, 1992) sind zwei Belastungszustände einer aus gleichkörnigen Senfkugeln bestehenden Böschung dargestellt, die durch laufende Berieselung mit Kornmaterial und Übersteilung der zulässigen Böschungneigung aus dem Gleichgewichtszustand A (linkes Bild) in einen oberflächenparallelen Gleitzustand B (rechtes Bild) überführt wurde. Die davon betroffene endliche Dicke der ins Abgleiten gebrachten ober-

flächennahen Böschungsschicht ist im rechten Bildteil deutlich durch die Verschlierungszonen zu erkennen. Was hier ohne zusätzliche Einwirkung von Wasser demonstriert wurde, ist ebenso nachweisbar für unter Wasser liegende Böschungen, die durch Wasserspiegelsenkungen mit Absunkgeschwindigkeiten  $v$  [m/s] belastet werden, die größer sind als der Wert der Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] des körnigen Haufmaterials, ganz analog zu den Untersuchungen an durchströmten Erddämmen (SCHNITZER, ZELLER, 1957).

Für den in Bild 2 dargestellten Sohl- und Böschungsquerschnitt einer Binnenschiffahrtsstraße ist der Lastfall eines schnellen Absunks des Kanalwasserspiegels dargestellt, wie er durch fahrende Schiffe erzeugt wird. Sowohl an der unbefestigten Sohle wie auch in dem durch ein Deckwerk geschützten Böschungsbereich entsteht durch den schnellen Absunk  $z_A$  [m] eine instationäre Porenwasserdruckverteilung im Untergrund über die Tiefe  $z$  [m] senkrecht zur Eintragsfläche, die die hydrostatische Wasserdruckverteilung für den Endzustand des abgesenkten Wasser-

spiegels überlagert. Der Verlauf des instationären Porenwasserdruckanteils  $\Delta u(z,t)$  kann beschrieben werden durch eine Exponentialfunktion mit den Parametern  $a(t)$  und  $b(t)$ . Sie ist darüberhinaus direkt abhängig vom Absunkmaß  $z_A$  [m].

Die Porenwasserdruckparameter  $a(t)$  und  $b(t)$  beinhalten boden- und belastungsspezifische Kennwerte, die aus Laborversuchen und Belastungsannahmen zu bestimmen sind und in







schiedliche Bodenkennwerte beschreiben läßt, ist auch die Richtung und Tiefenwirkung der Druckausbreitung von der Art, Größe und Dauer der auf den unter Wasser stehenden Boden einwirkenden Druckänderung abhängig. Sie ist um so tief- bzw. weitreichender je durchlässiger sich der Boden verhält und umso weniger gasförmige Anteile sich im Porenmedium Wasser befinden. Auch die Steifigkeit des Bodens und die Größe des mit Wasser gefüllten Porenvolumens zeigen Einfluß auf die Entwicklung und die Ausbreitung der Porenwasserdruckänderungen. Aber auch die Rückkopplung des Porenwasserdruckes auf den "Korn- zu Korndruck" des Bodens sind von wesentlicher Bedeutung. Verformungen des Bodenvolumens überlagern sich mit den auftretenden Porenwasserdrücken, die nicht nur durch Wasserpiegeländerungen entstehen müssen. Auch von außen einwirkende Lasten aus Erschütterungen (Rammerschütterungen, Schwingungen u.ä.) oder Verformungen (Rutschungen, Erddruckumlagerungen u.ä.) sowie ruhende und wechselnde Flächen- bzw. Punktlasten (Lagerflächen, Fundamentlasten u.a.) zeigen ähnliche Porenwasserdruckwirkungen, die in gleicher Weise von den vorangenannten Einflußparametern des Bodens und des Porenmediums Wasser kontrolliert werden.

Von der bisherigen ingenieurmäßigen Anschauung vom Zustand, daß sich das Wasser über den Porenraum des Bodens ausschließlich selber trägt, also keine setzungs- oder hebungserzeugende Spannung im Boden bewirkt - die klassische Bodenmechanik geht deshalb bekanntlich von der sogenannten neutralen Spannung  $u$  aus - sollte für schnelle Wasserspiegeländerungen wie auch für kurzfristig einwirkende und wechselnde Lasten aus den oben aufgeführten Gründen nicht mehr ausgegangen werden.

In der Realität sind die Wirkungen von Laständerungen (Wasser-, Feststoff- und dynamische Wechsellasten) auf Böden unter Wasser von komplexer Bedeutung auf die daraus resultierenden Wechselbeziehungen zwischen dem Porenwasserdruck und dem "Korn- zu Korndruck". Nicht nur die in der Natur verbreiteten Inhomogenitäten des Bodens, hervorgerufen durch unterschiedliche Bodenschichtungen und Bodenparameter verunsichern die ingenieurmäßige Beurtei-

lung, viel schwieriger werden die Verhältnisse noch durch die sich unter Last einstellenden Veränderungen der zur Berechnung maßgebenden Kenngrößen wie Steifigkeit und Scherverhalten des Bodens.

