

# Systematische Analyse innovativer Installationsverfahren für Porenwasserdruckgeber

B.Sc. Tobias Priesack, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried/D

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Ralf Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried/D

Prof. Dr.-Ing. Michael Alber, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie/Felsbau, Ruhr-Universität Bochum/D

Ass.-Prof. Dr.rer.nat. Bernhard Salcher Lehrstuhl für Geologie, Universität Salzburg/A

## Zusammenfassung

Elektrische Porenwasserdruckgeber (PWD) haben sich bei der Überwachung von Porenwasserdrücken im Bereich des Geo- und Bauwerkmonitorings bewährt. Die herkömmliche Installation dieser Messgeber im Bohrloch erfolgt mit Hilfe von Sandfilter- und Dichtstrecken, vergleichbar mit dem klassischen Ausbau eines Piezometers nach Casagrande. Neuere Installationsvarianten stellen der sog. „vollverpresste“ Einbau (engl. „fully grouted“) bzw. der Einbau von wiedergewinnbaren Gebern dar, die an fest im Bohrloch eingegebauten PVC-Filterelementen andocken. Beide Verfahren haben gegenüber dem herkömmlichen Ausbau spezifische Vorteile: Der vollverpresste Einbau erlaubt durch den Verzicht auf aufwendig herzustellende Filter – und Dichtstrecken eine schnelle, einfache und kostengünstige Installation. Außerdem ist eine Kombination der Porenwasserdruckmessung mit anderen geotechnischen in-situ-Messverfahren im selben Bohrloch problemlos realisierbar (z.B. Inklinometer und Extensometer). Der Einbau wiedergewinnbarer Geber erlaubt dagegen eine regelmäßige Überprüfung und einen Austausch von defekten Sensoren. Insbesondere bei Langzeitüberwachungen kann damit eine dauerhafte Verfügbarkeit gewährleistet werden. Der Beitrag stellt die Ergebnisse einer praxisorientierten Forschungsarbeit vor, in deren Rahmen die verfahrensspezifischen Grundlagen, Einsatzgrenzen und Installationsprozeduren untersucht wurden.

## Einleitung

Das Monitoring von Porenwasserdrücken spielt im Geo – und Bauwerksmonitoring eine bedeutende Rolle. Ihr großer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Böden macht eine zuverlässige Überwachung bei einer Vielzahl von Fragestellungen notwendig. So hängt die Standsicherheit von Bauwerken unter Umständen in entscheidendem Maße von der Porenwasserdruckentwicklung ab.

Zu diesem Zweck haben sich elektrische Porenwasserdruckgeber verschiedener Bauarten seit Jahrzehnten etabliert. Trotz geräte- und messtechnischer Fortschritte erfolgt der eigentliche Ausbau der Messstellen aber seit rd. 50 Jahren meist noch in Tradition mit dem klassischen Standrohr mittels Dicht- und Filterstrecke (Dunncliff 1993) sowie mit verlorenen Gebern. Diese Methode ist zeitaufwendig, teuer und gerade bei tiefen Messstellen sehr anfällig für fehlerhafte Installationen (Mikkelsen 2003).

Diese Problematik umgeht der schon 1969 durch Vaughan vorgeschlagene „**fully-grouted Messstellenausbau**“. Hierbei wird das Bohrloch vollständig mit einer den Anforderungen des umgebenden Bodens entsprechenden Zement-Bentonit-Suspension verfüllt. Diese Methode hat sich auf dem amerikanischen Kontinent und in Australien bereits seit längerem etabliert, in jüngerer Vergangenheit haben sich eine Reihe von Autoren dieser Ausbaumethodik angenommen (u.a. McKenna 1995; Mikkelsen and Green 2003; Contreras et al. 2008; Simeoni 2012; Marefat et al 2014).

Dennoch ist festzustellen, dass in Mitteleuropa und insbesondere in Deutschland der Messstellenausbau mit dem „fully grouted“-Verfahren nicht oder nur sporadisch angewendet wird.

Eine weitere innovative Installationsmethode stellt der Messstellen-Ausbau mit **wiedergewinnbaren Gebern** dar. Der Ausbau der Messstelle erfolgt konventionell mit Sandfilter, jedoch können die Geber für eventuellen Austausch, Inspektion oder Wartung geborgen werden.

## 1. Der klassische Bohrlochausbau mit Sandfilter

Der Bohrlochausbau mit Sandfilter entspricht dem des klassischen Standrohrs nach Casagrande (Bild 1).

