

Verpressungen in der oberflächennahen Geothermie – Qualitätssicherung im Feld und im Labor

Hauke Anbergen^{1,2}, Clemens Lehr^{1,3}, Jens Frank², Lutz Müller⁴ und Ingo Sass¹

¹ Technische Universität Darmstadt, ² KED Ingenieure, ³ Geotechnik Lehr,

⁴ Hochschule Ostwestfalen-Lippe

Keywords: Qualitätssicherung, Verpressung, Erdwärmesonden, Feld- und Laboruntersuchungen

Zusammenfassung

Die Qualitätssicherung der Hinterfüllung von Erdwärmesonden (EWS) bei oberflächennahen Geothermiebohrungen wird nach wie vor diskutiert. Einschlägige Richtlinien und Anweisungen befinden sich derzeit in der Überarbeitung und Fachausschüsse beraten über neue Überwachungsmethoden. Es gibt eine Vielzahl an Messverfahren, welche einerseits den Hinterfüllvorgang in situ und als Echtzeitüberwachung nachverfolgen, und andererseits die Hinterfüllbaustoffe im Labor auf deren Baustoffeigenschaften wie z.B. den Widerstand gegen zyklische Frost-Tau-Belastungen testen sollen.

Bei dem Prüfverfahren spielen Ort, Zeitpunkt, Ausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensszenarios eine wichtige Rolle. In diesem Beitrag werden Prüfverfahren für Feld- und Laboruntersuchungen vorgestellt. Für diese Messverfahren werden neben den theoretischen Grundlagen, auch die Anwendung in der Praxis sowie Untersuchungsergebnisse präsentiert, bewertet und kritisch diskutiert. Weiterhin werden Gründe für die Entstehung von Schadensfällen dargestellt. An Beispielen wird erläutert, wie diese Messverfahren zu einer Qualitätssteigerung beitragen können. In diesem Zusammenhang werden neben Baustellenmessungen, wie Dichte- und Viskositätsbestimmung, Druck- und Volumenaufzeichnung die in dieser Arbeit angewendeten Laborversuche an ausgehärteten Hinterfüllbaustoffen im Hinblick auf Druckfestigkeit, Durchlässigkeit und Frost-Tau-Wechselwiderstand dargestellt. Dabei werden die theoretischen Grundlagen und umfangreiche Messergebnisse aus der Praxis beleuchtet.

1. Einleitung

Aufgrund einiger Schadensfälle ist die Qualitätssicherung bei der Errichtung von EWS in den Fokus der Öffentlichkeit und der Wissenschaft gerückt. Neben der fachmännischen Abteufung der Bohrung wird ein besonderes Augenmerk auf die Hinterfüllung der Erdwärmesonden gelegt. Die Hinterfüllung ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht von großem Interesse und jede EWS in Deutschland muss gemäß VDI-Richtlinie 4640 (2001) hinterfüllt werden. Dabei hat die Hinterfüllung neben dem thermischen Anschluss der Sonde an das Gebirge so beschaffen zu sein, dass die Bohrung grundwasserstauende Schichten zuverlässig abdichtet. Dementsprechend ist der Qualitätsüberwachung der Hinterfüllarbeiten und –materialien ein hoher Stellenwert zugewiesen. In diesem Zusammenhang muss geklärt werden wie und wann es zu einem Schadensfall kommen kann. Typische Schadensszenarien im Zusammenhang mit der Hinterfüllung sind hier zusammengefasst.

Bei signifikanter Gebrigsdurchlässigkeit (durch Klüfte oder große Porosität):

- Ausspülen der Hinterfüllung durch fließendes Grundwasser bevor der Baustoff aushärten kann.
- Abfließen von Hinterfüllsuspension in das Gebirge und Bildung von Hohlräumen in Teilbereichen der Hinterfüllsäule der Bohrung.

Bei artesischen Verhältnissen oder großen Druckpotenzialunterschieden von durchörterten Grundwasserstockwerken:

- Vertikalumläufigkeiten im Bohrloch nach Ausspülen der noch nicht ausgehärteten Hinterfüllmasse durch drückendes Grundwasser.