Die Porenwasserdruckausbreitung ist im wesentlichen vom Dämpfungseinfluß der vorhandenen Luft im Porenwasser abhängig und damit auch von der Größe und Verteilung seines Luftvolumens in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck und von der Umgebungstemperatur des Wassers. Bei der Porenwasserdruckbeurteilung ist also von quasi ungesättigten Böden unterhalb des Wasserspiegels auszugehen, wie es die Messungen und die nachfolgend ausgeführten Berechnungen von Porenwasserdruckentwicklungen bestätigen haben.

### 3 Messverfahren

Um die Potentialveränderung im Boden auch für schnelle Lastenänderungen messen zu können, wurde ein Meßsystem entwickelt, das den Vorwegebau, aber auch den nachträglichen Einbau von hochempfindlichen Drucksensoren in unterschiedlichen Bodentiefen gestattet und den Wiederaus- und Wiedereinbau der Porenwasserdrucksensoren ermöglicht. Hierfür wurden Einfach- und Doppelpackerdruckmessvorrichtungen entworfen, gebaut und mit großem Erfolg eingesetzt, wie es die Meßkampagnen seit dem ersten Einsatz in den Jahren 1988 (KÖHLER, 1989) und 1989 (BEZUIJEN, KÖHLER, SCHULZ, 1990) bei In-situ-Versuchen an schiffahrtbelasteten Wasserstraßen und großmaßstäblichen Modellversuchen in der Wellenversuchsgrube der BAW gezeigt haben.

Dabei hat sich das von Anfang an durchgehaltene Prinzip - zu jedem Sensor ein Verstärker - bestens bewährt. Über einen IEEE-Anschluß zwischen dem Meßwerterfassungsrechner und dem Verstärker wird der Verstärkerabgleich vom Meß-PC ausgeführt und dokumentiert. Über eine Analog-Digital-Wandlung werden beliebig viele Meßsensoren in einer Taktrate bis zu 20 ms erfaßt, dargestellt und unmittelbar vor Ort an der Meßstelle ausgewertet.



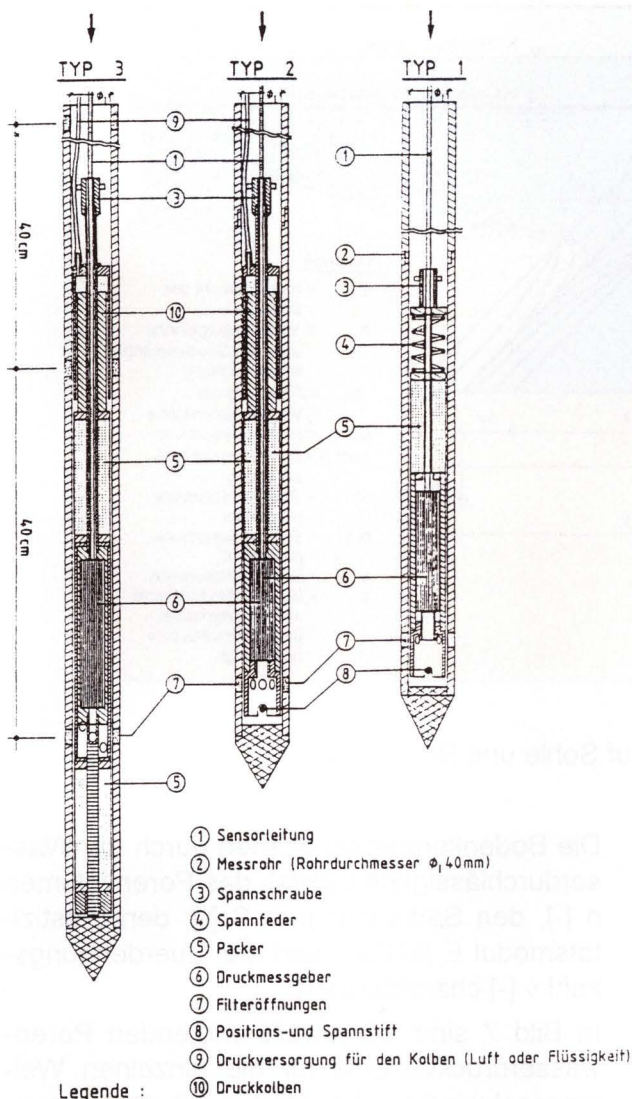


Bild 3 Einfach- und Doppelpackerdruckmessvorrichtungen (Typ 1, 2 und 3)

Das Bild 3 zeigt die eingesetzten Porenwasserdrucksysteme (Einfach- und Doppelpackerdrucksensoren), (KÖHLER, FEDDERSEN, 1991), das Bild 4 veranschaulicht den Datenerfassungsablauf (KÖHLER, 1989).

#### 4 Berechnungsansätze

Gemessene Porenwasserdruckausbreitungen als Folge von Wasserspiegelhebungen und -senkungen 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 (KÖHLER, 1992).