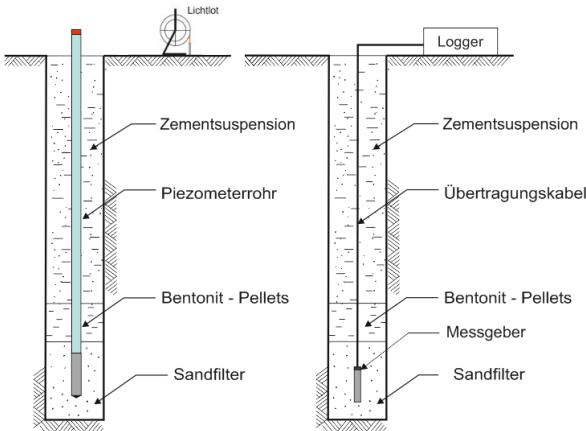


Bild 1: Herkömmlicher Messstellenausbau mit Dicht- und Filterstrecke mit Piezometerrohr nach Casagrande (links) bzw. elektrischem Messgeber (rechts).

Der Sandfilter sollte beim Standrohr nach Casagrande einen hinreichend großen Zustrom in das Messrohr gewährleisten, da der gemessene Druck über den Wasserstand im Rohr abgebildet wird. Der Messgeber ist in dieser Sandschicht eingebettet.

Nach oben hin wird der Filterbereich gegen den Rest des Bohrlochs abgedichtet, um einen Kurzschluss verschiedener Grundwasserstockwerke zu verhindern. Diese Abdichtung besteht aus hydraulisch undurchlässigen Tonmineralgemischen (DVGW Merkblatt zum Bau von Grundwassermessstellen, 2012), mit denen der Ringraum in diesem Bereich verfüllt wird. In der Praxis wird hierfür meist Bentonit in Pellet-Form verwendet. Bentonit-Pellets weisen eine höhere Dichte als Wasser auf und sinken im nassen Bohrloch somit bis auf den Sandfilter ab. Darüber hinaus wird das Bohrloch mit Zement-Suspension ausgegossen.

Diese Art des Ausbaus ist fehleranfällig und zeitaufwendig. Sowohl Sand als auch die für die Abdichtung benötigten Pellets müssen vom Bohrlochmund eingeschüttet werden, eine Kontrolle der korrekten Füllhöhe von Sandfilter und Versiegelung kann allenfalls durch Lotung erfolgen. Ist dies bei seichten Messstellen noch relativ unproblematisch möglich, so nimmt die Schwierigkeit eines definierten und kontrollierten Messstellenausbaus mit zunehmender Teufe oder gar schrägen Bohrungen erheblich zu. Besonders beim Einfüllen der Bentonit-Pellets kommt bei tiefen Messstellen die Gefahr hinzu, das Bohrloch zu verstopfen. Fazit ist, dass der definierte Ausbau tiefer Installationen > rd. 50 m oder die Installation mehrerer Geber in einem Bohrloch mit diesem Verfahren mit vertretbarem Aufwand praktisch nicht möglich ist. So muss für jede Teufenstufe mit einem eigenen Bohrloch kalkuliert werden.

## 2. Ausbau mit wiedergewinnbaren Gebern

Der Ausbau einer Messstelle zur Verwendung eines wiedergewinnbaren elektrischen Porenwasserdruckgebers entspricht grundsätzlich dem oben beschriebenen Ausbau mit Filter- und Dichtstrecke. In ein Bohrloch wird ein PVC – Rohr mit angeschlossenem Filterelement eingebracht. Das Filterelement besteht aus einem porösen Kunststoff und schließt nach oben hin mit einer Andockmanschette für den Porenwasserdruckgeber ab.

Die Dichtheit zwischen Geber und Filterelement ist bei diesem System von großer Wichtigkeit, da aus Umläufigkeiten stark verfälschte Messergebnisse resultieren. Ist die Dichtheit gewährleistet bietet das System aber gegenüber allen anderen geschlossenen Systemen einige Vorteile:

- Wiedergewinnbarkeit der Sensoren: Zur Überprüfung oder zum Austausch der Sensoren können diese entfernt und z.B. neu kalibriert werden. Nach Beendigung eines Projektes können die Sensoren entfernt und wiederverwendet werden. Insbesondere bei Langzeitüberwachung kann somit eine dauerhafte Verfügbarkeit gewährleistet werden.
- Trennung der Gewerke: Die ersten Schritte des Bohrlochausbau kann durch einen Bohrunternehmer mit einschlägiger Erfahrung erfolgen. Das fachgerechte Einbringen der Geber samt eventueller Verkabelung eines Messfeldes kann dann zeitlich entkoppelt durch das Personal für die Messsensorik erfolgen. So können Standzeiten stark reduziert werden und der Personal - und Kostenaufwand minimiert werden.

