

Untersuchung der Filtrationsprozesse zwischen Verfüllsuspension und Untergrund in Erdwärmesondenbohrungen

**Dipl.-Ing. Tim Lutz¹, Dipl.-Ing. Mathieu Riegger¹, M.Sc. Julian Rolker¹, B.Sc. Yannick Reduth¹,
Dipl.-Ing. (FH)/Dipl.-WirtschaftsIng. (FH) Alfred Weinmann²**

**¹Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische
Energiesysteme**

²ESIOMConsulting

Keywords: Erdwärmesondenbohrung, Verfüllqualität, Filtration, Druck, Fehlstelle, Verfüllsuspension

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhaben QEWS II (Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II) wird die Interaktion der Verfüllsuspension für Erdwärmesondenbohrungen mit dem umgebenden Untergrund untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung des Filtrationsverhaltens und dessen Einfluss auf die Entwicklung bzw. Vermeidung von Qualitätsmängeln. Dazu werden Versuche durchgeführt, welche auf Aspekte wie Visualisierung, Verhalten bei verschiedenen Drücken oder möglichst reale Randbedingungen abzielen. Hierzu wird ein drei bis sechs Meter langer Großversuch entwickelt. Die bereits in einigen Labor- und kleineren Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse lassen Vermutungen zum realen Verhalten des Baustoffs im Untergrund zu, wobei diese noch durch die Großversuche bestätigt werden müssen. Demnach tritt eine Wasserabgabe und Filterkuchenbildung im Bohrloch sehr wahrscheinlich auf, wenn die Bohrung in einem wasserdurchlässigen Untergrund erstellt wird. Eine allgemeine Aussage lässt sich dabei jedoch noch nicht treffen, da die auf dem Markt verfügbaren Baustoffe in ihrer Zusammensetzung und in ihrem Verhalten sehr unterschiedlich sind. Zur Ermittlung der Versuchsrandbedingungen wurde zudem der real in einer Bohrung vorliegende Druck während einer Verfüllung gemessen.

1. Einleitung

Bereits in den vorangegangenen Forschungsvorhaben EWSplus (Riegger, 2013) und EWS-tech (Riegger et al., 2016) wurde die Verfüllqualität von 6 und 30 m tiefen zerstörungsfrei rückbaubaren Erdwärmesonden (EWS) untersucht. In den hierfür entwickelten Versuchsaufbauten wurden jeweils undurchlässige Kunststoffrohre zur Formung der Bohrlochwandung verwendet, womit durchgehend undurchlässige Untergrundformation nachgebildet wurden. Bei den auf diese Weise durchgeführten Versuchen konnten unter anderem Qualitätsmängel der Verfüllung (Fehlstellen, Aufstiegskanäle) beobachtet werden, die durch eine dichtegetriebene Entmischung der Verfüllsuspension und das damit verbundene „Ausbluten“ von Wasser aus der Verfüllsuspension verursacht wurden.

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhaben QEWS II wird aufbauend auf den beschriebenen Versuchen untersucht, wie sich die Interaktion der Verfüllsuspension mit dem Untergrund auf die Verfüllqualität auswirkt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt hierbei auf Filtrationsprozessen. In einer vorangestellten Diplomarbeit wurden hierzu die theoretischen Grundlagen erarbeitet (Lutz, 2018). Die nachfolgend beschriebenen Versuche sollen zur Klärung der Frage beitragen, welche Filtrationsprozesse im Sinne einer Wasserabgabe aus der Suspension stattfinden und welche Folgen (vermutlich) daraus zu erwarten sind. Diese reichen von einer Reduzierung der Fehlstellen durch die Abgabe überflüssigen Wassers bis zu einer Vermehrung durch Sackungen in Folge eines Volumenverlustes im Bohrloch.

Treibende Kraft der Filtrationsvorgänge in Erdwärmesondenbohrlöchern ist dabei der in der Verfüllsuspensionssäule vorliegende Druck.

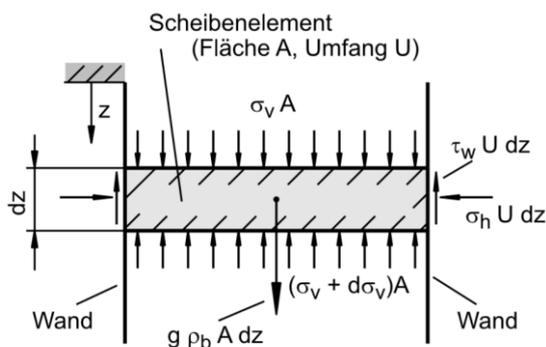
2. Suspensionsdruckmessungen in realen Bohrlöchern

Um mögliche Filtrationsvorgänge in einem Bohrloch verstehen, versuchstechnisch untersuchen und deren Auftreten und Ausprägung bei verfüllten Erdwärmesonden abschätzen zu können, ist die Kenntnis des tatsächlich vorliegenden Suspensionsdrucks im Bohrloch bzw. des Druckverlaufs während und nach einer Verfüllung erforderlich. Derzeit liegen noch keine derartigen Messdaten in einer Erdwärmesondenbohrung vor. Eine direkte Messung zum tatsächlich vorliegenden Druck ist nötig, da es sich bei einer Verfüllsuspension um ein rheologisch komplexes Fluid handelt. Es muss überprüft werden, ob der Ansatz des hydrostatischen Drucks zutreffend ist, oder ob der tatsächlich auftretende Druck durch Reibungseffekte innerhalb der Suspension und mit der umgebenden Bohrlochwand vermindert wird.

Dieser Überlegung liegen verschiedene Modelle zu Grunde, mit der die Suspension beschrieben werden kann. Diese gilt es auf ihre Anwendung hin zu überprüfen.

Zum einen kann die Baustoffsuspension als feststoffbeladene Flüssigkeit betrachtet werden. Die enthaltenen Partikel interagieren dabei nicht untereinander. Die Weiterleitung des Drucks erfolgt allein durch die Komprimierung der Flüssigkeit, in diesem Fall das Anmachwasser. Der herrschende Druck entspricht dabei dem hydrostatischen Druck.