Weiterhin können bereits Schäden beim Bau der EWS entstehen:

- Schädigung der Sonde durch mechanische Einwirkung während des Einbaus.
- Schädigung der EWS durch das Ineinanderbohren benachbarter Bohrungen.
- Schädigung der Sonde durch Druckeinwirkung während des Hinterfüllvorgangs (Druckverformung).
- Schädigung der Sonde durch geologische Gegebenheiten (z.B. Deformation durch einen durchörterten Horizont quellfähiger Tone)

Da alle vorgehend genannten Szenarien der Hinterfüllungsschädigung erst nach einer zunächst erfolgreichen Hinterfüllung eintreten, ist eine Messung im Bohrloch während des Hinterfüllens im Hinblick auf eine fehlstellenfreie Hinterfüllung im Endzustand weitestgehend aussagefrei.

Laboruntersuchungen müssen den spezifischen Anforderungen der Hinterfüllung angepasst sein, wenn sie zu einer Überwachung der Qualität beitragen sollen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Aussagekraft solcher Untersuchungen maßgeblich von der Übertragbarkeit auf den Praxisfall abhängt. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf zementhaltige Hinterfüllbaustoff-Fertigmischungen. Auf reine Ton-Dichtungen (z. B. quellfähige Pellets, Bentonit-Suspensionen) wird nicht eingegangen.

2. Feldmessungen mit automatisierter Datenerfassung

Durch eine automatisierte kontinuierliche Messung von Dichte, Volumenstrom und Druck während des Hinterfüllvorgangs, kann die Qualität der Bauausführung lückenlos dokumentiert werden. Durch Interpretation der Messdaten können zusätzlich Schlüsse auf die geologischen Gegebenheiten im Umfeld der Bohrung (z.B. Klüfte) gezogen werden.

Um das Sondenrohr lückenlos einzubetten, werden die Bohrungen einer EWS im Kontraktorverfahren verfüllt. Hierbei wird das Bohrloch meist über einen verlorenen Schlauch oder seltener ein ziehbares Hohlgestänge von unten nach oben verfüllt. Das Grundwasser wird aus dem Bohrloch verdrängt und der Hohlraum im Ringraum um den Sondenstrang durch die Hinterfüllsuspension ausgefüllt. Ist die Hinterfüllung erfolgreich, sind die Sondenrohre allseitig von Suspension umschlossen. Die Hinterfüllung verteilt sich durch die statische Last um die Sonde und dichtet den Ringraum hydraulisch ab. Allen Baustoffmischungen ist gemein, dass nur durch ein diskretes Wasser/Baustoff-Verhältnis die Eigenschaften des Baustoffs gewährleistet sind. Dies kann über die Dichte der Hinterfüllsuspension bei ihrer Einbringung in den Untergrund überwacht werden. Das am Bohrlochmund austretende Hinterfüllmaterial muss zum Ende des Hinterfüllvorganges die gleiche Dichte aufweisen, wie das Ursprungsmaterial, welches vom Bohrlochtiefsten in den Ringraum verbracht wurde. Durch kann sichergestellt werden, dass das Material nach Abschluss des Hinterfüllvorganges in durchgehend gleicher Beschaffenheit den Ringraum ausfüllt.

Der Druck wird durch Druckaufnehmer gemessen. Durch ein frequenzabhängiges Messverfahren können Dichte und Volumenstrom in einer einzigen Messung bestimmt werden. Hierbei wird ein Messrohr elektromagnetisch zur Resonanzschwingung angeregt. Die Eigenresonanzfrequenz ist

vom Volumen und Dichte der angeregten Masse abhängig. Grundlage für das Messverfahren ist das zweite Newton'schen Gesetz (Hering et al., 2012).

$$\vec{F} = M * \vec{a} \quad (1)$$

\vec{F}	Kraft [N]
M	Masse [kg]
\vec{a}	Beschleunigung [m/s ²]

Die Schwingung des Rohrs kann über die Eigenkreisfrequenz ω beschrieben werden. Sie beschreibt die Phase (Position) eines periodisch ablaufenden Vorgangs. Eine Periode entspricht 2π . Die Eigenkreisfrequenz ist eine Systemkonstante mit der Frequenz f bzw. Periodendauer T .