Grundsätzlich ist dieser Art des Bohrlochausbau allerdings ebenfalls den bereits beschriebenen Problemen bei der Herstellung von Dicht – und Filterstrecke unterworfen.

## 3. Der fully-grouted Messstellenausbau

### 3.1 Grundlagen

Bereits 1961 wies Penman in Theorie und Praxis nach, dass pneumatische Diaphragma - Messgeber in den sehr undurchlässigen Londoner Tonböden ( $k$ -Werte von ca.  $3,4 \times 10^{-8}$ ) innerhalb weniger Minuten auf Druckänderung reagieren, während klassische Standrohr-Piezometer in diesen Bedingungen aufgrund des wesentlich höheren Wasserbedarfs zur Einstellung eines Messwertes deutlich längere Reaktionszeiten aufwiesen. Der Wasserdruk wirkt bei dieser Art von Messgeber direkt auf ein Diaphragma und wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Moderne Geber (Bild

2) nutzen hierfür z.B. die Eigenschaften einer schwingenden Saite, piezoresistiver Kristalle oder Anordnungen von Dehnungsmessstreifen. Wesentlich für das Verfahren ist dabei, dass die hierfür benötigten Wassermengen nur äußerst gering sind.

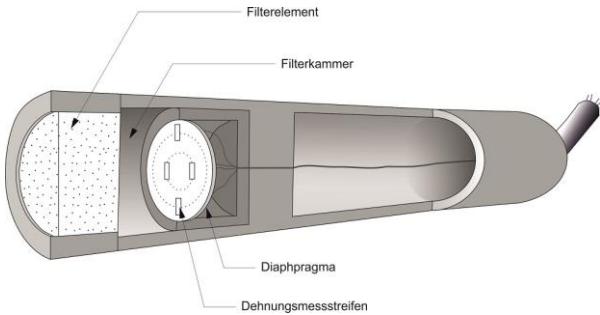


Bild 2: Elektrischer Diraphragma-Porenwasserdruckgeber mit Anordnung von 4 Dehnungsmessstreifen.

Ein direkt in einer wassergesättigten Bodenschicht eingebetteter Geber sollte demnach auf Druckänderungen in dieser ohne größere Verzögerungen reagieren (Mikkelsen; Green, 2003). Folglich sollte sich auch ein Geber in einer Messstelle, welche mit einer Suspension gleicher oder ähnlicher Eigenschaften wie der umgebende Boden verfüllt ist, in der Antwortzeit nicht oder nur minimal unterscheiden. Bisher durchgeführte Feldversuche und Laborversuche (Penman, 1961; McKenna, 1995; Mikkelsen; Slope Indicator 2000) nennen für die fully grouted Methode einen „time-lag“ (in der Ansprechzeit, d.h. es folgt eine Verzögerung bei Einstellung des Messwertes) im Bereich von nur wenigen Minuten (Bild 3).

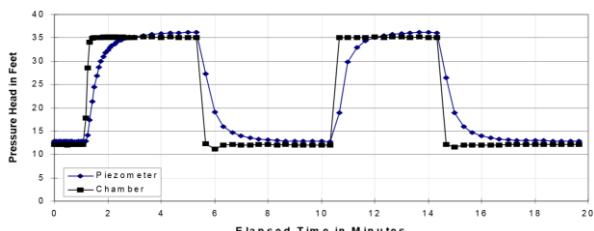


Bild 3: Antwortzeiten eines in Schwingssaitengeberr in Zement-Bentonit-Suspension (Mikkelsen, Green 2003).

### 3.2 Installationsablauf

Die Installation einer fully-Grouted Messstelle sollte idealerweise in der nachstehend beschriebenen Reihenfolge ablaufen:

1. Vorbereiten der Geber: Die Filterkammer sollte mit abgekochtem Wasser aufgesättigt werden, um Gasbläschen in dieser auszuschließen. Auf die Verwendung eines Geotextil-Säckchens um den Geber sollte wegen der damit verbundenen Erhöhung der Ansprechzeit verzichtet werden (Slope Indicator, 2000).

