

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 103 (1985)  
**Heft:** 19: 50 Jahre Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich

**Artikel:** Erkundung der Druckverhältnisse im Grundwasser  
**Autor:** Ramholt, Tom / Schuster, Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-75782>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 01.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Erkundung der Druckverhältnisse im Grundwasser

Von Tom Ramholt und Peter Schuster, Zürich

## Einleitung

Im Rahmen von geotechnischen Untersuchungen werden die Grundwasser- verhältnisse und insbesondere die Po- renwasserdrücke im Untergrund durch Versetzen und Beobachten von Piezo- metern erfasst. Wirtschaftlichkeitsbe- trachtungen erfordern, dass vorhande- ne Bohrungen optimal genutzt werden. Es werden deshalb häufig mehrstufige Piezometer sowie Kombinationen von Slope-Indicator-Messanlagen mit Pie- zometern im gleichen Bohrloch ver- setzt. Mehrstufige Piezometeranlagen sind allerdings nur dann sinnvoll, wenn zwischen den einzelnen Messpunkten vollwertige Abdichtungen vorhanden sind. Die gegenwärtige Ausführungs- praxis zeigt, dass in einigen Fällen die ausgeführten Abdichtungen nicht zu genügen vermögen und es zu «Kurz- schlüssen» zwischen den einzelnen Messpunkten kommt.

## Materialien zur Bohrlochabdichtung

Im Rahmen einer laufenden For- schungsarbeit wird die Problematik der Bohrlochabdichtung am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der ETH untersucht. Dabei wurden sowohl die Verwendung von Ton- und Benti- nitmaterialien für einen Einbau im trockenen Zustand als auch dickflüssi- ge Zementsuspensionen mit und ohne Tonzusatz geprüft. Die für «trockenen» Einbau in Frage kommenden Tone und Bentonite werden nach ihrer Gewin- nung industriell aufbereitet und in Form von Tabletten (Pellets), Kugel- chen oder als Granulat geliefert. Die folgende Übersicht sowie Bild 1 zeigen die in die Untersuchung einbezogenen Materialien:

Lab.-Nr. 41129: Tabletten (Pellets) aus Bentonitpulver, das unter hohem Druck verfestigt wurde. Durchmesser rd. 19 mm. Herkunft: England.

Lab.-Nr. 41130: Tabletten (Pellets) aus 3 Teilen Bentonitpulver und 1 Teil Ze- ment (volumenbezogen). Herstellung und Abmessungen wie 41129. Her- kunft: England.

Lab.-Nr. 41127: Kugelchen aus gepres- stem Tonpulver, erhältlich mit Durch-

messern von 5 bis 28 mm. Herkunft: Bundesrepublik Deutschland.

Lab.-Nr. 41126: Granulat/Feinkies aus gebrochenem Ca-Bentonit. Herkunft: Bundesrepublik Deutschland.

Lab.-Nr. 41131: Granulat/Feinkies aus gebrochenem Na-Bentonit. Herkunft: Bundesrepublik Deutschland.

In Tabelle 1 werden die massgebenden Eigenschaften zusammengefasst. Für die Beurteilung von Dichtungsmateria-

lien ist die Aktivität  $I_A$ , das Wasserbin- devermögen der Tonfraktion, von Be- deutung. Je höher der Anteil an quellfä- higen Tonmineralien ist, desto höher wird auch die Aktivität. Dieser Zusam- menhang wird deutlich, wenn in der Tabelle die vorherrschende Mineralart mit der Aktivitätszahl verglichen wird. Die Tonkugelchen, Lab.-Nr. 41127, müssen als inaktiv und kaum quellfä- hig bezeichnet werden. Nur Dichtungs- materialien mit massgebendem Anteil an Na-Montmorillonit weisen  $I_A$ -Werte  $> 1,25$  auf und können dementspre- chend als aktiv und stark quellfähig be- zeichnet werden.