Zum anderen steigt jedoch mit zunehmender Filtration und Hydratation des Bindemittels im Baustoff der Feststoffgehalt in der Suspension pro Volumenelement. Der Kornkontakt innerhalb der Suspension als auch mit der Bohrlochwand nimmt zu. In Folge dessen können Druckkräfte durch die Reibung des Korngerüsts mit der Außenwandung möglicherweise von dieser aufgenommen werden. Der tatsächlich vorliegende Suspensionsdruck ist in diesem Fall kleiner als der hydrostatische Druck. Dieses Phänomen ist unter dem Begriff „Silodruck“ bekannt (Abbildung 1) (Schulze, 2009).



$$\sigma_v \infty = \sigma_v(z \rightarrow \infty) = \frac{g \rho_b A}{\lambda \tan \varphi_x U}$$

$$\text{mit } \lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \text{ und } \tan \varphi_x = \frac{\tau_w}{\sigma_v}$$

σ_v	...	Vertikalspannung [Pa]
σ_h	...	Horizontalspannung [Pa]
τ_w	...	Scherspannung [Pa]
g	...	Erdbeschleunigung [m/s ²]
ρ_b	...	Dichte des Baustoffs [kg/m ³]
A	...	Querschnittsfläche Bohrloch [m ²]
λ	...	Horizontallastverhältnis [-]
φ_x	...	Wandreibungswinkel [°]
U	...	Umfang Bohrloch [m]

Abbildung 1: Vertikalspannung σ_v am Scheibenelement im Siloschaft („Silodruck“)

Die Schwierigkeit bei der Anwendung der Silodruckberechnung besteht in der Instationarität der Konsistenz der Suspension sowie in der Bestimmung der Parameter Horizontallastverhältnis λ und Wandreibungswinkel φ_x in Folge der Abgabe von Wasser während einer Filtration und durch die Hydratisierung bzw. das Ansteifen der Suspension. Das Filtratwasser wird dabei anfänglich stärker abgegeben und sondert sich den Haft- und Druckverhältnissen (Dipol-Adhäsion, Van-der-Waals-Kräfte, Kapillarspannung u.a.) entsprechend ab, während das Ansteifen erst nach ca. zwei Stunden

einsetzt. Für die betrachteten Verfüllbaustoffe sind keine Werte für das Horizontallastverhältnis oder den Wandreibungswinkel bekannt.

2.1. Tiefenbestimmung des Suspensionsdrucksensors

Um einen ersten Eindruck des Druckverlaufs in der Suspension bei der Verfüllung einer Erdwärmesondenbohrung zu gewinnen und dadurch Rückschlüsse auf das zutreffende Modell zu erlangen, wurde mit Unterstützung der Firma Burkhardt GmbH eine Druckmessung in einer realen Bohrung vorgenommen. Dazu wurde ein Suspensionsdrucksensor bei Einbau des Sondenrohbündels an diesem befestigt (Abbildung 2) und in eine Tiefe von ca. 45 m (Abbildung 3) eingebaut, die mit Hilfe der auf den Sondenrohren angebrachten Metrierung bestimmt wurde. Die Gesamtlänge der Bohrung betrug 200 m.

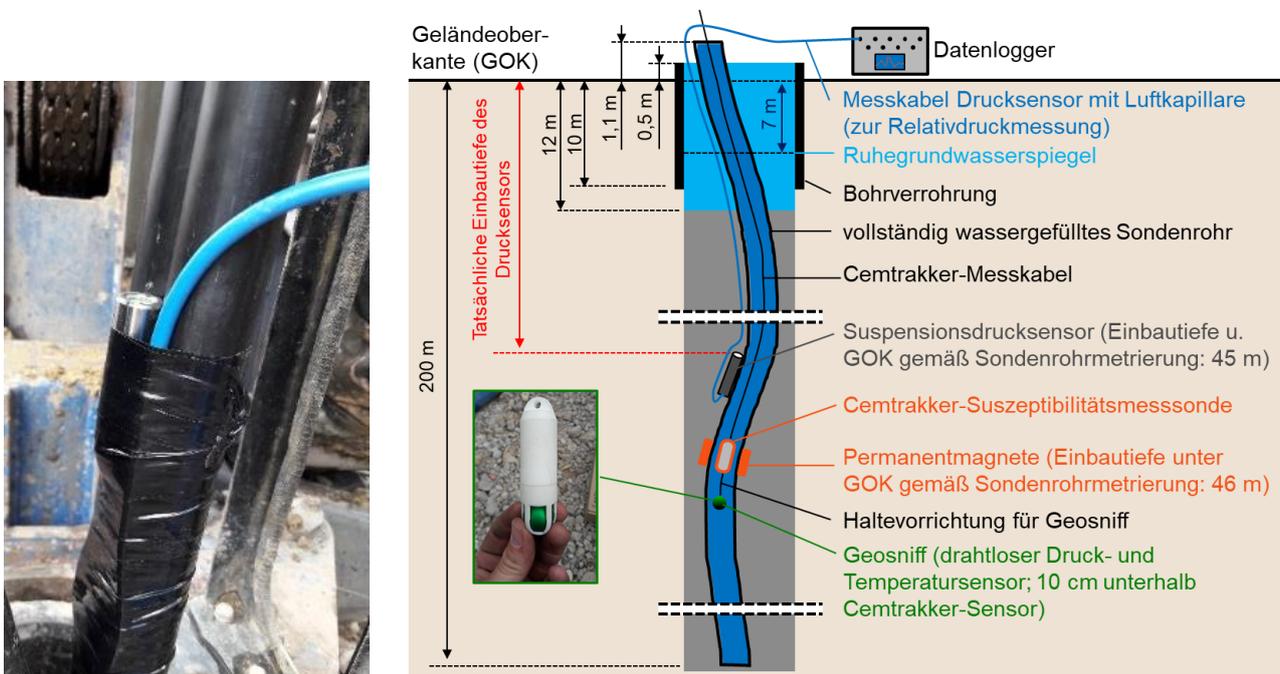


Abbildung 2: Einbau des Suspensionsdrucksensors mit Membran nach oben

Abbildung 3: Messkonfiguration der Bohrung in Metzgingen (nicht maßstäblich; aus Vereinfachungsgründen ist lediglich das für die Bestimmung der tatsächlichen Einbautiefe des Drucksensors relevante Sondenrohr dargestellt)

Da eine Bohrung nicht immer absolut vertikal verläuft und da die Sondenrohre i.d.R. im Bohrloch verdrillt sind (Riegger, 2013) kann die mit Hilfe der Sondenrohrmetrierung bestimmte Einbautiefe des Suspensionsdrucksensors von dessen tatsächlicher vertikaler Einbautiefe abweichen. Um mit der Suspensionsdruckmessung überprüfen zu können, ob der hydrostatische Druck zur Beschreibung des Druckregimes in der Suspension geeignet ist, ist jedoch die Kenntnis der tatsächlichen vertikalen Einbautiefe des Drucksensors von zentraler Bedeutung.

Zur Feststellung dieser Position wurden die magnetische Suszeptibilitätsmessung des CemTrakkers, vier außen am Sondenrohr angebrachte Permanentmagnete und der drahtlose Minidrucksensor GEOsniff genutzt (Abbildung 3). Die Permanentmagnete befinden sich gemäß Sondenrohrmetrierung 1 m unterhalb des Suspensionsdrucksensors. CemTrakker und GEOsniff wurden einige Tage nach der Verfüllung verbunden an einem Strang in einem Abstand von 10 cm in das Sondenrohr hinabgelassen, an dem sich die Permanentmagnete befinden. Der CemTrakker misst die magnetische Suszeptibilität der außerhalb des befahrenen Sondenrohrs befindlichen Materialien, der GEOsniff den hydrostatischen Druck innerhalb des vollständig wassergefüllten Sondenrohrs. Die Messkette aus CemTrakker und GEOsniff wurde so tief in das Sondenrohr abgesenkt, bis die

Permanentmagnete mit dem CemTrakker detektiert wurden. Dies war möglich, da sich die magnetische Suszeptibilität in der Tiefe der Magnete ca. um den Faktor -20 von der magnetischen Suszeptibilität des eingesetzten Verfüllbaustoffs unterscheidet. Aus der Druckmessung des GEOsniffs in dieser Tiefe und den geometrischen Randbedingungen (Überstand des Sondenrohrs über GOK, Einbauabstand zwischen GEOsniff und Suspensionsdrucksensor) konnte auf diese Weise die tatsächliche vertikale Einbautiefe des Suspensionsdrucksensors zu 44,3 m bestimmt werden.