Das Bild 5 zeigt die Auswirkung von Wellen auf die zeitliche Entwicklung des Porenwasserdruckverlaufs im Sohl- und Böschunguntergrund analog zur Entstehung von Porenwasserüberdruck als Folge der schnellen Wasserspiegelsenkung bei Schiffahrtsbelastung. Ausgelöst durch oszillierende Wellen entstehen durch die wechselseitig einwirkenden instationären Porenwasserdrücke  $\Delta u$  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 an der Oberfläche der Gewässersohle ab, die sich in verändernder Riffelbildung analog zur Änderung der Wel-

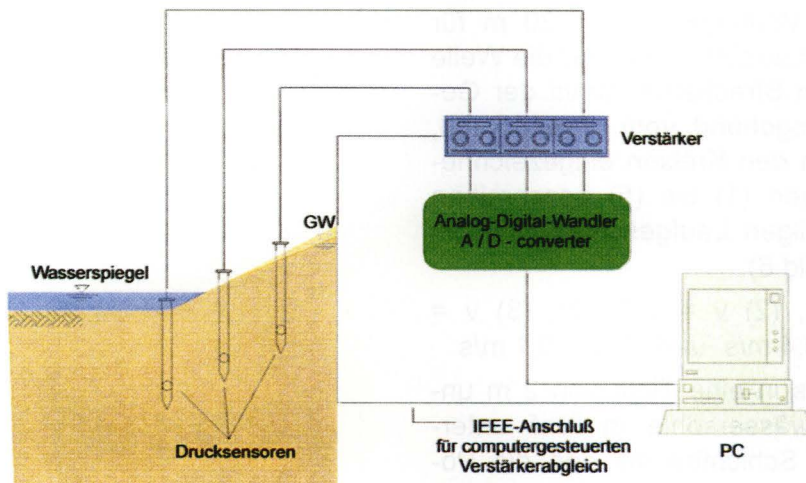


Bild 4 Datenerfassungssystem - Messablauf



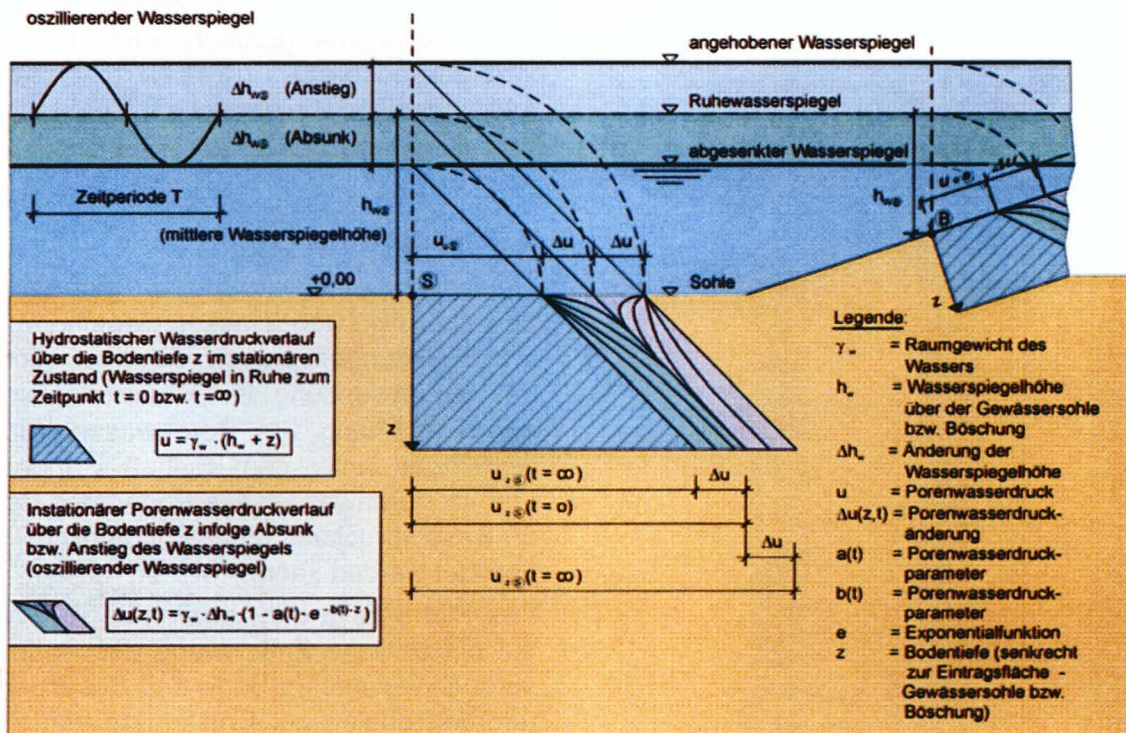


Bild 5 Oszillierende Wasserspiegel - Wirkung auf Sohle und Böschung

lenbilder direkt widerspiegeln. 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 vorzuberechnen. Dabei ist es auch möglich, unterschiedliche Schichtungshorizonte im Boden sowohl in horizontaler als auch vertikaler Ausdehnung zweidimensional zu erfassen. Ein Beispiel einer solchen Berechnung zeigen die Bilder 6 und 7 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 der Gewässersohle, ausgehend vom linken Rand, durchläuft. Die in den Kreisen eingezeichneten Numerierungen (1) bis (5) beschreiben hierbei die jeweiligen Laufgeschwindigkeiten der Welle (vgl. Bild 6):

(1)  $v = 3.2$  m/s, (2)  $v = 1.6$  m/s, (3)  $v = 0,8$  m/s, (4)  $v = 0,4$  m/s und (5)  $v = 0,1$  m/s

Der Boden ist bis in eine Tiefe von 2 m unterhalb der Gewässersohle in fünf unterschiedlich dicke Schichten mit den die Porenwasserdruckausbreitung ganz wesentlich beeinflussenden Bodenkennwerten unterteilt.

