

Systematische Analyse innovativer Installationsverfahren für Porenwasserdruckgeber

B.Sc. Tobias PRIESACK,
Dipl.-Geol. (Univ.) Dr.rer.nat. Ralf J. PLINNINGER
Ingenieurbüro Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried
Prof. Dr.-Ing. Michael ALBER
Ruhr Universität Bochum
Ass.-Prof. Dr rer.nat , Bernhard SALCHER
Lehrstuhl für Geologie, Universität Salzburg

KURZFASSUNG

Elektrische Porenwasserdruckgeber (PWD) haben sich bei der Überwachung von Porenwasserdrücken im Bereich des Geo- und Bauwerksmonitorings 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 eingebaute PVC-Filterelemente andocken. Beide Verfahren haben gegenüber dem herkömmlichen Ausbau spezifische Vorzüge: 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. mit Inklinometer oder Extensometer). Der Einbau wiedergewinnbarer Geber erlaubt dagegen eine regelmäßige Überprüfung und einen Austausch defekter 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.

1. EINLEITUNG

Das Monitoring von Porenwasserdrücken spielt im Geo- und Bauwerksmonitoring eine bedeutende Rolle. Der signifikante Einfluss von Porenwasserdrücken auf die mechanischen Eigenschaften von Böden und die Standsicherheit von Bauwerken macht eine zuverlässige Überwachung bei einer Vielzahl von Fragestellungen notwendig.

Zu diesem Zweck haben sich elektrische Porenwasserdruckgeber verschiedenster 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 tieferen Messstellen sehr anfällig für fehlerhafte Installationen [Mikkelsen, Green, 2003]. Diese Problematik umgeht der schon 1969 durch Vaughan vorgeschlagene, vollverpresste oder engl. „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 bereits seit längerem etabliert, in jüngerer Vergangenheit haben sich

eine Reihe von Autoren dieser Ausbaumethodik angenommen (u.a. McKenna 1995; Mikkelsen und 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 (noch) nicht oder nur sporadisch angewendet wird.

Eine weitere innovative Installationsmethode stellt der Messstellenausbau mit wiedergewinnbaren Gebern dar. Der Ausbau der Messstelle erfolgt konventionell mit Sandfilter, Vollrohr und Filtereinheit, jedoch können die Geber für eventuellen Austausch, Inspektion oder Wartung über das Vollrohr gezogen und ggf. ausgetauscht werden.

2. DER KLASSISCHE AUSBAU MIT SANDFILTER

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

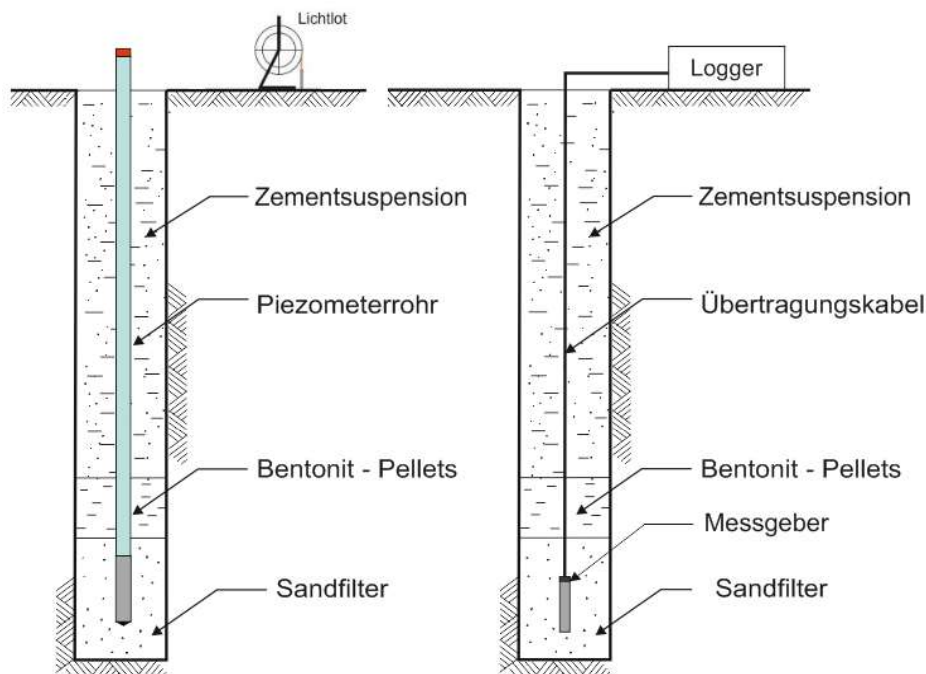


Abb. 1 Herkömmlicher Messstellenausbau mit Dicht- und Filterstrecke mit Piezometerrohr nach Casagrande (links) bzw. elektrischem Messgeber (rechts).