2.2. Messdaten der Verfüllung

Neben dem Druck im Bohrloch wurden während der Verfüllung mit einem Coriolis-Messgerät die Dichte und der Volumenstrom der eingebrachten Suspension gemessen, außerdem auch der Verfülldruck an der Druckseite der Verpresspumpe,. Da die verwendete Verfüllsuspension laut Datenblatt eine Dichte von 1,94 kg/l aufweisen sollte, wurde unter Berücksichtigung möglicher geringfügiger Überschreitungen die Obergrenze des Messbereichs der Dichte mit 2,1 kg/l festgelegt. Weist die tatsächliche Dichte einen höheren Wert auf, wurde dennoch ein Wert von 2,1 kg/l erfasst.

Abbildung 4 zeigt die während des Verfüllvorgangs erfassten Messwerte. Nachfolgend werden anhand des im Bohrloch gemessenen (Suspensions-)Drucks die verschiedenen Phasen der Verfüllung erläutert.

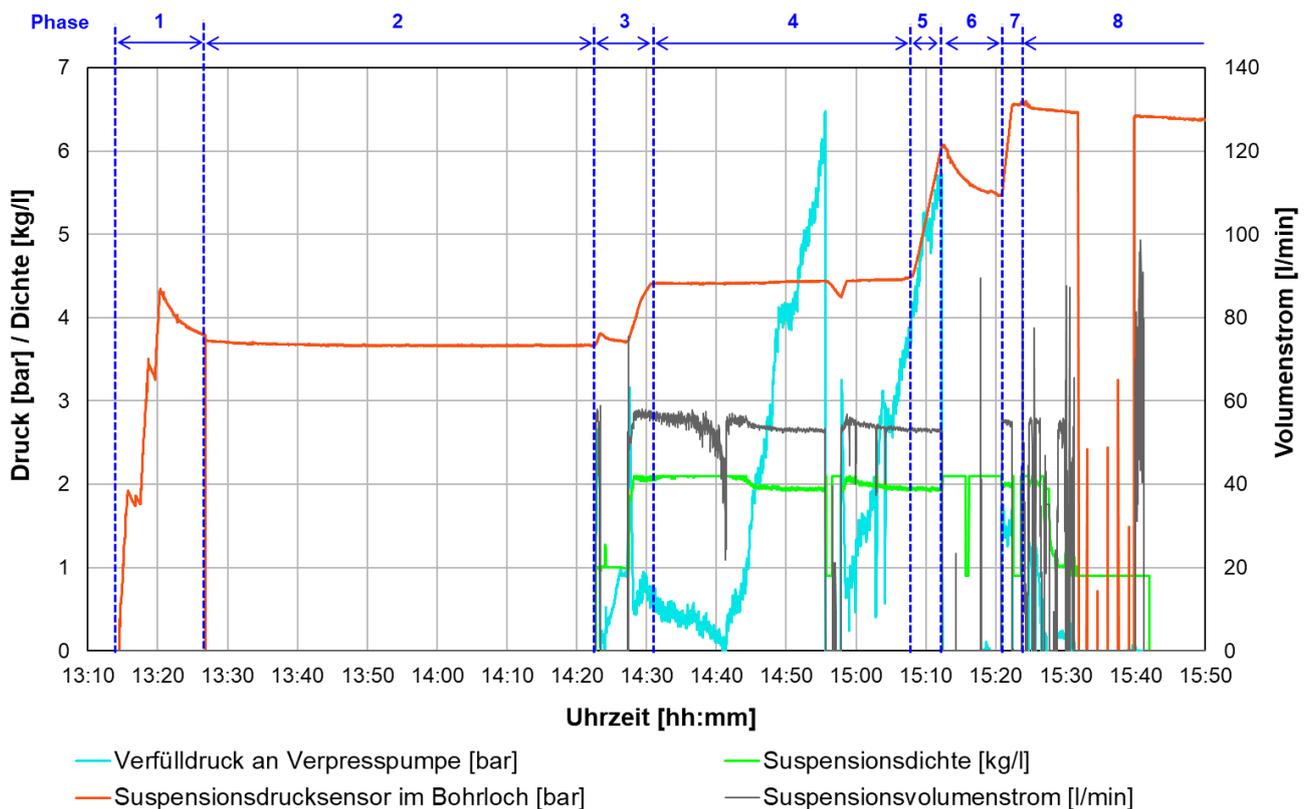


Abbildung 4: Messdaten der Erdwärmesondenbohrlochverfüllung in Metzingen vom 12.07.2018

① 13:14 - 13:27 Uhr: Einbringen der Sondenrohrs ins Bohrloch. Das im Bohrloch vorhandene Grundwasser wird verdrängt und sinkt nach Erreichen der finalen Einbautiefe wieder auf die Höhe des Ruhegrundwasserspiegels ab.

② 13:27- 14:22 Uhr: keine Aktivität am Bohrloch. Aus dem gemessenen Druck von 3,66 bar kann ein Grundwasserstand von 37,3 m über dem Drucksensor ermittelt werden. Aus der vertikalen

Einbautiefe des Drucksensors von 44,3 m ergibt sich daraus ein Ruhegrundwasserspiegel von 7 m u. GOK.

③ 14:22 - 14:31 Uhr: Test (14:22 Uhr) und Start (14:27 Uhr) der Verfüllung im Kontraktorverfahren mit dem unteren Verpressrohr, das knapp oberhalb der Bohrlochsohle endet. Die Suspension steigt im Bohrloch nach oben und verdrängt dabei das im Bohrloch befindliche Wasser nach oben. Um 14:31 Uhr erreicht der Wasserspiegel die Oberkante der Bohrverrohrung und fließt aus dem Bohrloch.

④ 14:31 - 15:08 Uhr: Die Verfüllung schreitet voran. Der Suspensionspiegel befindet sich noch immer unterhalb des Drucksensors, sodass eine konstant hohe Wassersäule auf den Drucksensor wirkt, im Mittel 4,43 bar. Um 14:55 Uhr endet die Verfüllung über das untere Verpressrohr und es wird nach einer kurzen Unterbrechung ab 14:58 Uhr über das obere Verpressrohr verfüllt, dessen Auslass sich in ca. 100 m Tiefe befindet. Während der kurzen Verfüllunterbrechung fällt der mit dem Suspensionsdrucksensor gemessene Wert kontinuierlich ab. Wahrscheinlich beginnt das gegenüber dem Rundgrundwasserspiegel um ca. 7,5 m höher stehende Grundwasser sogleich in eine durchlässige Untergrundschicht abzufließen.