Die Bodenkennwerte werden durch die Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s], das Porenvolumen  $n$  [-], den Sättigungsgrad  $S$  [-], den Elastizitätsmodul  $E$  [kN/m<sup>2</sup>] und die Querdehnungszahl  $\nu$  [-] charakterisiert.

In Bild 7 sind die jeweils wirkenden Porenwasserdruckverläufe für die einzelnen Wellengeschwindigkeiten (1) bis (5) in den ausgewählten Vertikalschnitten  $x = 2$  m, 4 m, ... bis 18 m dargestellt. Deutlich ist der Einfluß der Laufgeschwindigkeit der Welle auf die Tiefenwirkung im inhomogenen Untergrund zu erkennen.



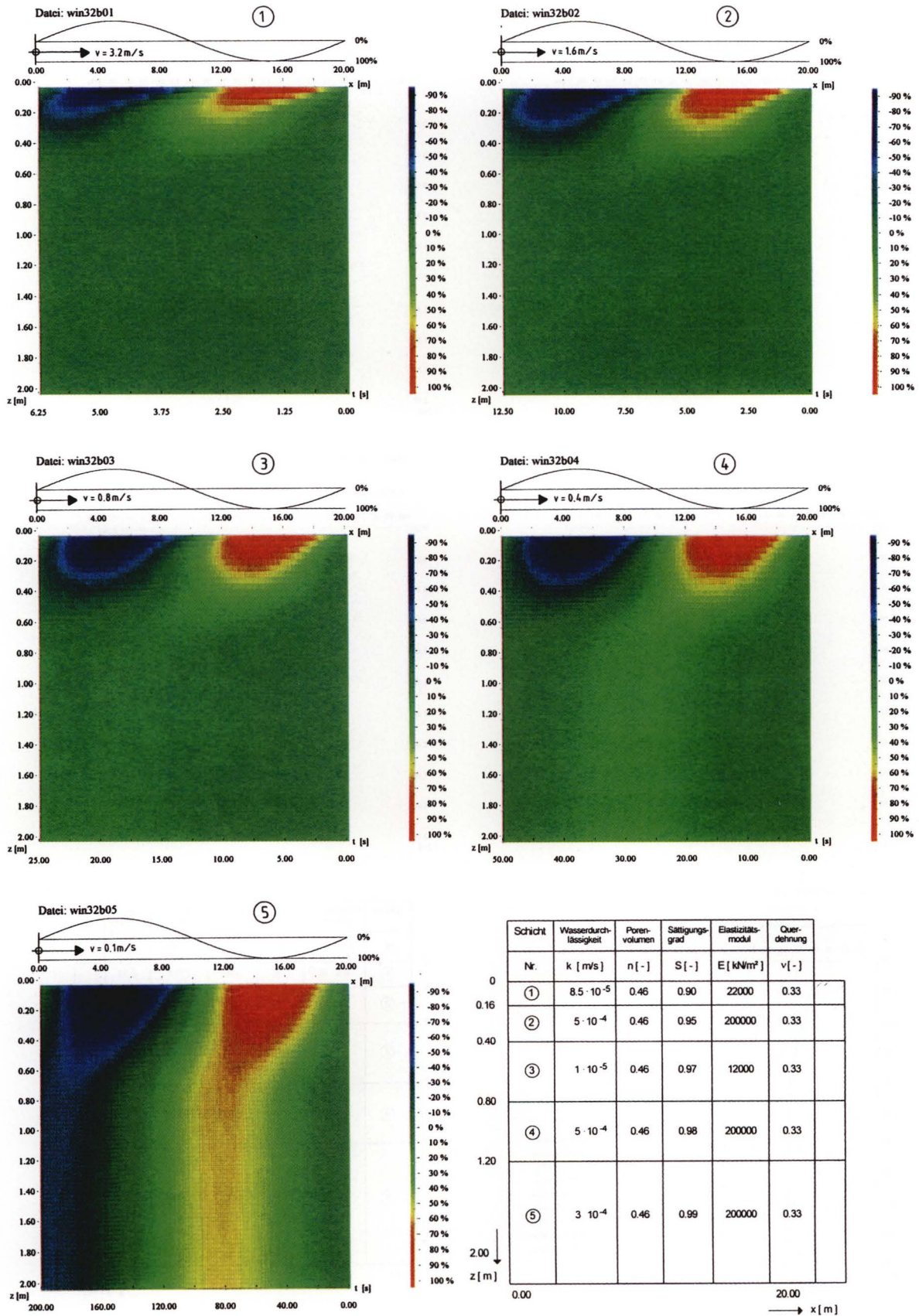
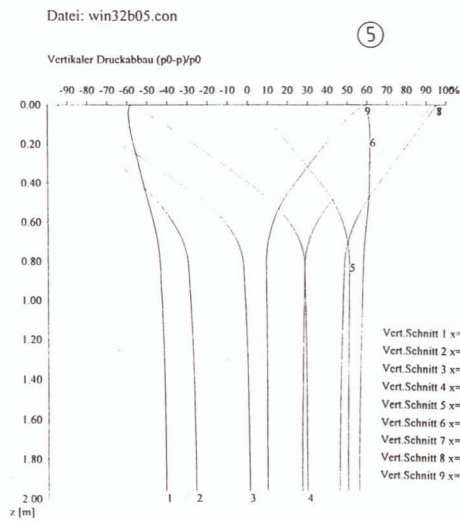