2. Aufrechtes Befestigen der Geber an der Verpressleitung mit nach oben orientierter Filtereinheit. Hierdurch wird ein Auslaufen der Geber verhindert und eine Platzierung auf der richtigen Teufenstufe vereinfacht. Die vollständig mit Suspension verfüllte Verpressleitung verbleibt im Bohrloch (Contreras, 2011).

3. Herstellen der Suspension: Zu einer für den gewünschten W/F-Wert abgemessenen Menge Wasser wird langsam Zement und schließlich Bentonit zugegeben. Besonders beim Bentonit ist darauf zu achten, dass sich keine Klumpen bilden. Hierfür hat sich ein Spülpumpenkreislauf bewährt (Mikkelsen, Green, 2003)

4. Verpressen der Messstelle: Hierbei ist das Kontraktorverfahren, d.h. die aufsteigende Verfüllung des Bohrlochs anzuwenden. Bei tiefen Messstellen muss das Verpressen unter Umständen in Etappen geschehen, um die maximal zulässigen Drücke der Sensoren nicht zu überschreiten. Es ist dabei ratsam, die Messwerte schon während der Installation zu beobachten.

Auch eine Installation von mehreren Gebern ist mit dieser Methode möglich: Mittlerweile bieten verschiedene Hersteller Multi-Point Piezometer-Ketten an, die speziell für den fully-grouted Einsatz entwickelt wurden.

Es liegt auf der Hand, dass es sich bei Einsatz des beschriebenen Verfahrens anbietet, Porenwasserdruckmessungen mit anderen geotechnischen Messverfahren wie Extensometern oder Inklinometern im gleichen Bohrloch zu kombinieren. Hierbei sollte jedoch besonderes Augenmerk auf eventuelle Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten gelegt werden. So ist es z.B. denkbar, dass ein undichtes Inklinometerrohr die Messungen beeinflusst, oder es zu vertikalen Wasserswegsamkeiten entlang von gebündelten Kabeln kommt. Auch sollte vorher sichergestellt werden, dass die verwendete Suspension in ihren Eigenschaften für beide Anwendungen geeignet ist. Dies gilt besonders für Anwendungen die für Ringraumverfüllungen bestimmte Festigkeiten voraussetzen (z.B. Inklinometer).

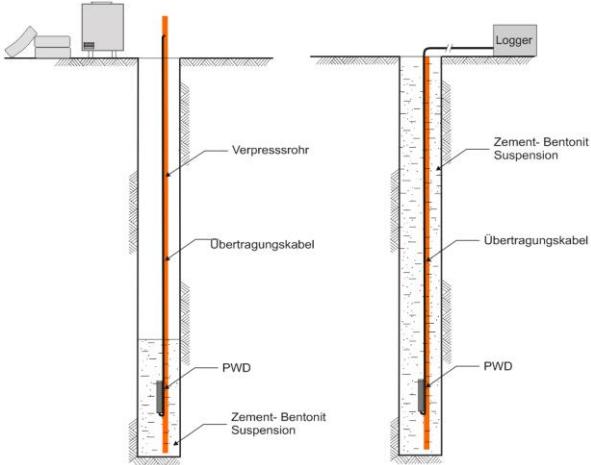


Bild 4: Fully-grouted Bohrlochausbau mit Verpressleitung.

### 3.3 Anforderungen an die Suspension

Bereits Vaughan (1969) empfahl als geeignete Suspension für den fully-grouted Messstellenausbau eine Mischung aus Bentonit und Zement. Bentonit enthält verschiedene Tonminerale mit einem hohen Anteil von Montmorillonit und bildet aufgrund seiner thixotropen Eigenschaften zusammen mit dem Zement eine „stabile, dreidimensionale Wabenstruktur hoher Porosität und geringer Durchlässigkeit“ (Mikkelsen 2002)

Ein reines Bentonit-Wasser-Gemisch ist für dieses Verfahren aber als generell ungeeignet zu bewerten. Hierbei ergeben sich sowohl Probleme mit hohen Quelldrücken aufgrund der Volumenzunahme des Bentonits während des Hydratationsprozesses (Mikkelsen 2002), als auch mit der fehlenden Volumenstabilität die über längere Zeit bestehen muss. Wird Bentonit nur untergeordnet in einer Zementsuspension verwendet, wird diese Problematik allerdings minimiert. Grundsätzlich sollten die Eigenschaften des Verfüllmediums denen des umgebenden Bodens so ähnlich wie möglich sein.