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 aus eingeschüttet oder eingespült 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 Messstellenausbau 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. Beim Ausbau mit mehreren Gebern muss für jede Teufenstufe mit einem eigenen Bohrloch kalkuliert werden.

3. 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 mehrere 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 Erstellung des Bohrlochs und der Bohrlochausbau mit Voll- und Filterrohr 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 Filterstrecken unterworfen.

4. DER FULLY-GROUTED MESSSTELLENAUSBAU

4.1. GRUNDLAGEN

Bereits 1961 wies Penman in Theorie und Praxis nach, dass pneumatische Diaphragma - Messgeber in den sehr undurchlässigen Londoner Tonböden (k -Werte von ca. $3,4 \times 10^{-8}$ m/s) 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 Wasserdruck wirkt

bei dieser Art von Messgeber direkt auf ein Diaphragma und wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Moderne Geber (Abb. 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.

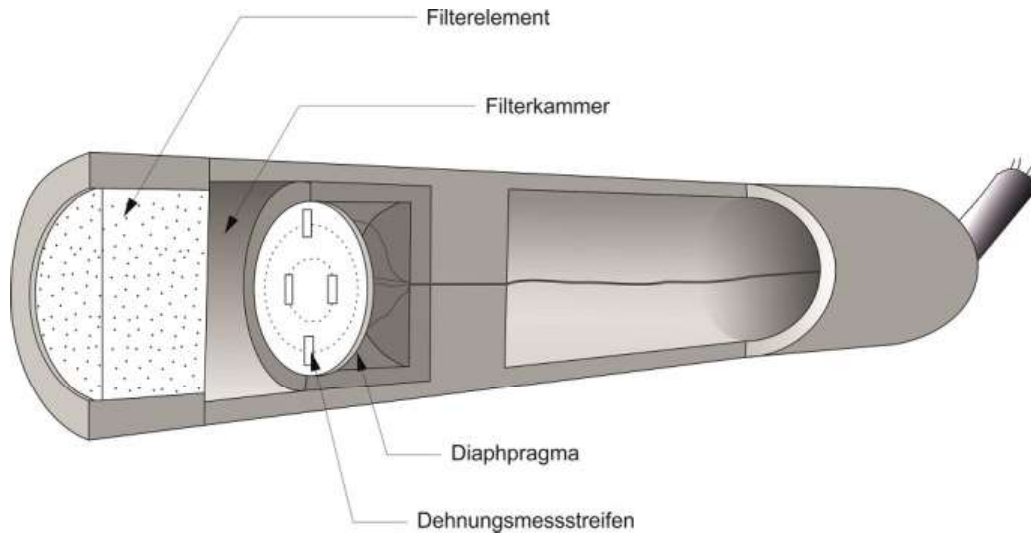


Abb. 2 Elektrischer Diaphragma - Porenwasserdruckgeber mit Anordnung von 4 Dehnungsmessstreifen.

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 (Abb. 3).