⑤ 15:08 - 15:12 Uhr: Die Suspension erreicht um 15:08 Uhr den Drucksensor. Der Druck am Sensor beginnt deutlich und linear anzusteigen. Um 15:12 Uhr erreicht der Druck ein lokales Maximum von 6,04 bar. Die Suspension steht nun gemäß CemTrakker-Verfüllprotokoll ca. 12 m u. GOK im Bohrloch. Üblicherweise würde die Verfüllung auch im Tiefenbereich der Verrohrung so lange fortgesetzt werden, bis die oben aus dem Bohrloch austretende Suspensionsdichte der Dichte der eingebrachten Suspension entspricht. Anschließend wird im Regelfall die Bohrverrohrung gezogen. Im vorliegenden Fall ist allerdings ein Ziehen der Bohrverrohrung ohne eine Unterbrechung der Verbindung zwischen Suspensionsdrucksensor und Datenlogger (Abbildung 3) nicht möglich. Um eine vollständige Datenerfassung sicherzustellen wurde auf das Ziehen der Bohrverrohrung verzichtet und das Bohrloch wurde stattdessen im ersten Schritt lediglich bis unterhalb der Bohrverrohrung verfüllt. Damit wird eine Zementation der Bohrverrohrung vermieden und deren späterer Rückbau sichergestellt.

⑥ 15:12 - 15:21 Uhr: Während der zwischenzeitlichen Verfüllunterbrechung ist erneut ein direkt nach Ausschalten der Verfüllpumpe beginnender kontinuierlicher Abfall des Drucks zu verzeichnen. Wahrscheinlich fließt hier erneut Fluid in die umgebende Formation ab.

⑦ 15:21 – 15:23 Uhr: Nach Beendigung der Verfüllung im Kontraktorverfahren wird mit einem von oben ins Bohrloch eingeschobenen Verfüllschlauch noch etwas Suspension ins Bohrloch gegeben. Diese Verfahrensweise soll eine genauere Dosierung des Suspensionsvolumens ermöglichen und damit sicherstellen, dass die Bohrverrohrung nicht mit eingegossen wird und ziehbar bleibt. Hierbei wird der Maximalwert am Drucksensor erreicht: 6,6 bar.

⑧ ab 15:23 Uhr: Nach Erreichen des Maximaldruckwertes sinkt der Druck nicht wieder so stark ab wie zuvor in Phase 4 und 6 beobachtet. Wahrscheinlich wurde das durchlässige System, in welches zuvor das Wasser abfloss, abgedichtet. Die Druckmessung wurde noch vier weitere Tage fortgeführt. Während dieser Zeit sinkt der gemessene Druck langsam und stetig ab. Bei Beendigung der Messung am 16.07.2018 um 07:51 Uhr betrug der gemessene Druck ca. 3 bar. Nach dem Ende der Druckmessung konnte die Bohrverrohrung gezogen werden. Die nachfolgende vollständige Verfüllung des Bohrlochs wurde durch Firma Burkhardt GmbH mit dem CemTrakker dokumentiert.

Für die Bewertung dieser ersten Druckmessung in einem realen Erdwärmesondenbohrloch bleibt festzuhalten, dass die Interpretation der Messdaten und hierbei insbesondere des erreichten Maximalwerts von 6,6 bar durch die gegebenen Randbedingungen erschwert wird:

Die Dichte der am Verfüllende um 15:23 Uhr im Tiefenbereich von ca. 12 bis 44,3 m u. GOK befindlichen Suspension ist nicht bekannt, da eine eventuell vorhandene Durchmischungszone aus Verfüllsuspension und Grundwasser bedingt durch die messtechnischen Anforderungen nicht aus dem Bohrloch verdrängt werden konnte (s. Erläuterung in Phase 5). Möglicherweise liegt außerdem

auch im Tiefenbereich oberhalb von ca. 12 m u. GOK eine teilweise oder vollständige Durchmischungszone vor. Zudem wies die Dichte der eingebrachten Verfüllsuspension auffällig große Unterschiede auf (Werte zwischen 1,93 und 2,1 kg/l) und erreichte mit 2,1 kg/l das obere Ende des eingestellten Messbereichs, so dass die tatsächliche Suspensionsdichte ggf. noch höher war.

Trotz der genannten Interpretationsschwierigkeiten kann festgehalten werden, dass der lineare Druckanstieg während des Verfüllvorgangs in Phase 5 typisch ist für eine hydrostatische Druckzunahme. Das Vorliegen einer hydrostatischen Drucksteigerung ist auch in verwandten Fachbereichen bekannt (Ertinghausen, 1965). Es ist zu vermuten, dass die langsame, kontinuierliche Druckabnahme nach Verfüllende in Phase 8 auf das Aushärten des Verfüllbaustoffs zurückzuführen ist.

Für weiterführende und allgemeingültigere Aussagen sind weitere Messungen mit unterschiedlichen Randbedingungen (verschiedene Einbautiefen des Drucksensors, verschiedene Untergrundformationen und Verfüllbaustoffe) notwendig. Zur Vermeidung der beschriebenen Interpretationsschwierigkeiten bei zukünftigen Messungen muss die Bohrverrohrung im Zuge des zu beobachtenden Verfüllvorgangs gezogen werden und das Bohrloch muss bis zur Geländeoberkante mit einer Suspension einheitlicher Dichte verfüllt werden. Um dies zu ermöglichen, wird bei zukünftigen Messungen an Stelle des verwendeten Datenloggers (Abbildung 3) ein Minidatenlogger zur Aufzeichnung der Druckmesswerte eingesetzt, der obertägig an den Sondenrohren angebracht werden kann und durch seine geringe Größe und seine große Robustheit ein Ziehen der Bohrverrohrung während der Datenaufzeichnung ermöglicht.

3. Laborversuche

Im Rahmen einer umfangreichen labormesstechnischen Charakterisierung zahlreicher auf dem Markt erhältlicher Baustoffe wurden u.a. Filtrationsversuche mit einer Filterpresse nach DIN 4127 durchgeführt. Diese Charakterisierungen dienten dazu, die Bandbreite der Filtrationseigenschaften marktüblicher Erdwärmesondenverfüllbaustoffe mit einem einfachen Verfahren zu ermitteln.

Für eine detaillierte Untersuchung des Filtrationsverhaltens sind die Filtrationsversuche nach DIN 4127 hingegen nicht geeignet. So traten auf Grund des geringen Volumens an Verfüllsuspension in der Filterpresse von 312 ml sehr oft und schnell sogenannte „Durchbläser“ auf. Dabei bilden sich nach der Abgabe des maximal abfiltrierbaren Filtratvolumens Wegsamkeiten für Luft durch den Filterkuchen. Die nach DIN 4127 nötigen 7,5 min Filtrationszeit konnten so nur für wenige Verfüllbaustoffe erreicht werden.

Zudem wird bei den Filtrationsversuchen nach DIN 4127 der Untergrund durch das Filterpapier und die kleine Filtratwasser-Auslassöffnung nicht realistisch wiedergegeben. So ist eine Übertragung der Ergebnisse in die Realität fragwürdig. Eine Visualisierung des Filtrationsvorganges ist mit der Filterpresse ebenso nur sehr eingeschränkt möglich. Lediglich eine Betrachtung des Filterkuchens nach dessen Ausbau aus der Filterpresse erlaubt einen visuellen Eindruck des Filtrationsprozesses.