Variablen wie Druckfestigkeit und Durchlässigkeit sind hierbei über das Wasser/Feststoff Verhältnis sowie den Bentonitgehalt variierbar. Vaughan (1969) wies rechnerisch nach, dass die Permeabilität der Suspension bis zu 2 Potenzen niedriger als der umgebende Boden sein darf. Contreras (Contreras et al., 2012) nennt hier 3 Potenzen (Bild 5) während Marefat (Marefat et al., 2014) Werte zwischen einer Potenz bei durchlässigen und 2 Potenzen bei geringdurchlässigen Böden nennt. Sind die Eigenschaften des Untergrundes unbekannt sollte im Zweifelsfall eine traditionelle Ausbaumethode gewählt werden.

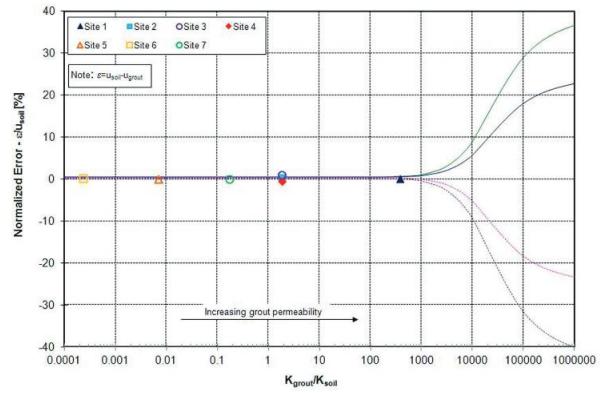


Bild 5: Auftretender Messfehler bei zunehmenden Quotienten aus Durchlässigkeit der Suspension und des umgebenden Bodens (Contreras et al. 2012).

## 4. Laborversuche

Im Rahmen einer Masterarbeit (Priesack, in Vorbereitung), die im Verbund zwischen den Universitäten Salzburg und Bochum, sowie dem Ingenieurbüro Dr. Plinninger Geotechnik bearbeitet wurde, sollte die „fully-grouted“-Methode im Labor besonders hinsichtlich ihres time-lags bei Verwendung unterschiedlicher Suspensionen untersucht werden. Hierfür wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 125 mm im Labor Druckänderungen ausgesetzt und ihre Antwortzeiten gemessen.

### 4.1 Probenherstellung

Für die Durchführung der Versuche wurden insgesamt 8 Proben verschiedener Eigenschaften hergestellt. Der Durchmesser betrug gemäß eines typischen Bohrlochdurchmessers 125 mm, die Höhe 300 mm (Bild 6). Durch die Probenhöhe sollte sichergestellt werden, dass die Messung des Drucks vor allem aus dem radialen Umfeld und nicht vertikal erfolgte.



Bild 6: Probe P04 aus handelsüblicher Bohrlochuspension (rechts) nach dem Entfernen aus der Schalung (braunes KG-Rohr, links).

Verwendet wurden hierfür:

- Handelsübliche, suspensionsstabile Fertigmischung für die Verfüllung von Hohlräumen. Die Durchlässigkeit der Fertigmischung wird vom Hersteller als  $5,0 \times 10^{-8}$  bei einem W/F – Wert von 0,82 angegeben. Für die Versuche wurden verschiedene W/F – Werte eingestellt.
- Wasser – Portlandzement – Bentonit im Verhältnis w/c/b = 2,5 / 1 / 0,3 mit einer Durchlässigkeit von ca.  $10^{-7}$ .

Zur Herstellung der Suspension wurde zuerst die für das gewünschte Wasser/Feststoff-Verhältnis benötigte Wassermenge abgemessen und dann unter ständigem Rühren das Zementpulver hinzugegeben. Durch diese Reihenfolge sollte die Bildung von Klumpen und größeren Lufteinschlüssen verringert werden.

Für 7 Proben wurde gemäß den Bedingungen im Feld normales Leitungswasser verwendet, für eine Probe entgastes Wasser. Bei Erreichen der gewünschten Eigenschaften der Suspension wurden die Geber in eine verlorene Schalung aus einem handelsüblichen KG-Rohr mit einem Durchmesser von 125 mm eingegossen. Die Geber wurden anfänglich durch einen Draht zentriert. Im Laufe der Versuche zeigte sich aber, dass diese beim Einfüllen der Suspension leicht gegen den Rand des Rohres verrutschen konnten. Bei weiteren Versuchen erfolgte die Zentrierung mittels eines Stabes.

Die Abbindezeit betrug gemäß der Festigkeitsentwicklung von Zement mindestens 28 Tage. Die Rohre wurden dann längs aufgeschnitten und die Proben entfernt. Proben niedriger W/F-Werte erwiesen sich hierbei sehr anfällig für Risse. Beschädigte Proben wurden verworfen.