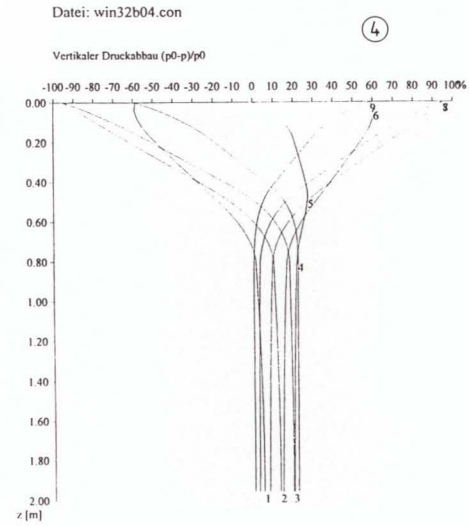
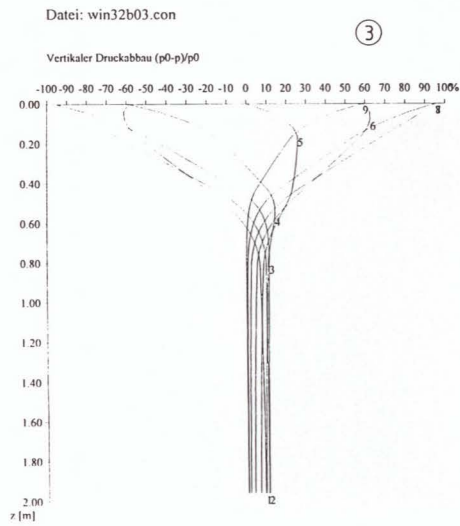
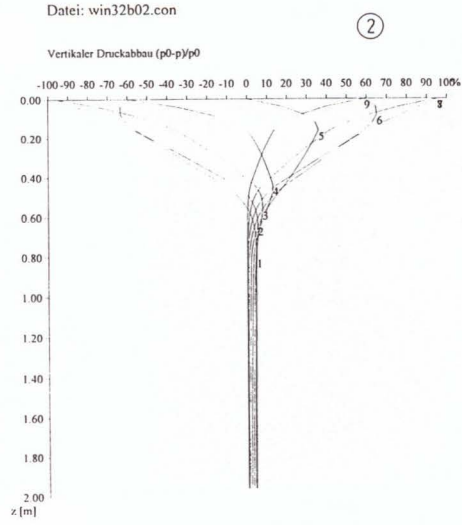
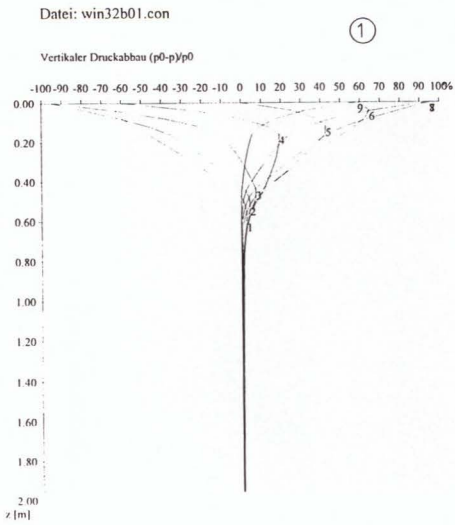


Bild 6 Porenwasserdruck im unter Wasser liegenden Boden unter einer laufenden Welle - Ergebnisse einer zweidimensionalen numerischen Berechnung





Schicht	Wasserdurchlässigkeit	Porenvolumen	Sättigungsgrad	Elastizitätsmodul	Querdehnung
Nr.	k [m/s]	n [-]	S [-]	E [kN/m²]	ν [-]
①	$8.5 \cdot 10^{-5}$	0.46	0.90	22000	0.33
②	$5 \cdot 10^{-4}$	0.46	0.95	200000	0.33
③	$1 \cdot 10^{-5}$	0.46	0.97	12000	0.33
④	$5 \cdot 10^{-4}$	0.46	0.98	200000	0.33
⑤	$3 \cdot 10^{-4}$	0.46	0.99	200000	0.33

z [m] ↓

0.00 → 20.00 x [m]