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

ω	Eigenkreisfrequenz [s ⁻¹]
π	Pi
f	Frequenz [s ⁻¹]
T	Periodendauer [s]

Wird ein Massestrom durch das oszillierende System geleitet, entsteht eine durch die Erdrotation induzierte masseproportionale Gegenkraft, die senkrecht zur Fließrichtung wirkt.

$$F_c = 2Mv\omega \quad (3)$$

F_c	Gegenkraft [N]
M	Masse [kg]
v	Geschwindigkeit [m s ⁻¹]
ω	Eigenkreisfrequenz [s ⁻¹]

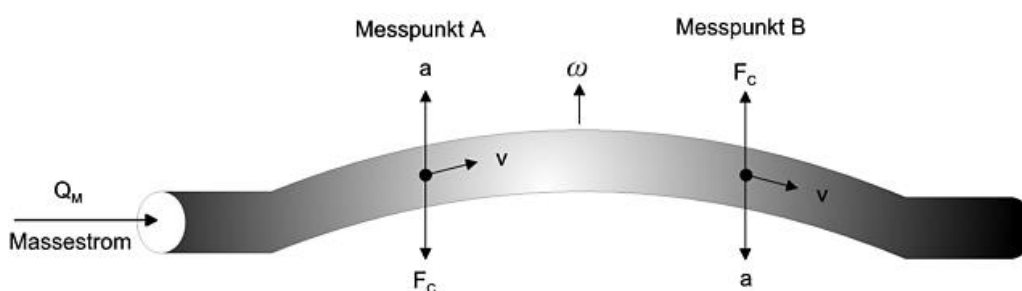


Abb. 1: Ein mit der Eigenkreisfrequenz ω angeregtes Rohr wird mit dem Massestrom Q_M durchströmt. Durch die Beschleunigung a und die Gegenkraft F_c wird die Eigenfrequenz moduliert. Hierdurch kommt es zu einer Phasenverschiebung. Diese kann durch zeitgleiche Messung der Auslenkung des Messrohrs an unterschiedlichen Punkten gemessen, sowie der Massestrom berechnet werden.

Die Resonanzfrequenz des Systems ist proportional der Masse M (ein System mit der Masse 1 kg hat eine höhere Eigenresonanzfrequenz als eines mit der Masse 2 kg). Da das Volumen des Systems temperaturabhängig ist, wird die Temperatur zur Kompensation mit erfasst. Mit bekannter

Temperatur hat das Rohr ein bekanntes Volumen. Somit kann die Dichte aus der masseabhängigen Eigenresonanz bestimmt werden.

Für die mathematische Herleitung kann die Gleichung für ein schwingendes Feder-Masse-System verwendet werden.

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{c_R}{M_{ges}}} \quad (4)$$

ω	Eigenkreisfrequenz [s ⁻¹]
π	Pi
f	Frequenz [s ⁻¹]
c_R	Federkonstante [N m ⁻¹] (Rohrmaterialabhängiger Proportionalitätsfaktor)
M_{ges}	Systemmasse [kg] ($M_{ges} = M_{Suspension} + M_{Rohr}$).

Die Masse der Suspension ist gleich dem Produkt aus Volumen des Messrohrs und der Dichte der Suspension.

$$M_{Suspension} = V_R * \rho \quad (5)$$

$$V_R = A * L \quad (6)$$

V_R	Volumen des Messrohrs [m ³]
A	Querschnittsfläche des Messrohrs [m ²]
L	Länge des Rohrs [m]
ρ	Dichte [kg/l]

Führt man die Beziehungen zusammen und löst nach ρ auf, erhält man nach Subtrahieren des Dichteanteils des Rohrs an der Gesamtdichte, die Dichte der Suspension.

$$\rho_{Suspension} = \frac{c_R}{4\pi^2 V_R} T^2 - \frac{M_{Rohr}}{V_R} \quad (7)$$

$\rho_{Suspension}$	Dichte der Suspension [kg/l]
c_R	Federkonstante [N m ⁻¹] (Rohrmaterialabhängiger Proportionalitätsfaktor)
π	Pi
V_R	Volumen des Messrohrs [m ³]
M_{Rohr}	Masse des Rohrs [kg]
T	Periodendauer [s]