#### 4.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Für die Untersuchung von dynamischen Druckverhältnissen wurde ein Versuchsaufbau mit regelbarem Wasserdruck und mehreren Gebern verwendet (Bilder 7 und 8). Dieser umfasst:

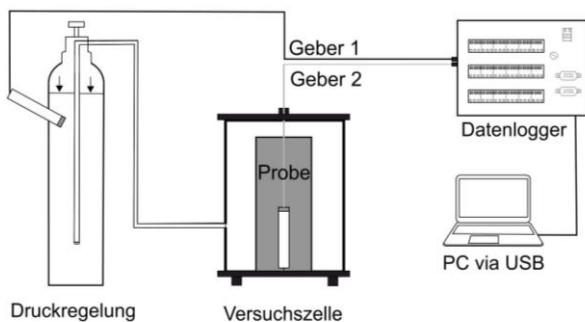


Bild 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

- Datenlogger vom Typ ADK 100 des Herstellers SISGEO®, basierend auf Campbell CR1000. Der Anschluss der beiden Messgeber erfolgt über ein Multiplexer-Board. Zur Funktionsprüfung der verwendeten Sensoren stand außerdem ein tragbarer Datenlogger vom Typ SISGEO "New Leonardo" zur Verfügung.
- Plexiglas Druckzelle bestehend aus einem 3 mm starkem Plexiglaszyylinder, nach oben und unten hin durch zwei Kunststoffplatten mit Dichtungsringen abgeschlossen. Über eine druckdichte Kabelverschraubung wird das Anschlusskabel des Gebers nach oben hin aus der Zelle zum Datenlogger geführt.
- Gaszylinder mit angeschlossenem, regelbarem Luftdrucksystem. Der Zylinder ist teils wassergefüllt. Über ein Manometer-Ventil kann der Druck im Zylinder manuell eingestellt werden und über einen Schlauch in die Druckzelle weitergeleitet werden. Der Druck im Zylinder wird über einen integrierten Sensor aufgezeichnet, welcher ebenfalls mit dem Datenlogger verbunden ist.
- SISGEO 4-20 mA Porenwasserdruckgeber mit einem Messbereich zwischen 0 und 200 kPa mit zwei unterschiedlichen Schraubfiltern (Eisensintherfilter, Keramikfilter). Diese wurden mit entgastem Wasser aufgesättigt.
- Laptop mit installierter Datenerfassungs-Software „Multilogger“ (Canary Systems).



Bild 8: Plexiglas-Druckzelle mit eingebauter Probe P04.

#### 4.3 Versuchsergebnisse und Interpretation

Die beiden ersten untersuchten Proben P01 und P02 zeigten gegenüber Druckänderungen praktisch kein Ansprechverhalten. In den Versuchen konnte im Versuchszeitraum von mehreren Stunden bei einem Au-

Äußen druck von ca. 150 kPa nur ein Anstieg von etwa 20 kPa beobachtet werden konnte.

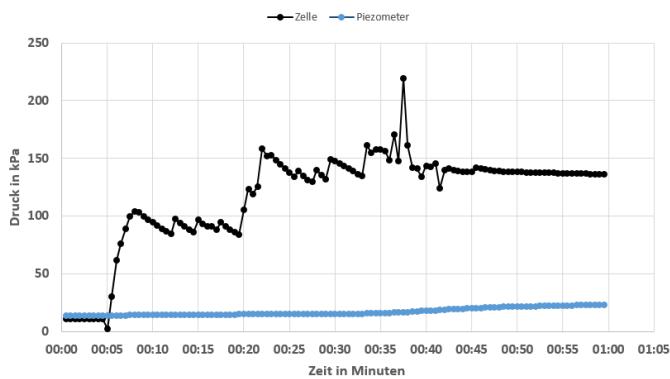


Bild 09: Reaktion auf Erhöhung des Außendrucks bei der randlich ausgetrockneten Probe P01.

Der Grund für dieses Verhalten ist sehr wahrscheinlich in der Herstellung dieser ersten beiden Proben zu suchen. Zwar fand das 6-wöchige Abbinden locker abgedeckt statt, trotzdem konnte die Probe offenbar so weit austrocknen, dass ein Ansprechverhalten auf Druckänderung in der Versuchszelle praktisch nicht mehr gegeben war. Auch optisch unterschied sich die Probe von den späteren, durch das Auftreten von hellen, trockenen Stellen, insbesondere entlang von Rissen im Material (vgl. Bild 10).