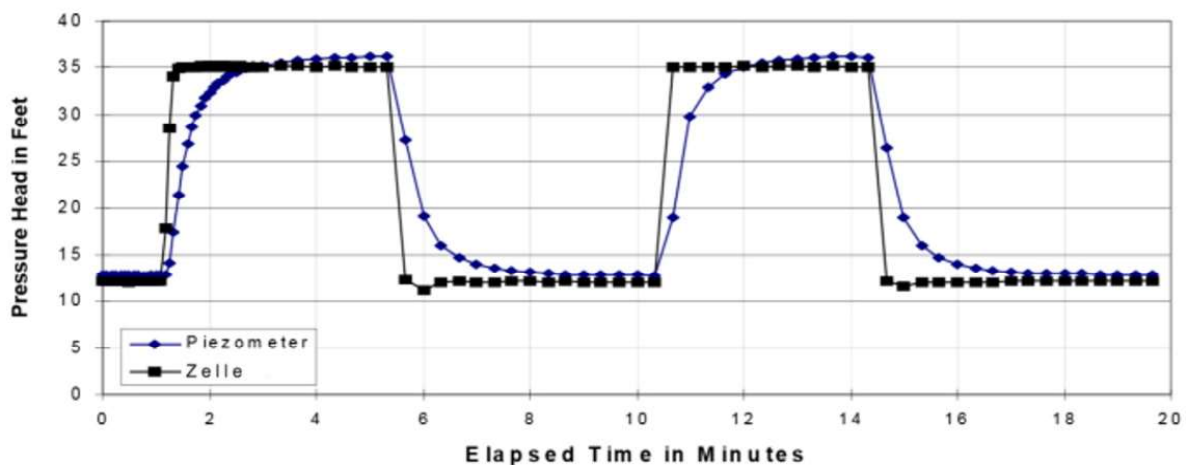


Abb. 3 Antwortzeiten eines Schwingensaitengebers in Zement-Bentonit-Suspension (Mikkelsen, Green 2003).

4.2. INSTALLATIONSABLAUF

Die Installation einer fully-Grouted Messstelle sollte idealerweise in der nachstehend beschriebenen Reihenfolge ablaufen (Abb. 4):

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 bei Diaphragma-Piezometern wegen der damit verbundenen Erhöhung der Ansprechzeit verzichtet werden [Mikkelsen, 2003].
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, 2008].
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, 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 Wasserwegsamkeiten 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).