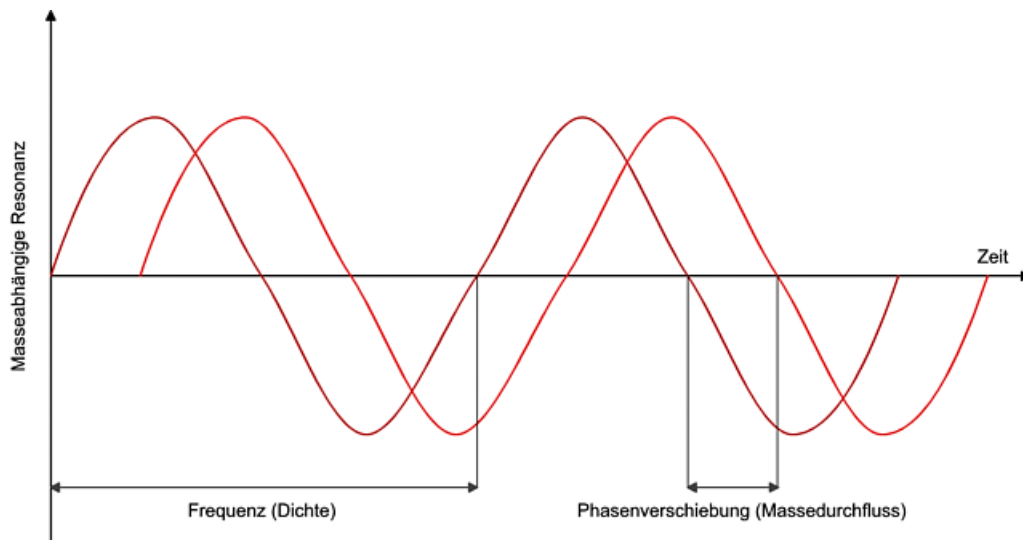


Abb. 2: Bestimmung von Massedurchfluss und Dichte aus der Eigenresonanz des Messrohrs.

Da Dichte und Massestrom durch die Messung bestimmt werden können (Abb. 2), lässt sich zusätzlich der Volumenstrom errechnen. Die Abbildung 3 zeigt eine Messung eines Hinterfüllvorganges mit automatisierter kontinuierlicher Aufzeichnung von Druck, Dichte und Volumenstrom (Auflösung 0,5 Sekunden).

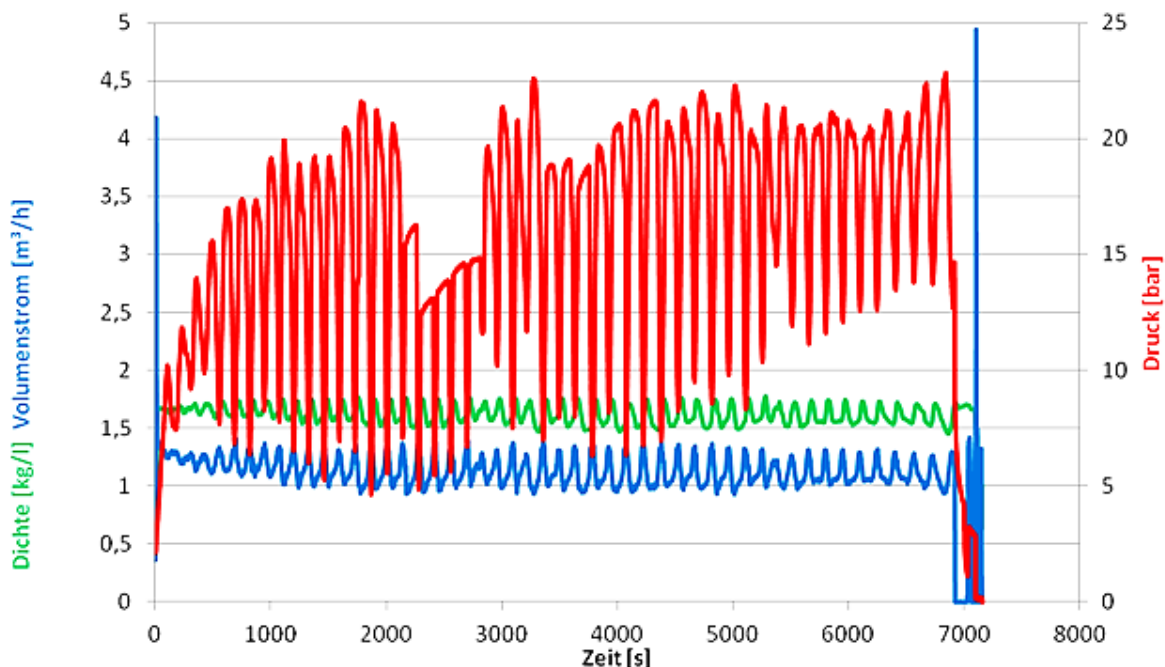


Abb. 3: Messung an einem Durchlaufmischer.