Zur Behebung dieser genannten Einschränkungen wurden daher im Hinblick auf die Visualisierung des Filtrationsprozesses ein „Kastenversuch“ (Abbildung 5) und zur weitergehenden Analyse eine Filtrationszelle (Abbildung 6) entwickelt. Diese sollen der Schaffung eines ersten Prozessverständnisses dienen und die Grundlage für die Entwicklung eines Großversuchs bilden. Der Kastenversuch ermöglicht den Einbau verschiedener Untergrundmaterialien und Verfüllbaustoffe. Diese können anschließend mit bis zu einem bar Druck beaufschlagt werden. Eine oben aufgebrachte Plexiglasscheibe ermöglicht die Beobachtung des Filtrationsprozesses wie zum Beispiel das Eindringen des Filtrats in den Untergrund. Danach kann die Platte wieder abgenommen und das „Bohrloch“ optisch analysiert werden. Die Filtrationszelle ermöglicht darüber hinaus quantifizierte Aussagen zum Filtrationsverhalten bei verschiedenen Drücken (Abbildung 7) und von verschiedenen Baustoffen (Abbildung 8), außerdem kann die Durchlässigkeit des entstehenden Filterkuchens bestimmt werden.



Abbildung 5: Kastenversuch zur Visualisierung des Filtrationsverhaltens von Erdwärmesondenverfüllsuspensionen (links: Einfüllen von Formation und Suspension; rechts: Filterkuchen nach Druckbeaufschlagung mit 1 bar Druck)

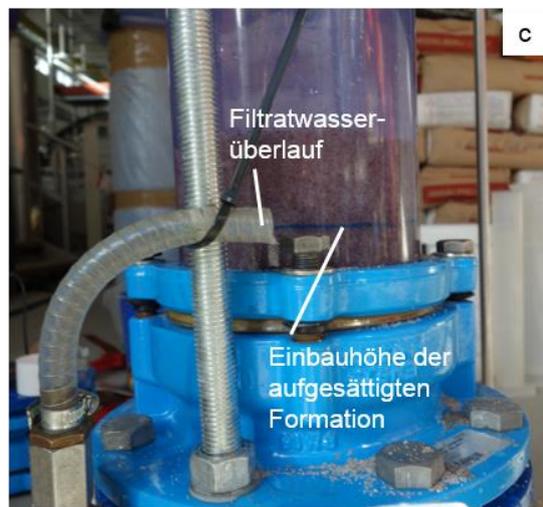


Abbildung 6: Entwickelte Filtrationszelle:

a: Aufbau der Zelle mit Druckluftanschluss und Drucksensor

b: eingebaute Sandformation (Bild stammt aus Probeversuch mit nicht besandetem Druckrohr)

c: Vermeidung von Gravitationseinflüssen auf die ermittelte Filtratwassermenge durch Angleichung der Höhen der eingebauten, aufgesättigten Formation und des Filtratwasserablaufs (oberhalb der Einbauhöhe der Formation ist die Besandung des Druckrohrs erkennbar)

d: Suspensionsspiegelabsenkung und Filtratwasserbildung bei einem Filtrationsversuch

e: Klar definierte Grenzfläche zwischen Filterkuchen und Formationsand nach Ausbau des Versuchs

In der Filtrationszelle wurden bisher Versuche mit vier handelsüblichen Baustoffen (A, B, C, D) und Sand als Filtrationsmedium durchgeführt (Lutz, 2018). Der bei diesen Versuchen verwendete Feinsand besitzt eine Durchlässigkeit von ca. $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und bildet damit eine sehr durchlässige Untergrundformation ab. Versuche mit einem gering durchlässigen Filtrationsmedium werden derzeit noch durchgeführt. Aus den mit Sand als Untergrundformation durchgeführten Versuchen (Abbildung 7 und 8) lassen sich erste Tendenzen zum Filtrationsverhalten von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen ableiten:

- Es ist die Bildung eines Filterkuchens zu beobachten, welcher sich in seiner Konsistenz deutlich von der Suspension unterscheidet.
- Allgemein folgt die Filtratwasserabgabe dem \sqrt{t} - Filtrationsmodell. Die Durchlässigkeiten der entstehenden Filterkuchen liegen im Bereich von 10^{-8} m/s (Lutz, 2018).
- Mit zunehmendem Druck wird die Filtratwasserabgabe verstärkt (Abbildung 7). Es bestätigt sich, dass der wirkende Druck die treibende Kraft der Filtration ist.
- Eine nennenswerte Penetration von Suspensionspartikeln in die Feinsandformation war bei keinem der durchgeführten Filtrationsversuche erkennbar (Abbildung 6 e).

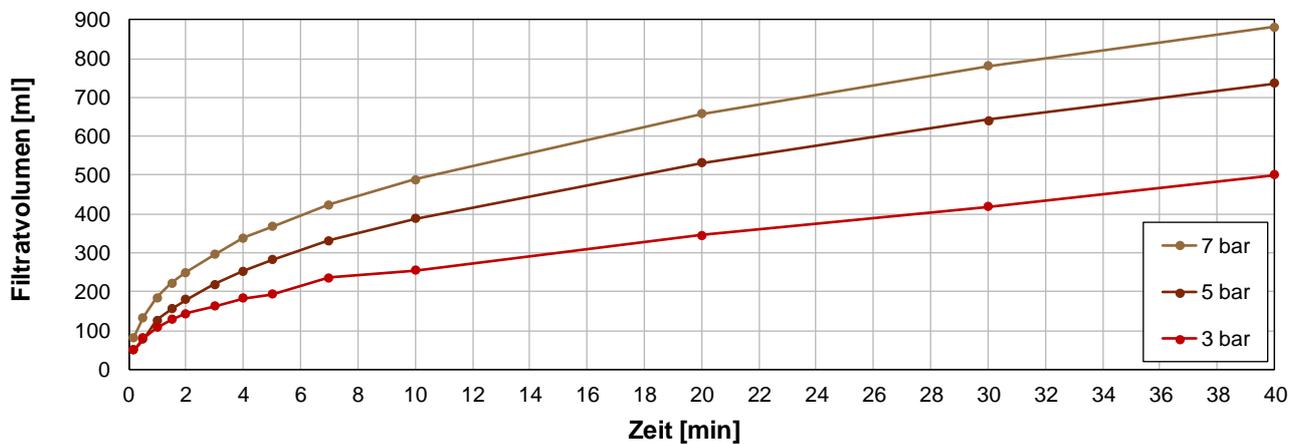


Abbildung 7: Mit der Filtrationszelle ermittelte Filtrationskurven von Baustoff A bei 3, 5 und 7 bar.