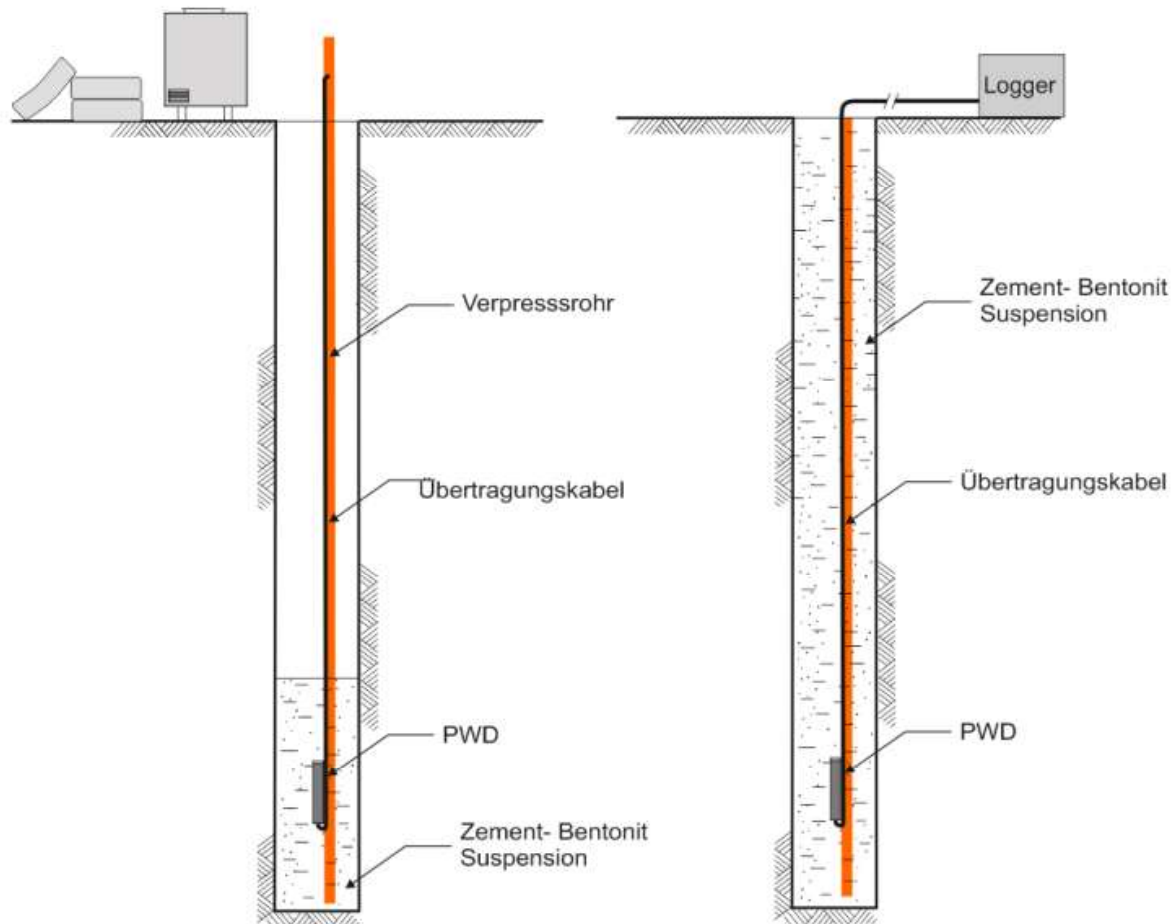


Abb.4 Fully-grouted Bohrlochausbau mit Verpressleitung

4.3. 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 Volumensstabilität 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 höher als der umgebende Boden sein darf. Contreras [Contreras et al., 2012] nennt hier 3 Potenzen (Abbildung 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.

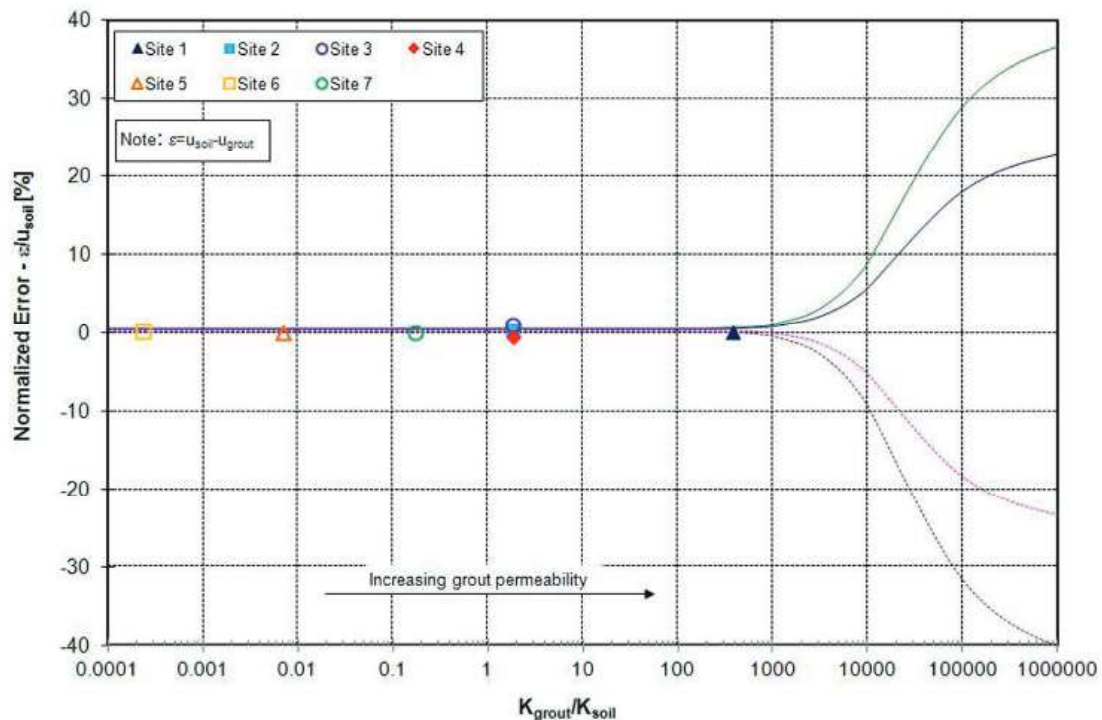


Abb.5 Auftretender Messfehler bei zunehmenden Quotienten aus Durchlässigkeit der Suspension und des umgebenden Bodens [Contreras et al. 2012]

5. 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.

5.1. PROBENHERSTELLUNG

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

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

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. Augenscheinlich beschädigte Proben wurden verworfen.