Bild 7 Porenwasserdruck unter einer laufenden Welle für verschiedene Vertikalschnitte und Laufgeschwindigkeiten in einem inhomogenen Untergrund



Für den einfachen Fall einer homogenen Bodenschicht kann der maßgebende Verlauf des Porenwasserüberdrucks über die Bodentiefe  $z$  [m] mit dem für die Bemessung von Deckwerken an schiffahrtsbelasteten Wasserstraßen für den hier maßgebenden Porenwasserdruckparameter  $b(t)$  (siehe auch Gleichung (1)) in Relation zur Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] des Bodens, stellvertretend für den Lastfall Absunk  $z_A$  [m] aus Schifffahrt

ermittelt werden, wie es Bild 8 wiedergibt.

Eine noch weitergehendere Interpretation für den maßgebenden Porenwasserdruckparameter  $b(t)$  in Abhängigkeit von der Absinkdauer  $t_A$  [s] bis zum Erreichen des tiefsten Punktes der auf die Gewässersohle einwirkenden Wasserspiegelsenkung zeigt das Bild 9.

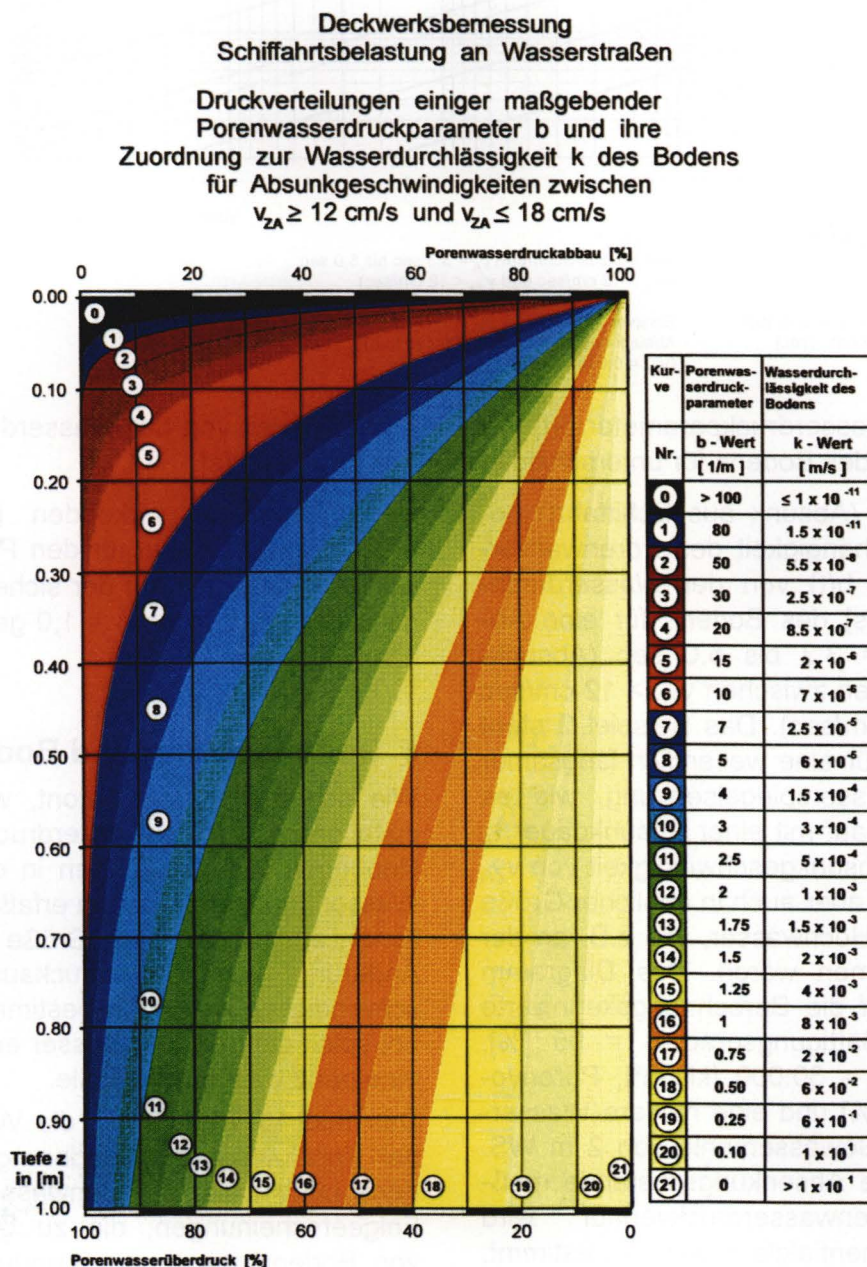


Bild 8 Druckverteilungen mit den maßgebenden Porenwasserdruckparametern  $b(t)$  [1/m] für den Lastfall Absunk  $z_A$  [m] aus Schifffahrt und ihre Zuordnung zur Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] des wasserbelasteten Bodens