Durch einen zu klein dimensionierten Füllschlauch erzeugt die Reibung der Suspension im Füllrohr einen impulsartigen Hinterfüllvorgang. Dies wirkt sich auf die Zusammensetzung der Suspension aus, da der Mischer bei stark verändertem Füll-Vordruck das Mischungsverhältnis Baustoff/Wasser nicht konstant halten kann. Auch wenn die Mindestanforderung der vom Hersteller angegebenen

Dichte (W/F-Wert) eingehalten wurde, ist deutlich zu erkennen, dass neben den Baustoffeigenschaften die technische Umsetzung des Hinterfüllvorganges von großer Bedeutung ist.

3. Laboruntersuchungen

3.1 Allgemeines

Im Labor ist grundsätzlich zwischen dort und im Feld gewonnenen Proben zu unterscheiden. Nachfolgend wird ausschließlich auf die Untersuchung von im Labor hergestellten Proben eingegangen. Durch Untersuchungen im Labormaßstab können Erkenntnisse über das Materialverhalten der Baustoffe im fließfähigen, als auch im erhärteten Zustand gewonnen werden. Dabei ist zu beachten, dass die entscheidenden Versuchsrandbedingungen eingehalten werden, um die Vergleichbarkeit zum Realmaßstab sicherzustellen. Bei der Errichtung von Erdwärmesonden kommen unterschiedliche Mischverfahren für die Baustoffsuspensionen in Frage, welche sich maßgeblich in der Mischintensität und damit in den in die Suspensionen eingeleiteten inneren Scherkräften unterscheiden. Die meisten Baustoffe sind sowohl für eine Anmischung mit Kolloidalmischer, als auch für Schneckenmischer geeignet. Letztere arbeiten in der Regel mit Drehzahlen in einem Bereich von 300 Umdrehungen pro Minute. Da die Hinterfüllbaustoffe auch bei diesen Umdrehungszahlen die vorgegebenen Materialkennwerte/ -anforderungen erreichen müssen, sollte bei einer Prüfung im Labor mit ähnlichen Umdrehungszahlen während der Anmischung gearbeitet werden. Idealerweise sollten die oben genannten Baustellenmischgeräte verwendet werden. Dies stellt jedoch (insbesondere bei der Prüfung kleinerer Mengen) einen zu hohen Aufwand dar. Die Anwendung eines Labormischers mit definierten Umdrehungszahlen und Rühraufsätzen ist unter bestimmten Voraussetzungen ebenso möglich. Da es sich bei den Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden i.d.R. um zementhaltige Mischungen handelt, ist bei Versuchen am abgebundenen Hinterfüllbaustoff der Hydratationsfortschritt mit einzubeziehen. Dieser wird neben der Abbindezeit, maßgeblich durch die Wasserverfügbarkeit sowie dem Temperaturniveau beeinflusst.

Je nachdem, welche Randbedingungen in-situ vorherrschen, sollte das Abbindeumgebung des zu prüfenden Hinterfüllbaustoffes angepasst werden. Für eine allgemeingültige Prüfung müssen jedoch auf der sicheren Seite liegende Randbedingungen gewählt werden. Daher wurden folgende Durchführungsanweisungen eingehalten:

Mischverfahren

Die Hinterfüllsuspensionen werden mit genau den vom Hersteller vorgegebenen Wasser/Feststoff-Werten angemischt. Für den Anmischungsvorgang wird ein Labormischer mit Wendelquirl verwendet, bei dem die Umdrehungszahl eingestellt werden kann. Rheologische Untersuchungen haben gezeigt, dass mit diesem Verfahren die vom Hersteller angegebenen und im Feld auftretenden Suspensionskennwerte erreicht werden können. Somit wird die Übertragbarkeit der Laborversuche sichergestellt. Schwankungen der Suspensionskennwerte aufgrund von unsachgemäßer Hinterfüllung (Abbildung 1) werden dabei nicht beachtet.