5.2. VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

Für die Untersuchung von dynamischen Druckverhältnissen wurde ein Versuchsaufbau mit regelbarem Wasserdruck und mehreren Gebern verwendet (Abb. 6). Dieser umfasst:

- **Datenlogger** vom Typ SISGEO ADK 100, 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.
- **Druckzelle** bestehend aus einem 3 mm starkem Plexiglaszylinder, 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.
- **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).

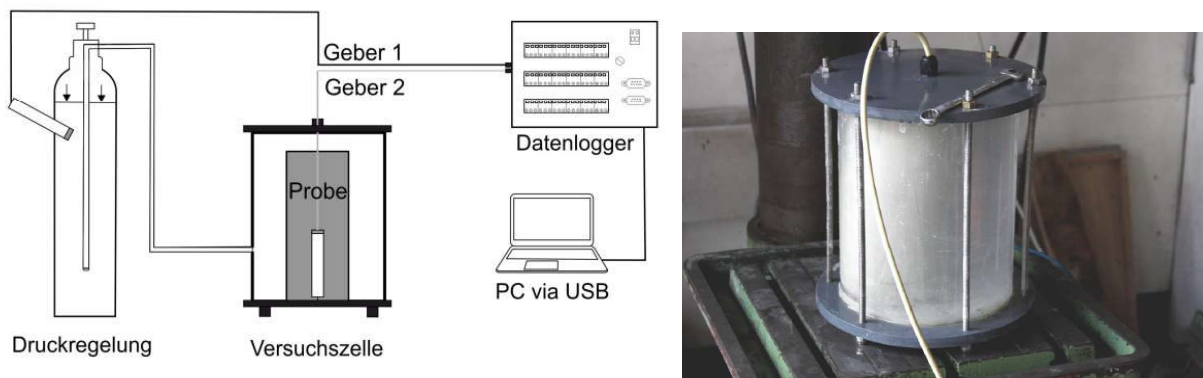


Abb.6 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (li.), eingebaute Probe (re.).

5.3. 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 Außendruck von ca. 150 kPa nur ein Anstieg von etwa 20 kPa beobachtet werden. 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.

Das Abbinden der Suspension und die Lagerung der Probe erfolgten nach diesen ersten Erfahrungen 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, wie in Abb. 7 beispielhaft dargestellt.

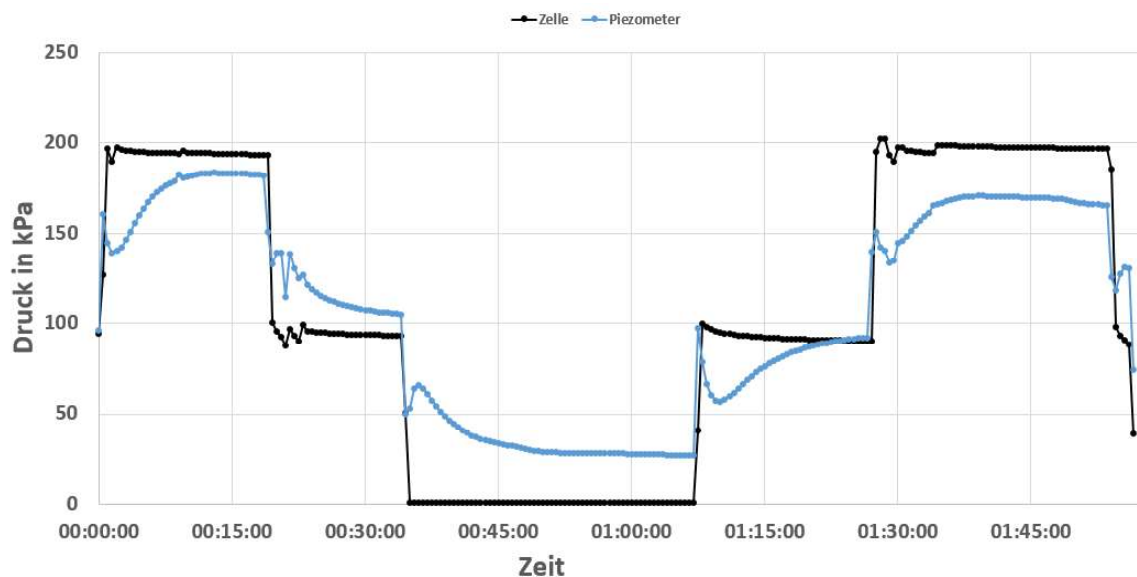


Abb. 7 Stark verzögerte Reaktion von Probe P05: Kein vollständiges Erreichen des Außendrucks über einen Zeitraum von knapp zwei Stunden

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 vgl. Abb. 8).