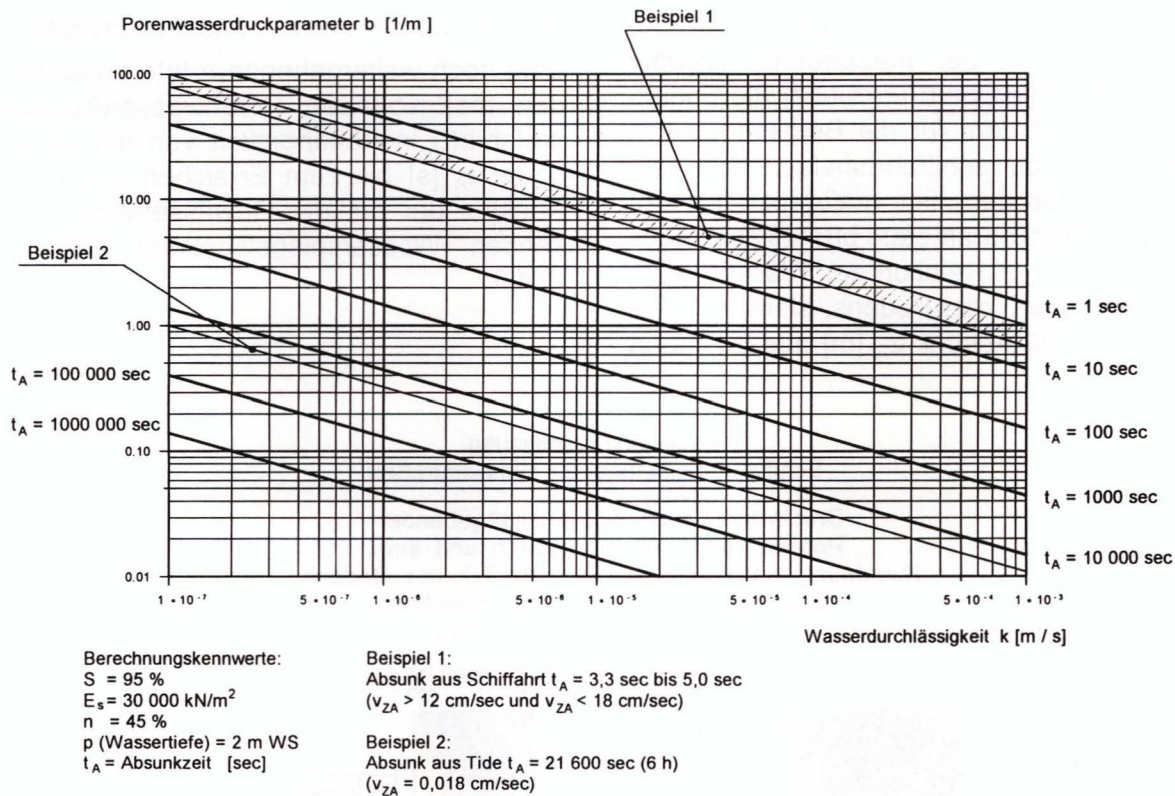


Bild 9 Porenwasserdruckparameter  $b(t)$  [1/m] in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] des Bodens für unterschiedliche Absunkdauer  $t_A$  [s]

Das Beispiel 1 (Absink aus Schifffahrt) beschreibt die Abhängigkeit des Porenwasserdruckparameters  $b(t)$  von der Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] des Bodens für eine Absinkdauer  $t_A = 3.3$  bis  $5.0$  sec (Absinkgeschwindigkeiten zwischen  $v_{ZA} > 12$  cm/sec und  $v_{ZA} < 18$  cm/sec). Das Beispiel 2 steht stellvertretend für eine wesentlich langsamer ablaufende Wasserspiegelsenkung, wie es für den Tideverlauf mit einer Absinkdauer  $t_A = 6$  Stunden (Absinkgeschwindigkeit von  $v_{ZA} = 0.018$  m/sec), aber auch in ähnlicher Größe für ablaufende Hochwässer, wie z.B. an der Saar, anzunehmen wären. Das Diagramm bezieht sich auf die Berechnungskennwerte des Bodens, Sättigungsgrad  $S = 95$  [%], Steifemodul  $E_s = 30.000$  [kN/m<sup>2</sup>], Porenvolumen  $n = 45$  [%] und eine mittlere Wassertiefe über der Gewässersohle von 2 m WS. Der für einzelne Absenkungszustände maßgebende Porenwasserdruckverlauf wird durch die Exponentialgleichung (1) bestimmt. Aus dem Diagramm in Bild 9 ist in Abhängigkeit von der Dauer der Absinkzeit  $t_A$  [s] und der Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/s] des Untergrundes der zugehörige Porenwasserdruckparameter  $b(t)$  auf der Ordinate abzulesen. Durch Einsetzen dieses Parameters  $b(t)$  in Gleichung (1) ergibt sich die Größe des je-

weils instationär wirkenden Porenwasserdrucks  $\Delta u(z,t)$ , wobei für den Parameter  $a(t)$  vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend der Wert von  $a(t) = 1,0$  gesetzt werden kann.