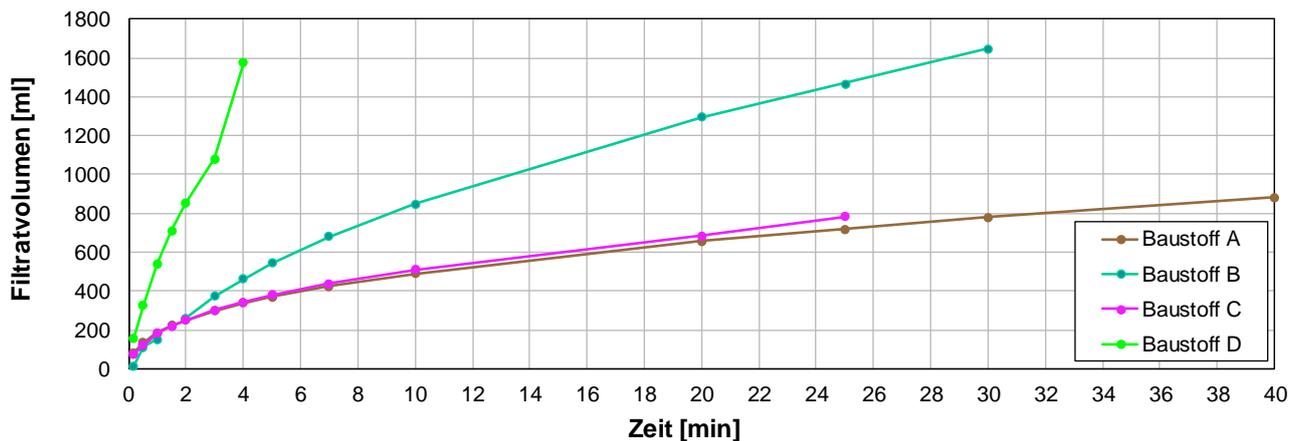


Abbildung 8: Mit der Filtrationszelle ermittelte Filtrationskurven der Baustoffe A, B, C und D bei 7 bar. (Bei Filtrationsdauern von weniger als 40 Minuten kam es zu Ausbläsern.)

Neben den erwähnten Gemeinsamkeiten der Filtrationsversuche lassen sich im Verhalten verschiedener Baustoffe erhebliche Unterschiede feststellen. In Abbildung 8 ist die Filtratwasserabgabe der vier untersuchten Verfüllbaustoffe bei einem Druck von 7 bar über die Zeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich sowohl das abgegebene Filtratwasservolumen als auch der

Verlauf der Filtrationskurven stark unterscheiden. Je nach Baustoff bilden sich zudem verschieden mächtige Filterkuchen unterschiedlich schnell aus. Dabei lässt sich kein direkter Zusammenhang zur Menge des abgegebenen Filtratwassers herstellen. Je nach Baustoff wird dieses unterschiedlich stark zurückgehalten. Dabei zeigt sich auch dieses Verhalten individuell. Ein Zusammenhang zwischen dem Wasser/Feststoff-Verhältnis der Suspensionen und der Filterkuchenbildung ist nicht erkennbar.

Die Erkenntnisse aus den Filtrationszellenversuchen sind zwar weitaus aussagekräftiger als diejenigen aus den Versuchen mit der Filterpresse, dennoch liegen noch Abweichungen zu den Bedingungen in der Realität vor. So wurde zur Bestimmung verschiedener Parameter und um die Versuche in der Filtrationszelle untereinander vergleichbar zu machen während eines Versuches jeweils mit einem konstanten Druck gearbeitet. Dies entspricht nicht den tatsächlichen Druckbedingungen während der Verfüllung einer Erdwärmesondenbohrung, da sich in der Bohrung der Druck im Verlauf des Verfüllvorgangs sukzessive erhöht (Abbildung 4 Phase 5). Zudem ist der Strömungsweg in der Filtrationszelle ein anderer als bei der Filtration im realen Bohrloch. In der Filtrationszelle ist der Druckgradient axial abwärtsgerichtet, das Filterkuchenwachstum ist dem entgegen gerichtet und nach oben hin unbeschränkt. Im Bohrloch wirkt der Druck zwar ebenso von oben, die Filtrationsfläche ist jedoch im Gegensatz zur Filtrationszelle nicht horizontal, sondern vertikal ausgerichtet. Im Bohrloch kommt es zu einem Anwachsen des Filterkuchens in Richtung der Bohrlochmitte, wodurch sich die Filtrationsfläche im Gegensatz zur Filtrationszelle mit fortschreitender Filtration verringert. Dadurch ist im Bohrloch das Filterkuchenwachstum räumlich eingeschränkt. Die Versuche in der Filtrationszelle konnten also vereinfacht aufzeigen, wie Filtrationsprozesse von Erdwärmesondenverfüllsuspensionen ablaufen und damit wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung des Großversuchsstandes liefern. Bei diesem sollen die genannten Einschränkungen der Filtrationszelle beseitigt und die Versuchsrandbedingungen noch besser an die Realität angenähert werden.

4. Großversuche

4.1 Versuchsaufbau

Aufbauend auf den vorhergehenden Laborversuchen wurde ein mehrschaliger, bis maximal 7 bar druckstabiler Großversuchsaufbau entwickelt, mit dem ein 3 bis 6 m tiefes EWS-Bohrloch in einer künstlichen Formation nachgebildet werden kann (Abbildung 9). Ziel war es, einen Versuchsaufbau zu entwickeln, der für verschiedene Formationen den gleichen Aufbau aufweist und dabei jeweils eine Messung der abgegebenen Filtratwassermenge ermöglicht. Zur Nachbildung einer durchlässigen Formation wird wie bei den zuvor durchgeführten Laborversuchen ein Feinsand genutzt. Um eine undurchlässige Formation nachzubilden wird anstelle des Feinsandes ein Tiefbohrzement nach API Class G eingesetzt. Die größte Herausforderung bei der Entwicklung des Versuchsaufbaus stellte die Herstellung des standfesten und druckbeständigen radialen Aufbaus dar.

In das erstellte EWS-Bohrloch des Versuchsaufbaus können EWS-Rohre eingebracht werden. Danach wird das Bohrloch mit Verfüllsuspension verfüllt und am druckdicht verschlossenen Bohrlochkopf sukzessive mit steigendem Druck beaufschlagt, so dass dadurch der Anstieg des Drucks der Verfüllsuspensionssäule in einem tieferen Bohrloch nachgebildet wird. Der Maximaldruck von 7 bar wird für eine definierte Zeit beibehalten. Während des gesamten Versuchs wird die Menge des aus der anfangs gesättigten Formation austretenden Filtratwassers gemessen. Die Bewertung der Versuche erfolgt auf Basis des zeitlichen Verlaufs der ermittelten Filtratwassermenge und der Qualität der ausgehärteten Verfüllung, die nach dem Aushärten des Baustoffs und dem nahezu zerstörungsfreien Rückbau der Erdwärmesonde analysiert wird.