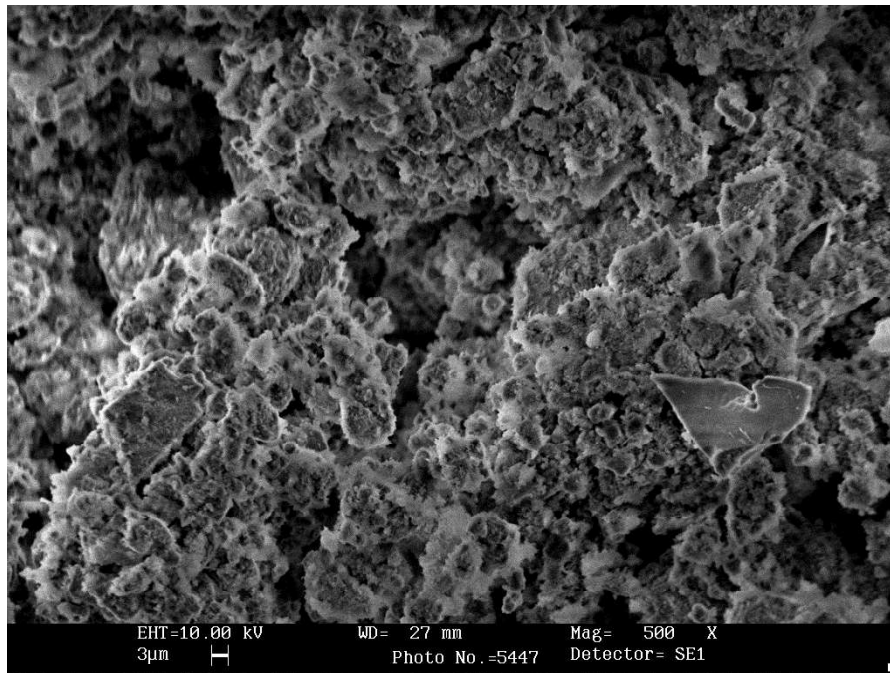


Abb. 8 REM-Aufnahme der handelsüblichen Bohrloch-Fertigmischung mit 500-facher Vergrößerung

Daraufhin wurde von der Verwendung der Fertigmischung abgesehen und ein Portlandzement - Bentonit-Gemisch verwendet. Die resultierende Kurve (Abb. 9) zeigt auf Druckveränderungen zwischen 0 und 200 kPa eine sofortige Reaktion. Ein asymptotisches Verhalten nahe 0 kPa ist nicht vorhanden.