Die Untersuchung von Suspensionen umfasst die in der Abdichtungspraxis gebräuchlichen Mischungen aus unter- schiedlichen Anteilen von Zement,

Tabelle 1. Kennwerte der für «trockenen» Einbau geeigneten Dichtungsmaterialien

Lab. Nr.	Liefer- form	Mineralische Zusammensetzung Hauptanteil <sup>1</sup>	Gewichtsanteil <sup>2</sup>		Plastizitäts- eigenschaften			Aktivi- tät $I_A$ <sup>3</sup>
			< 0,002 mm	< 0,06 mm	$w_L$	$w_p$	$I_p$	
41126	Granulat	Ca-Montmorillonit	71,8%	92,0%	82%	29%	53%	0,74
41127	Kugelchen $\varnothing \approx 5$ mm	Kaolinit	56,4%	96,0%	41%	16%	25%	0,44
41129	Pellets	Na-Montmorillonit	92,5%	98,0%	166%	35%	131%	1,42
41130	Pellets	Na-Montmorillonit	71,2%	95,9%	136%	39%	97%	1,36
41131	Granulat	Na-Montmorillonit	69,2%	96,5%	308%	37%	271%	3,92

<sup>1</sup> Bestimmung durch röntgenographische und thermoanalytische Untersuchung

<sup>2</sup> nach Dispergierung durch Sodabehandlung und Beschallung

<sup>3</sup>  $I_A = \frac{I_p}{q^*}$   $q^*$ : Anteil < 0,002 mm, bezogen auf ein Maximalkorn von 0,5 mm

Bild 1. Materialien zur Bohrlochabdichtung für einen Einbau im trockenen Zustand



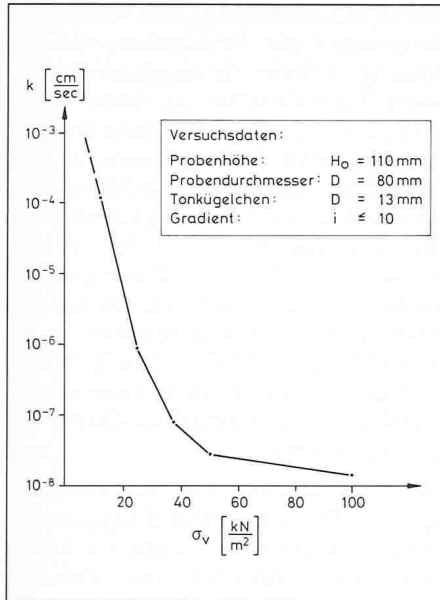
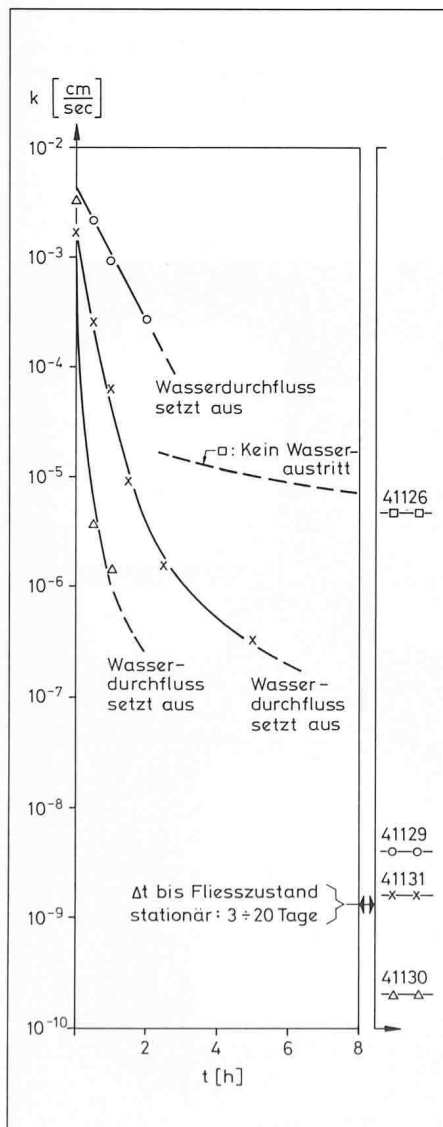


Bild 2. Durchlässigkeitswert als Funktion der Konsolidationsspannung für «trocken» eingebaute Tonkugeln aus Kaolinit (Lab. Nr. 41127)

Bild 3. Dichtungswirkung als Funktion der Zeitspanne nach Wasserkontakt für «trocken» eingebaute, vorwiegend aus Bentonit bestehende Dichtungsmaterialien. Versuchsrandbedingungen: Probenvolumen konstant, Gradient  $i < 100$



Opalinuston, Bentonit und Steinmehl bei einem Gewichtsverhältnis Wasser/Festschubstanz von 1:1 bis 1:2.