Abbindeumgebung

Für Versuche an Prüfkörpern aus erhärteten Suspensionen ist auf die Lagerungsbedingungen während des Abbindevorgangs zu achten. Dazu gehört neben der erschütterungsfreien Lagerung, das Einstellen einer definierten Wasserverfügbarkeit und Umgebungstemperatur. Der aus hydrogeologischer Sicht kritischste Lastfall für das Hinterfüllmaterial ist die Abdichtung unterschiedlicher Grundwasserhorizonte. Das bedeutet, dass die Abdichtfunktion des Grundwasserstauers wieder hergestellt werden muss. Bei den Trennhorizonten unterschiedlicher Konsistenzen kann nicht davon ausgegangen werden, dass jederzeit ein konstanter

Grundwasserzufluss vorhanden ist. Daher sollen Prüfkörper, welche in eben diesen Schichten ausreichende Abdichteigenschaften aufweisen müssen, auch unter äquivalenten Randbedingungen abbinden. Somit sollten die Prüfkörper nicht unter Wasser abbinden, sondern unter Verdunstungsschutz. Das Wasser, welches beim Anmischen der Suspension zugegeben wurde, muss zum Auskristallisieren der Zementkomponenten genügen. Der temperaturabhängige Abbindevorgang sollte nicht bei Raumtemperatur stattfinden, sondern bei einem Temperaturniveau ähnlich der In-situ-Temperatur (i.d.R. ca. 10 °Celsius).

3.2 Rheologische Untersuchungen

Untersuchungen an der flüssigen Suspension finden nicht nur in der Produktüberwachung, sondern auch in der herstellerseitigen Produktentwicklung Anwendung. Dazu gehört unter anderem die Dichte- und Viskositätsbestimmung (wie auch bei der Bohrüberwachung) oder die Bestimmung des Absetzmaßes. Diese Untersuchungen sind essentiell für die praktische Handhabung der Hinterfüllbaustoffe, wie z.B. pumpfähigkeit, Pumpenverschleiß, Verdrängung der Bohrspülung während des Hinterfüllvorganges oder Setzung der Hinterfüllsäule. Materialien, die die aus der Praxis gestellten Anforderungen nicht erfüllen, haben keinen Bestand auf dem Markt. Daher sind die rheologischen Eigenschaften Grundlage für einen praxistauglichen Baustoff.

Bei der laborseitigen Anmischung von Hinterfüllsuspensionen werden die rheologischen Kennwerte als interne Qualitätssicherung bestimmt. Über einen Abgleich mit den Anforderungen, Herstellerangaben und im Feld ermittelten Kennwerten, können Aussagen zur Übertragbarkeit des Labormischverfahrens und der folgenden Untersuchungen am abgebundenen Baustoff getroffen werden. In der Abbildung 4 ist exemplarisch ein Vergleich der ermittelten Suspensionsdichten von drei handelsüblichen Hinterfüllbaustoffen mit den jeweiligen Herstellerangaben dargestellt.

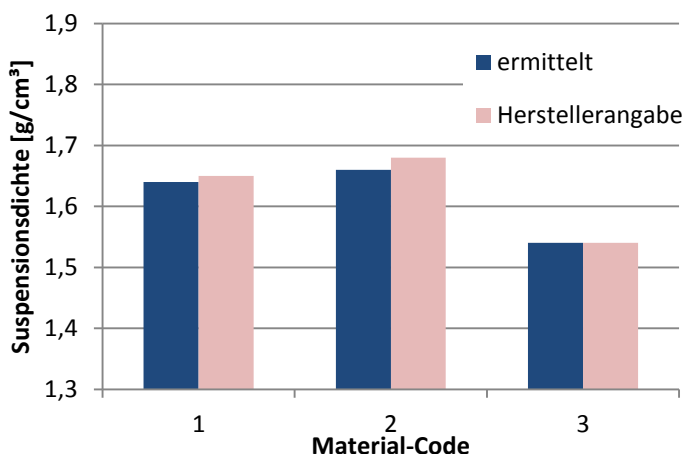


Abb. 4: Suspensionsdichten von drei handelsüblichen Hinterfüllbaustoffen (Abgleich der gemessenen Werte mit den Herstellerangaben)

Wie aus der obigen Abbildung zu erkennen ist, liegen die ermittelten Suspensionsdichten in den Bereichen der Herstellerangaben. Nach den Ergebnissen dieser und weiterer Versuche an den flüssigen Suspensionen, kann davon ausgegangen werden, dass die Vergleichbarkeit der folgenden Untersuchungen am erhärteten Baustoff gegeben ist.

So leisten die rheologischen Untersuchungen einen indirekten Beitrag zur Überwachung der Baustoffqualität.