## 5 Bodensetzung und Bodenhebung

Wie schon eingangs betont, werden durch instationäre Porenwasserdruckänderungen Hebungen und Senkungen in dem von den Wasserstandsänderungen erfaßten Bodenvolumen ausgelöst, deren Größe und zeitliche Änderung von der Druckausbreitungsgeschwindigkeit im Boden bestimmt wird. Hierbei spielt die im Porenwasser enthaltene Luft eine ganz wesentliche Rolle.

Das Bild 10 verdeutlicht die Wirkungsweise der Porenwasserdruckänderung auf vorhandene Luftblasen im Porenwasser und deren Folgeerscheinungen, die zu Umlagerungen von Bodenpartikeln, Verformungen des gesamten Bodenvolumens und Fließbewegungen des Porenwassers führen.

Das Bild 11 zeigt das Ergebnis eines mittels Endoskoptechnik ausgewerteten Bodenausschnittes von der Fläche  $6 \times 6$  mm während einer Druckentlastung vom Ausgangsdruck







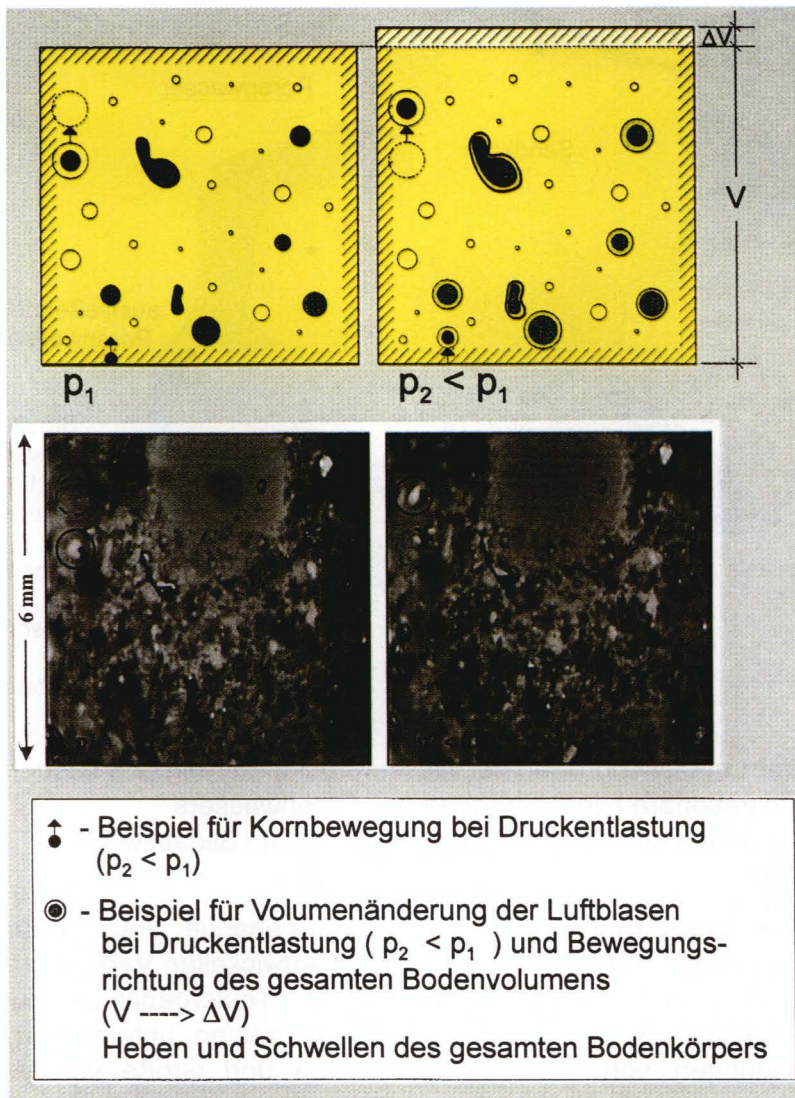


Bild 11 Bodenhebung und Bodensenkung im Laborversuch - Digitale Bildauswertung

KÖHLER, H.-J. The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process. In: Proc. of the 1th Intern. Conf. Geofilters '92,; Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, 1993, A.A. Balkema, Rotterdam

KÖHLER, H.-J., HAARER, R.: Development of excess pore water pressure in over consolidated clay, induced by hydraulic head changes and its effect on sheet pile wall stability of a navigable lock. In: Proc. of the 4th Intern. Symposium Field Measurements in Geomechanics, (FMGM95), Bergamo

KÖHLER, H.-J., HAUSSECKER, H., JÄHNE, B.: Detection of particle movements at soil interfaces due to changing hydraulic load conditions, localised by image processing tech-

nique, Proc. of the 2end Intern. Conf. Geofilters '96, 1996, Montreal,

SCHNITTER, G., ZELLER, J.: Sickerströmungen als Folge von Stauspiegelschwankungen, Mitteilungen ETH Zürich, Heft 50, 1957