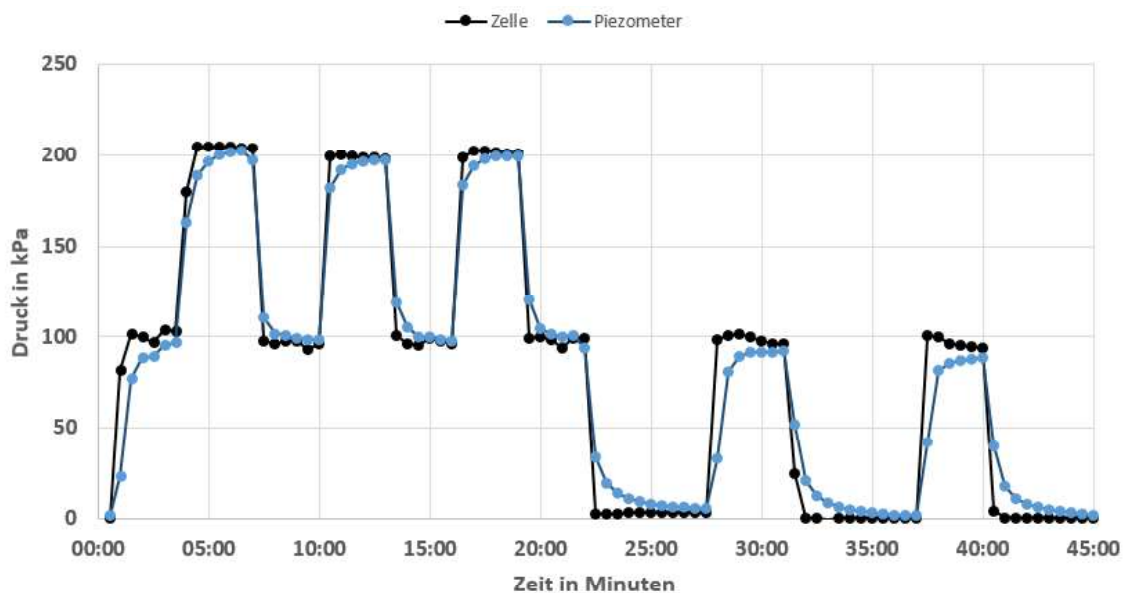


Abb. 9 Kurvenverlauf Zement-Bentonit - Suspension. Sofortiges Ansprechverhalten auf Druckänderungen.

Mehrere Versuchsdurchläufe mit zwei weiteren Proben ähnlicher Rezeptur zeigten vergleichbare Reaktion auf Druckänderungen im untersuchten Druckbereich 0 – 200 kPa. Der time-lag lag jeweils im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten, was für eine Anwendung im Feld völlig ausreichend ist. Die zwei verwendeten Typen von Schraubfiltern erwiesen sich für die fully-grouted-Methode als gleichermaßen geeignet und hatten keinen Einfluss auf den time-lag.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Elektrische Porenwasserdruckgeber (PWD) haben sich zur Erfassung von Porenwasserdrücken im Bauwerks- und Geomonitoring bereits bewährt. Trotz der großen geräte- und messtechnischen Fortschritte der letzten Jahre erfolgt der eigentliche Einbau dieser meist noch in Tradition mit dem klassischen Standrohr nach Casagrande mittels Dicht- und Filterstrecke. Diese Art des Ausbaus ist mit einer Anzahl von Problemen behaftet.

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 Ausbau 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 Bohrlochsuspension einen gewissen Anteil quellfähiger Tonminerale, speziell wohl Montmorillonit enthalten sollte. Obwohl beide Arten von Ausbaumedien ähnliche Durchlässigkeiten aufweisen, unterscheiden sich die experimentellen Ergebnisse deutlich. Es ist denkbar, dass der zugefügte Bentonit durch seine dreidimensionale Struktur die mechanischen Eigenschaften 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 längst zuffällt.

LITERATUR

- Contreras, I.A., Grosser, A.T., Ver Strate, R.H. (2008): The use of the fully-grouted method for piezometer installation. *Geotechnical News*, 26 (2): 30–40.
- 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
- Dunnicliff, J. (1993): *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*.
- DVGW – Merkblatt: Bau von Grundwassermessstellen (2012)

- Marefat M., Chapuis R.P., Duhaime, F., (2014): Piezometric error for fully grouted piezometers Installed in clay layers. Geo Regina 2014.
- McKenna, G.T. (1995): Grouted-in installation of piezometers in boreholes. Canadian Geotechnical Journal, 32: 355–363.
- Mikkelsen, P.E. 2002. Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments. Geotechnical News, 20(4): 38-42.
- Mikkelsen, P.E., Green, G.E. (2003): Piezometers in fully grouted boreholes. Proc. Sixth Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics. Oslo, Norway.
- Mikkelsen, P.E., Slope Indicator Co. (2000): Istalling Piezometers - The Fully-Grouted-Method: <http://www.slopeindicator.com/support/piezometers/technote-grout-in-piezo-papers.php> (abgerufen am 10.09.2016)
- 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.
- Simeoni, L. (2012): Laboratory tests for measuring the time-lag of fully grouted piezometers. Journal of Hydrology, 438–439: 215–222.
- Vaughan, P.R. 1969. A note on sealing piezometers in boreholes. Géotechnique, 19(3): 405-413.