## Laboruntersuchungen

Mit Durchlässigkeitsversuchen in Permeameter wurde das Dichtungsverhalten der «trocken» einbaubaren Materialien bestimmt. Die kaum quellfähigen Tonkugeln, Lab.-Nr. 41127, wiesen nach losem Verfüllen im Gerät mit anschliessender Sättigung eine ungenügende Dichtungswirkung auf, die nur durch Verdichtung bzw. Konsolidation des Materials verbessert werden konnte. Aus diesem Grunde wurde für dieses Material die Durchlässigkeit als Funktion einer in Stufen ausgeführten Konsolidation bestimmt (Bild 2). Die Darstellung zeigt, dass ein Abdichtungsziel von  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  bis  $1 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$  erst bei einer Konsolidationsspannung von  $\sigma_v = 37 \text{ kN/m}^2$  und nach einer volumenbezogenen Verformung von rd. 30% erreicht wird. Wegen «Brückenbildungen» werden bei Bohrlochverfüllungen derartige Vertikalspannungen kaum erreicht, so dass festzuhalten ist, dass bei diesem Material eine ausreichende Dichtungswirkung nur durch Verdichtung im Bohrloch (Einstampfen) erreicht werden kann.

Das Verhalten der im wesentlichen aus Bentonit bestehenden Materialien wurde in einem Permeameter bestimmt, das auch bei grossen Quelldrücken ein konstant bleibendes Probenvolumen gewährleistet. Die Materialien wurden in trockenem Zustand lose in die Versuchszellen eingefüllt. Nach Herstellung des Wasserkontaktes wurde in einem ersten Schritt die Abnahme der Durchlässigkeit mit der Zeit als Folge des Quellvorganges bestimmt. Wie Bild 3 zeigt, führte der Quellvorgang bei den Materialien mit Na-Montmorillonit innert 3 bis 7 Stunden zu einem vollständigen Unterbruch des Wasserdurchflusses. In einem zweiten Schritt nach einer Wartezeit von bis zu 20 Tagen wurde der Durchlässigkeitswert nach abgeschlossener Quellung entsprechend einem stationären Fließzustand bestimmt. Die sehr starke Dichtungswirkung des Materials Nr. 41130 ist auf den Zementzusatz zurückzuführen; es ist jedoch anzunehmen, dass längerfristig diese Wirkung abnimmt, da sich die Erhöhung des pH-Wertes durch die Zementbeigabe auf die Kristallstruktur des Montmorillonits ungünstig auswirkt. Die Dichtungswirkung des Ca-Bentonit-Granulats (Nr. 41126) ist im Hinblick auf Bohrlochabdichtungen als ungenügend einzustufen. Bild 4 zeigt die untersuchten Proben unmittelbar nach dem Ausbau.

Suspensionen zur Abdichtung von Bohrlöchern wurden vor allem hinsichtlich des Einbauvorganges untersucht. Zu diesem Zweck wurden unterschiedlich zusammengesetzte Mischungen analog zum Ablauf im Feld in Bohrlochmodelle aus Glasrohren eingebaut. Zusammengefasst ergaben die Resultate, dass weniger das Erzielen einer ausreichenden Dichtungswirkung als vielmehr die Stabilität des Dichtungselementes massgebendes Kriterium für die Beurteilung ist. Die Stabilität kann auf zwei Arten gefährdet werden:

### Piping

Bei einem gewichtsbezogenen Mischungsverhältnis Wasser/Festschubstanz von 1:1 bis etwa 1:1,5, d.h. Suspensionen in ausgesprochen dünnflüssigem Zustand, führen die sich im unteren Teil des Dichtungselementes aufbauenden Porenwasserdrücke dazu, dass im Dichtungsmaterial Strömungskanäle aufgeweitet und Feinanteile ausgeschwemmt werden. Der damit verbundene Verlust an Dichtungswirkung ist nicht auf die Einbauphase beschränkt, sondern bleibt permanent.