3.3 Untersuchungen am erhärteten Hinterfüllbaustoff

Ein Hinterfüllbaustoff muss neben der Abdichtfunktion, auch die dauerhafte Stabilität des Bohrlochs einer EWS sicherstellen (Anbergen et al., 2011). Dabei ist diese Stabilität nicht nur gegenüber mechanischen Einwirkungen (Auflasten, Erddruck, Eisdruck) zu gewährleisten, sondern auch hydraulischen (Erosion und Suffusion). In der Regel wird die einaxiale Druckfestigkeit gemäß DIN 18136 (2003) als Beurteilungskriterium für die Stabilität ermittelt. In der Praxis werden einaxiale Druckfestigkeiten von $q_u > 1,0 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen gefordert.

In Abbildung 5 sind die einaxialen Druckfestigkeiten von drei handelsüblichen Hinterfüllbaustoffen dargestellt. Dabei wurden von jedem Material Prüfkörper verschiedener Abbindeszenarien geprüft (Arianta, 2012). Es wurden die Abbindezeit vor der Prüfung (28 bzw. 56 Tage) und die Abbinde­temperatur (10 bzw. 20 °C) variiert.

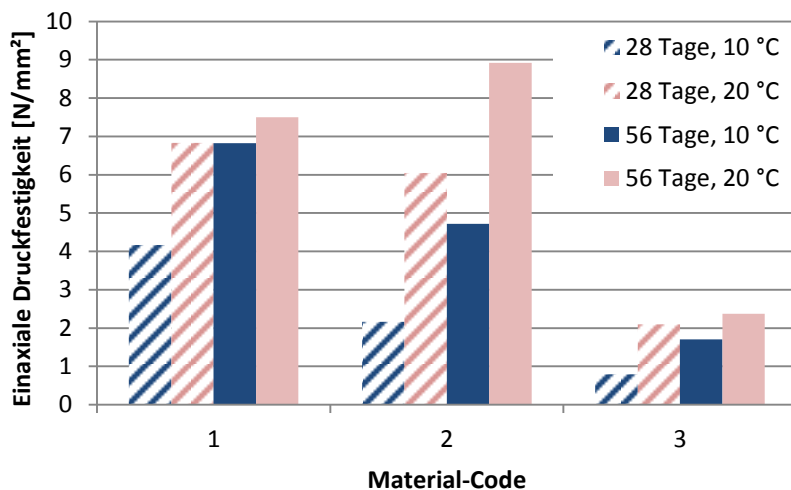


Abb. 5: Einaxiale Druckfestigkeiten von drei handelsüblichen Hinterfüllbaustoffen mit Variation der Abbinde­temperatur (10 und 20 °C) und –dauer (28 und 56 Tage).

Erwartungsgemäß ist zu erkennen, dass sowohl die Abbindezeit, als auch die Abbinde­temperatur einen großen Einfluss auf die Druckfestigkeitseigenschaften der Hinterfüllbaustoffe haben (Frank & Albrecht, 2010). Es ist ebenso ersichtlich, dass das dritte Material bei Lagerung unter In-situ-Temperaturen die Forderung von $q_u > 1,0 \text{ N/mm}^2$ nicht erfüllt, wohl aber bei Lagerung unter Labortemperaturen. So sind bei der Angabe von Materialeigenschaften von zementgebundenen Hinterfüllbaustoffen stets die beschriebenen Rahmenbedingungen bei den durchgeführten Versuchen zu nennen. Unter diesen Voraussetzungen ist einheitliche Beurteilung der Druckfestigkeit der Hinterfüllbaustoffe möglich und die Übertragbarkeit auf die tatsächliche Hinterfüllung einer EWS sichergestellt.

Zur Beurteilung des Abdichtverhaltens eines Hinterfüllbaustoffes wird der Durchlässigkeitsbeiwert gemäß DIN 18130-1 bestimmt. Bei der Anwendung dieser DIN-Norm ist zu beachten, dass sie sich auf Versuche an Bodenkörpern bezieht und nicht an zementgebundenen Materialien. Daher ist besonders auf die unter 3.1 dargestellten Randbedingungen zu achten.