Bild 10: Randlich ausgetrocknete Probe P01: Deutlich erkennbar sind Trocknungsrisse und deutlich helleres Material im Randbereich.

Das Abbinden der Suspension und die Lagerung der Probe erfolgten nach diesen Ergebnissen unter Wasser. P03 lieferte daraufhin ein mit der bisherigen Literatur gut vergleichbares Ergebnis. Der Druck in der Probe gleicht nach etwa 6 Minuten nahezu dem Außendruck. Auffällig ist ein leicht höherer Druck im Inneren der Probe, welcher sich dem Außendruck von 0 kPa nur

asymptotisch annähert. Beim Entfernen der Probe aus der ausgehärteten Suspension wurde deutlich, dass der Filter sehr randlich (ca. 1,5cm von der Rohrwandung) lag. Die Fixierung folgte daraufhin zentral mittels eines Holzstabes. P04 bis P07 zeigten, obwohl ähnliche W/F Werte und sehr unterschiedliche, schwer interpretierbare Ergebnisse teils ohne klaren Trend (vgl. Abb.11).

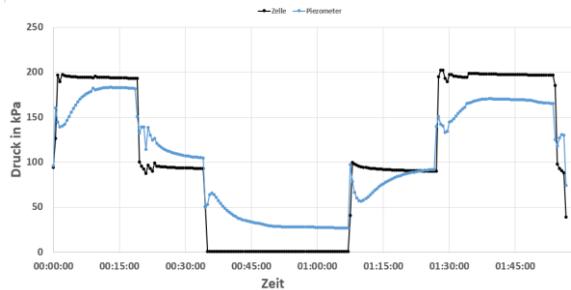


Bild 11: Stark verzögerte Reaktion von Probe P05: Kein vollständiges Erreichen des Außendrucks über einen Zeitraum von knapp zwei Stunden.

Offenbar erfolgte mit der dadurch bedingten größeren Distanz zum Rand der Probe eine Druckweitergabe nur unzureichend. Im Rahmen weiterer Laboruntersuchungen unter dem REM stellte sich heraus, dass die verwendete Suspension zwar Tonminerale enthielt, jedoch nicht wie von McKenna (1995) gefordert einen Anteil Bentonit (d.h. Montmorillonit-Minerale).

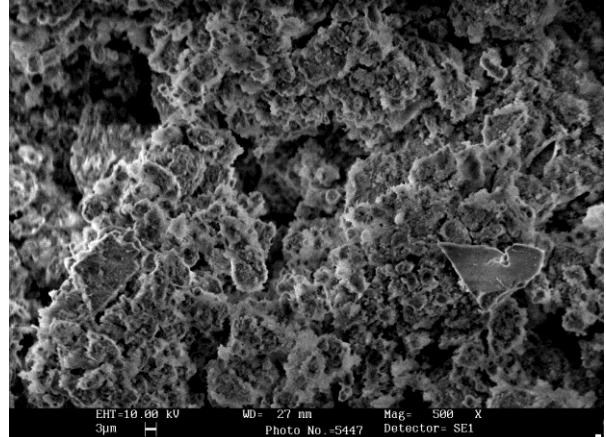


Bild 12: REM-Aufnahme der handelsüblichen Bohrloch-Fertigmischung mit 500-facher Vergrößerung.

Daraufhin wurde von der Verwendung der Fertigmischung abgesehen und ein Portlandzement - Bentonit-Gemisch verwendet. Die resultierende Kurve (Abb. 13) zeigt auf Druckveränderungen zwischen 0 und 200kPa eine sofortige Reaktion. Ein asymptotisches Verhalten nahe 0 kPa ist praktisch nicht vorhanden.

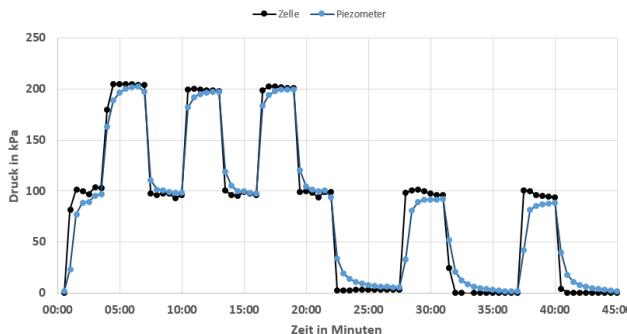


Bild 13: Kurvenverlauf Zement – Bentonit-Suspension. Sofortiges Ansprechverhalten auf Druckänderungen.

## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Anwendung innovativer Ausbauverfahren in der Porenwasserdruckmessung bietet entscheidende technische und wirtschaftliche Vorteile.

Durch den Einbau wiedergewinnbarer Geber können die Gewerke Bohren und Messtechnik getrennt werden und insbesondere bei Langzeitüberwachungen eine dauerhafte Verfügbarkeit und Kalibrierbarkeit der Messgeber gewährleistet werden. Das Verfahren unterliegt aber hinsichtlich des Messstellenausbaus denselben Problemen, wie ein herkömmlicher Standrohr-Ausbau

Die Anwendung des „fully grouted“-Verfahrens bietet erhebliche Vorteile durch die schnelle und unkomplizierte Verfüllung des gesamten Bohrlochs mit nur einem Verfüllmedium (Zement-Bentonit-Suspension). Dies trägt zu einem einheitlichen, definierten Aufbau der Messstelle bei und verhindert zuverlässig hydraulische Kurzschlüsse. Sie erlaubt zudem eine Installation von mehreren Porenwasserdruckgebern in einem Bohrloch und sogar die Kombination mit anderen geotechnischen Messverfahren wie Extensometern oder Inklinometern.

Die durchgeführten Laborversuche legen die Vermutung nahe, dass eine für den fully-grouted-Ausbau geeignete Bohrlochuspension einen gewissen Anteil quellfähiger Tonminerale, speziell wohl Montmorillonit enthalten sollte. Obwohl beide Arten von Ausbau-medien ähnliche Durchlässigkeiten aufweisen, unterscheiden sich die experimentellen Ergebnisse deutlich. Es ist denkbar, dass der zugefügte Bentonit durch seine dreidimensionale Struktur die mechanischen Eigen-schaften der erhärteten Suspension verändert und die Weitergabe des Drucks teilweise aufgrund elastischer Verformung geschieht.

Ebenso ist auf Basis der Labvorversuche festzustellen, dass ein randliches Austrocknen des Verfüllmediums die Möglichkeiten der Wasserdruckfortpflanzung offenbar massiv reduziert. Die Folgen hiervon können ein

verzögertes, bzw. gar nicht vorhandenes Ansprechverhalten sein. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Effekt in der praktischen Anwendung kaum eine Rolle spielen wird.

Es ist zu hoffen, dass die vorgestellten Ergebnisse einen Beitrag dazu leisten, dass auch in Deutschland die Anwendung innovativer Einbauverfahren den Stellenwert erhält, der ihnen in anderen Ländern (u.a. USA, Australien) längst zufällt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Contreras, I.A., Grosser, A.T., VerStrate, R.H. (2008): The use of the fully-grouted method for piezometer installation. *Geotechnical News*, 26 (2): 30–40.
- [2] Contreras I.A., Grosser A.T., Ver Strate, R.H., (2012): Update of the Fully-grouted Method of Piezometer Installation. *Geotechnical News* Juni 2012, 20–25
- [3] Dunnicliif, J. (1993): Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.
- [4] DVGW – Merkblatt: Bau von Grundwassermessstellen (2012)
- [5] Marefat M., Chapuis R.P., Duhaime, F., (2014): Piezometric error for fully grouted piezometers Installed in clay layers. *Geo Regina* 2014.
- [6] McKenna, G.T. (1995): Grouted-in installation of piezometers in boreholes. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 355–363.
- [7] Mikkelsen, P.E. 2002. Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments. *Geotechnical News*, 20(4): 38-42.
- [8] Mikkelsen, P.E. and Green, G.E. (2003): Piezometers in fully grouted boreholes. *Proc. Sixth Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics*. Oslo, Norway.
- [9] Mikkelsen, P.E., Slope Indicator Co. (2000): Installing Piezometers - The Fully-Grouted-Method: <http://www.slopeindicator.com/support/piezometers/technote-grout-in-piezo-papers.php> (abgerufen am 25.10.2015)
- [10] Penman, A.D.M. (1961): A study of the response time of various type of piezometer. *Proceeding of the Conf. Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths. London, S. 53-58.
- [11] Simeoni, L. (2012): Laboratory tests for measuring the time-lag of fully grouted piezometers. *Journal of Hydrology*, 438–439: 215–222.

- [12] Vaughan, P.R. 1969. A note on sealing piezometers in boreholes. *Géotechnique*, 19(3): 405-413.