### Tragfähigkeit

Werden Suspensionen in zu dünnflüssigem Zustand eingebaut, so kann ein unmittelbar anschliessend ausgeführter Sandfiltereinbau dazu führen, dass sich die Materialien über eine grössere Bohrlochstrecke vermischen. Damit können die einzelnen Elemente (Dichtung, Filter) ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Es zeigt sich, dass die Tragfähigkeit der Schichtgrenze genügt, wenn gewichtsbezogene Mischungsverhältnisse Wasser/Festschubstanz von 1:1,8 nicht überschritten werden und der Sandeinbau unter Wasser, d.h. mit Auftriebswirkung, erfolgt.

## Zur Ausführung von Bohrlochabdichtungen im Feld

Bohrlochabdichtungen mit Suspensionen können im Prinzip in beliebigen Tiefen ausgeführt werden. Das Verfahren ist insbesondere bei geeigneten Bohrungen und bei Kombinationen von Slope-Indicator-Anlage und Piezometern zu empfehlen. Es setzt allerdings die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen Mischanlage mit Pumpenaggregat am Standort der Bohrung voraus. Der Aufbau von Mehrfachabdichtungen mit «trocken» einbaubaren Ton- bzw. Bentonitmaterialien ist bei Bohrungen mit üblichen Durchmessern auf Tiefen bis maximal rund 25 m begrenzt. Bei grösseren Tiefen ist der während des

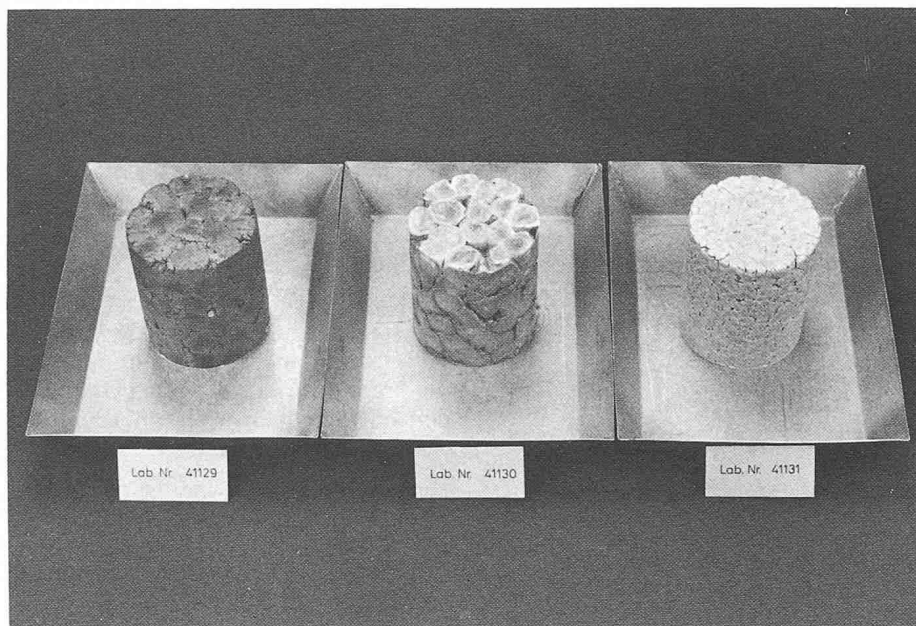


Bild 4. Ausgebaute Proben der in Bild 3 dargestellten Durchlässigkeitsversuche. Das Bild zeigt die nach abgeschlossener Quellung resultierende Materialstruktur  
Probenhöhe: 117 mm, Probendurchmesser: 100 mm

Absinkvorganges im Bohrloch einsetzende Quellvorgang bereits vor Erreichen der Bohrlochsohle so stark fortgeschritten, dass das Dichtungsmaterial entlang der Absinkstrecke am Futterrohr anhaftet und die Sohle nicht erreicht. Abhilfe könnte allenfalls ein Einbringen des quellfähigen Tons in wasserdichten Verpackungen bringen, die nach Erreichen der Bohrlochsohle perforiert würden. Dichtungsmaterialien mit einer Aktivitätszahl  $I_A < \sim 1,0$  erfordern ein Einstampfen im Bohrloch, während Materialien mit  $I_A > \sim 1,0$  dank Quellung eine genügende Dichtwirkung erbringen.