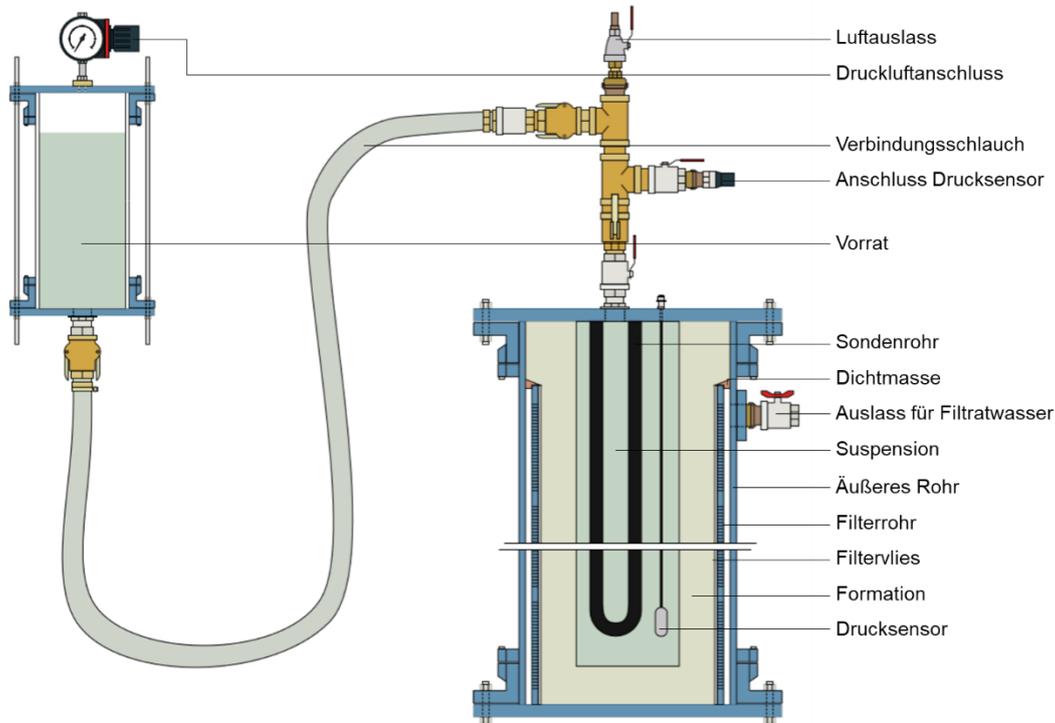


Abbildung 9: Großversuchsaufbau zur Untersuchung des Filtrationsverhaltens von EWS-Verfüllbaustoffen

4.2 Vorversuche mit Sand als umgebendem Untergrund

Vorversuche in künstlichen „Bohrlöchern“ mit einer Versuchslänge von 1 m, in denen aus Vereinfachungsgründen noch keine Sondenrohre eingebaut waren, haben gezeigt, dass der entwickelte Versuchsaufbau geeignet ist die Mechanismen des Filtrationsverhaltens zu untersuchen. Das „Bohrloch“ konnte stabil erzeugt, verfüllt und mit Druck beaufschlagt werden.

In Abbildung 10 ist der in zwei Vorversuchen ermittelte zeitliche Verlauf der Filtratwasserabgabe von zwei Baustoffen bei unterschiedlichen Drücken dargestellt. Die ermittelten Filtrationskurven weisen analog zu den Filtrationszellenversuchen (Abbildung 7 und 8) Verlaufsunterschiede auf.

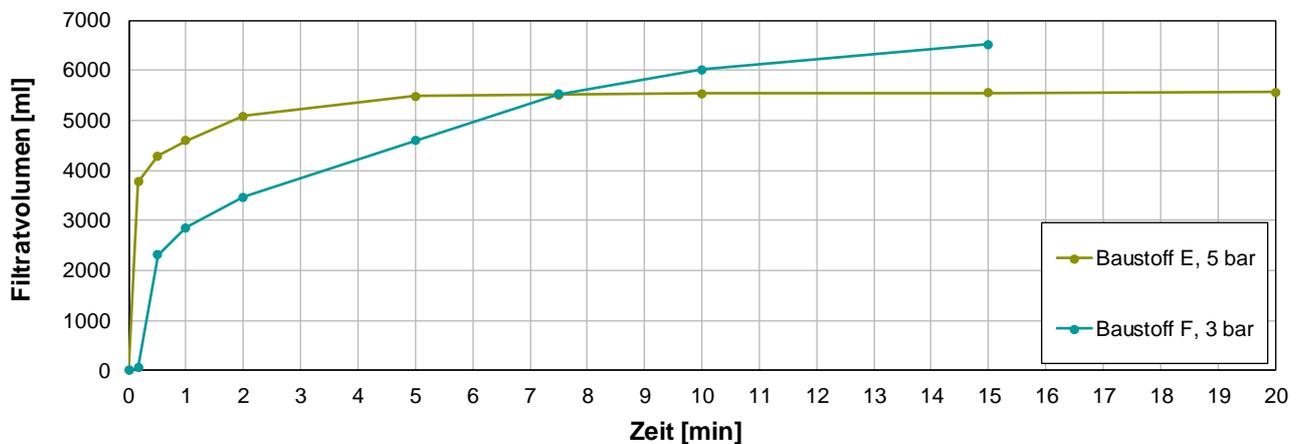


Abbildung 10: Mit Vorversuchen (1 m Versuchslänge) in dem Großversuchstand ermittelte Filtrationskurven für verschiedene Baustoffe und Drücke

Analog zu den Filtrationszellenversuchen war auch bei den Vorversuchen mit 1 m Länge nach Versuchsende (d.h. nach einer Filtrationsdauer von ca. 15 bis 30 min) die Ausbildung eines Filterkuchens deutlich erkennbar. Während bei den Filtrationszellenversuchen der Filterkuchen an einer ebenen Fläche entstand, bildete sich der Filterkuchen bei den Vorversuchen an der Bohrlochwandung, wobei sich im Zentrum des Bohrlochs noch unfiltrierte Suspension befand (Abbildung 11 a). Bei der Analyse der ausgehärteten Verfüllkörper der Vorversuche (Abbildung 11 b) konnten jedoch mit bloßem Auge keine optischen Unterschiede zwischen dem ausgehärtetem Filterkuchen und der ausgehärteten, unfiltrierten Suspension festgestellt werden.



Abbildung 11: Bilder von Vorversuchen mit einer Versuchslänge von 1 m und einer Druckbeaufschlagung von 3 bar (a: Bildung eines Filterkuchens an der Bohrlochwandung; b: freigelegter, ausgehärteter Verfüllkörper nach Filtration)

Allerdings stellt die Messung des Eindringwiderstandes mit dem Nadelpenetrometer eine Möglichkeit der weitergehenden Analyse dar (Blum, Steger, Ergüler, 2013). Mit dieser bisher nur testweise eingesetzten Analysemethode konnten in radialer Richtung Unterschiede entlang des Bohrlochquerschnitts festgestellt werden (Abbildung 12).

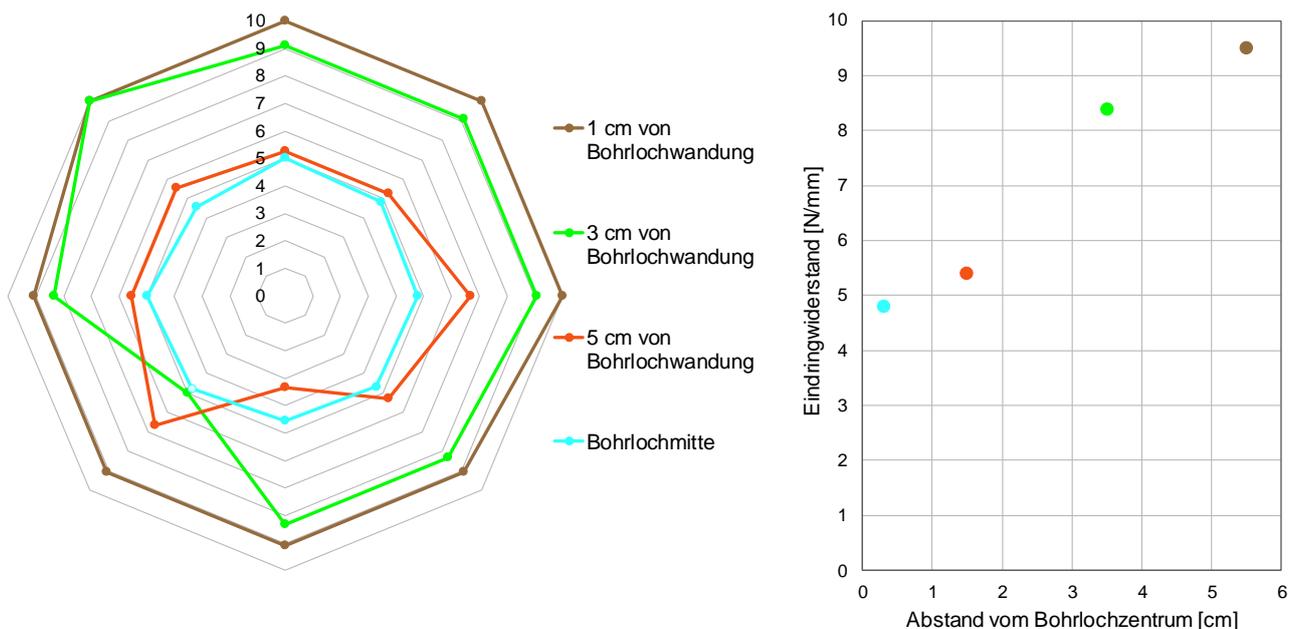


Abbildung 12: Exemplarische Ergebnisse der Bestimmung des Eindringwiderstandes mittels Nadelpenetrometer für einen Vorversuch mit 1 m Länge und Sand als Formation (links: Eindringwiderstand über Querschnitt; rechts: gemittelter Eindringwiderstand für verschiedene Abstände zum Bohrlochzentrum)

Daraus lässt sich ableiten, dass das Verfüllmaterial an der Bohrlochwandung härter ist, was wahrscheinlich auf die Ausbildung eines Filterkuchens in Folge einer Filtration zurückzuführen ist. Partikel haben sich dort angereichert, verdichtet und so ein engeres Gefüge geschaffen. Für fundiertere Aussagen sind weitere Messungen an verschiedenen Proben geplant.

Zusammenfassend konnte mit den durchgeführten Vorversuchen bestätigt werden, dass der entwickelte Großversuchsaufbau die Möglichkeit zur realitätsnahen Untersuchung des Filtrationsverhaltens von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen bietet und in der Lage ist, die für unterschiedliche Randbedingungen (verschiedene Formationen, Drücke, Verfüllsuspensionen) resultierenden Unterschiede im Filtrationsverhalten und in den Eigenschaften des ausgehärteten Baustoffs aufzuzeigen.

5. Ausblick

Insgesamt sind in dem Forschungsvorhaben QEWS II 10 Filtrations-Großversuche mit einer Länge von je 3 bis 6 m geplant. Dabei sollen die Aspekte Untergrund, Baustoff und Einfluss der Sondenrohre untersucht werden. Eine Übersicht der geplanten Versuche ist in Tabelle 1 dargestellt. Parallel sollen Referenzversuche in wasserundurchlässigen Rohren als „Bohrlöcher“ durchgeführt werden, um eine Vergleichbarkeit mit den bisher in derartigen Rohren durchgeführten Versuchen aus den Projekten EWSplus sowie EWS-tech I & II zu ermöglichen.

Tabelle 1: Geplantes Versuchsprogramm

<u>Versuch</u>	<u>Baustoff</u>	<u>Formation</u>	<u>Sondenrohre</u>
1	1	Sand	ohne
2	1	Sand	mit
3	1	Zement	ohne
4	1	Zement	mit
5	2	Sand	ohne
6	2	Sand	mit
7	2	Zement	ohne
8	2	Zement	mit
9	1	Wechselagerung	mit
10	2	Wechselagerung	mit
Referenz	1	keine (wasserundurchlässiges Rohr)	mit
Referenz	2	keine (wasserundurchlässiges Rohr)	mit

Im nächsten Schritt erfolgt die Durchführung eines Filtrations-Großversuchs mit 6 m Länge mit Sand als umgebender Formation (Versuch 1 aus Tabelle 1).

Bei den Vorversuchen mit Zement als Formation konnten bereits erfolgreich standfeste Bohrlöcher hergestellt und verfüllt werden (Abbildung 13 a und b). Allerdings muss derzeit noch an einer Lösung zur Dehnungsbehinderung des Filterrohrs (Abbildung 9) auf Grund der Innendruckbelastung während der Versuchsdurchführung gearbeitet werden. Damit soll die bei Vorversuchen mit Zement als Formation beobachtete Rissbildung in dem Zementformationskörper verhindert werden (Abbildung 13 c).



Abbildung 13: Zement zur Nachbildung einer gering durchlässigen Formation (a: Bohrlochwandung aus Zement; b: Längsschnitt durch das verfüllte Bohrloch; c: Rissbildung in der Zementformation auf Grund der Innendruckbelastung)

Quellenangaben

Blum, P., Steger, H., Ergüler, Z. (2013). *Bestimmung geotechnischer Parameter von Tonsteinen mit dem Nadelpenetrometertest*. In: Tagungsband „19. Tagung für Ingenieurgeologie“ S. 343-346. München.

Ertinghausen, H. (1965). *Über den Schalungsdruck von Frischbeton*. Technische Hochschule Braunschweig, Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau (Hrsg.). Heft 5. Braunschweig

Lutz, T. (2018). *Filtrationsverhalten von zementösen Baustoffen bei der Verfüllung von Erdwärmesondenbohrungen*. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Fluidbergbau (Hrsg.). Diplomarbeit. Freiberg (Sachsen).

Riegger, M. (2013). *EWSplus - Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden (Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik)*. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens EWSplus. Stuttgart.

Riegger, M., Rolker, J., Steger, H., Stober, I., Haist, M., Eckhardt, J.-D., Schlager, P., Zemann, M., Zorn, R., Huttenloch, P. (2016). *EWS-tech: Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie*. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens EWS-tech. Förderkennzeichen L75 13004 bis L75 13007. Stuttgart.

Schulze, D. (2009). *Pulver und Schüttgüter*. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88449-1>

Steinbeis Innovation gGmbH, Solites, Tim Lutz, Meitnerstr. 8, 70563 Stuttgart
lutz@solites.de