### Verfahren zur Kontrolle von Piezometerabdichtungen

Werden Piezometer verwendet, bei denen der Porenwasserdruck mit Hilfe der Wasserspiegellage im Standrohr bestimmt wird («offenes» System), kann die Funktionstüchtigkeit von Abdichtungen zwischen einzelnen Piezometern geprüft werden. Dies ist nicht möglich bei «geschlossenen» Systemen und Druckmessung mit Hilfe beweglicher Membranen. Das Kontrollverfahren besteht darin, dass mit einem einfachen, von uns entwickelten Hilfsgerät der Wasserspiegel im Standrohr eines Piezometers angehoben oder gesenkt wird. Die gleichzeitig auszuführende

Beobachtung der angrenzenden Piezometer gibt dann Aufschluss über die Qualität der dazwischenliegenden Dichtungselemente. Einen Nachteil des «offenen» Messsystems stellen die vergleichsweise langen Referenzzeiten in Böden mit  $k < 1 \cdot 10^{-7}$  cm/s dar. Dank der erwähnten Einrichtung zur Hebung und Senkung des Wasserspiegels in Tiefen bis 30 m und in Standrohren mit 8 bis 12 mm Innendurchmesser kann die Referenzzeit beträchtlich verkürzt werden. Das dabei anzuwendende Verfahren wird anhand eines Beispiels in Bild 5 erläutert. Die Darstellung zeigt für ein in 30 m Tiefe in eine Moräne eingebautes Piezometer die Absenkung des Wasserspiegels im anfänglich verfüllten Standrohr. Nach einer Beobachtungszeit von 6 Monaten erreichte der Wasserspiegel annähernd das aus benachbarten Piezometern bekannte Niveau des Grundwasserspiegels. In einem zweiten Schritt wurde das Piezometer erneut aufgefüllt und anschließend während kurzer Messintervalle beobachtet, nach denen der Wasserspiegel künstlich abgesenkt oder gehoben wurde. Die sich so ergebende Treppenkurve ermöglicht es, die Lage des Grundwasserspiegels nach bereits etwa 1½ Monaten zu bestimmen.

### Folgerungen

Eine zuverlässige Erfassung von Grundwasserverhältnissen ist nur mög-

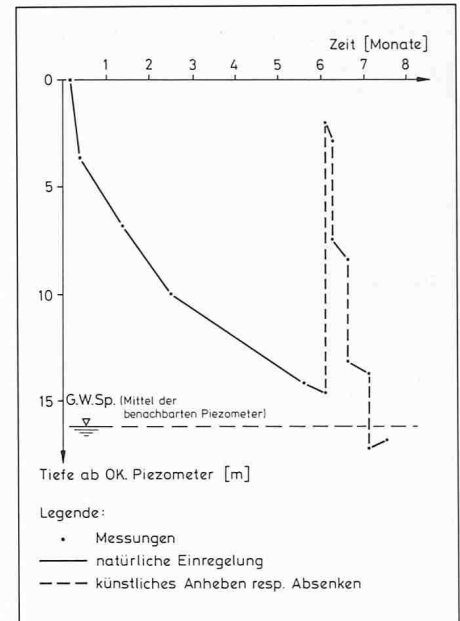


Bild 5. Reduktion der Referenzzeit von Standrohrpiezometern in wenig durchlässigen Böden  
Beispiel: Piezometer PM 8, Schlammdeponie Gutenswil

lich, wenn der dazu notwendige Einbau von Piezometern mit der erforderlichen Genauigkeit und Fachkenntnis erfolgt. Die Voraussetzung dazu stellt eine umfassende Planung der Sondierarbeiten dar. Insbesondere sollten bereits bei Ausschreibung und Vergabe der entsprechenden Arbeiten die Anforderungen an den Piezometereinbau im einzelnen festgelegt werden. Damit können unliebsame Überraschungen sowohl auf Seiten der ausführenden Bohrunternehmung wie auch beim auf verlässliche Messergebnisse angewiesenen Ingenieur vermieden werden.

### Literatur

- Körner, H.J.: Die Eigenschaft von Tonzementgelen und ihre Bedeutung für die Injektionstechnik von Lockergesteinen. Technische Hochschule München, Diss. Nr. 83, 1960  
Schwerdtfeger, K.: Zur Theorie der Injektion von klüftigem Gebirge. Diss. Technische Universität Berlin, 1967  
Technische Akademie Wuppertal: Seminar «Injektionen im Baugrund», 1976.

Adresse der Verfasser: Tom Ramholt, dipl. Ing. ETH; Dr. Peter Schuster, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.