In der Praxis wird meist ein Wert für die Materialdurchlässigkeit von $k_f < 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ gefordert. Nach Einteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte für Böden gemäß DIN 18130-1 (1998) entspricht dies einem *sehr schwach durchlässigen* Boden. Die Bestimmung der k_f -Werte wird dabei meist an zylindrischen Proben unter Labortemperatur durchgeführt (Müller, 2009). Für die Bewertung der Qualität der Abdichtung einer EWS ist jedoch das System Hinterfüllung/Sonde von Interesse (Anbergen et al., 2013b). Diese Systemdurchlässigkeit ist i.d.R. höher als die Materialdurchlässigkeit. Dabei ist eine

niedrige Materialdurchlässigkeit nicht zwingend mit einer niedrigen Systemdurchlässigkeit verknüpft. Die Systemdurchlässigkeit wird u.a. durch die Anhafteeigenschaften bzw. dem Kontaktwinkel zwischen Baustoff und Erdwärmesondenrohr, das Schwind- und Quellverhalten des Hinterfüllbaustoffes und differenzielle thermische Ausdehnung beeinflusst. Ein Versuchszellensystem zur Beurteilung der Systemdurchlässigkeit im Labormaßstab wurde 2011 in Hamburg in Betrieb genommen (Anbergen et al., 2011) und wird mittlerweile auch an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe und der Technischen Universität Darmstadt betrieben. Die Versuchszelle ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abb. 6: Messzelle zur Bestimmung des Einflusses von zyklischen Frost-Tau-Belastungen auf die Systemdurchlässigkeit von Hinterfüllbaustoffen für EWS.

Mit der dargestellten Messzelle sind sowohl Aussagen über die Systemdurchlässigkeit, als auch über die Veränderung der Systemdurchlässigkeit nach zyklischen Frost-Tau-Belastungen möglich. Die Prüfkörper dieses Messverfahrens bestehen aus einem zylindrischen Hinterfüllkörper, welcher um ein mittig verlaufendes HDPE-Rohr gegossen wurde. Grundlage für die Dimensionierung der Prüfkörper und des Messzellensystems sind typische Abmessungen von Erdwärmehohrungen mit Doppel-U-Sonden. Die Übertragung der Oberflächen und Durchmesser der Erdwärmesonden auf die Prüfkörperabmessungen wurde maßstabsgetreu berechnet. Dabei wird die Anströmfläche in axialer Sondenrichtung ins Verhältnis zur Kontaktfläche HDPE/Hinterfüllbaustoff gesetzt. Dieses Verhältnis ist bei EWS und Prüfkörper gleich.

$$\frac{U_{EWS}}{A_{EWS}} = \frac{U_{Modell}}{A_{Modell}} \quad (8)$$

- U_{EWS} Gesamtumfang der Sondenrohre einer EWS in einem orthogonalen Schnitt [m]
- A_{EWS} Durchströmungsfläche des Hinterfüllbaustoffs einer EWS in einem orth. Schnitt [m²]
- U_{Modell} Umfang des PE-Rohres des Prüfkörpers [m]
- A_{Modell} Durchströmungsfläche des Hinterfüllbaustoffs des Prüfkörpers in einem orth. Schnitt [m²]

Somit wird der Einfluss der Systemdurchlässigkeit in dem Messverfahren realitätsgetreu simuliert und die Ergebnisse der Systemdurchlässigkeit sind auf den Realmaßstab übertragbar. Ein exemplarischer Prüfkörper ist in Abbildung 7 dargestellt.

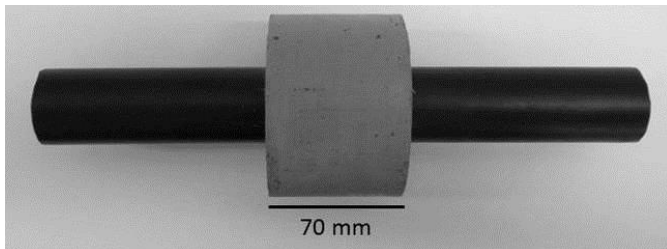


Abb. 7: Prüfkörper zur Messung der Systemdurchlässigkeit, bestehend aus einem mittigen HDPE-Rohr (Außendurchmesser 40 mm) und einem zylindrischen Hinterfüllkörper (Außendurchmesser 96 mm)

Entscheidend bei diesem Messverfahren ist die Simulation der Durchfrostungsrichtung, wie in-situ, von innen nach außen und des radialen Erddrucks während des gesamten Versuchsablaufes. Somit ist in Kombination der Bestimmung der Materialdurchlässigkeit und der Systemdurchlässigkeit vor und nach Frost-Tau-Belastungen (siehe Abb. 8) eine umfassende Aussage zu Eignung eines Hinterfüllbaustoffes zur Abdichtung von EWS möglich (Anbergen & Sass, 2013).

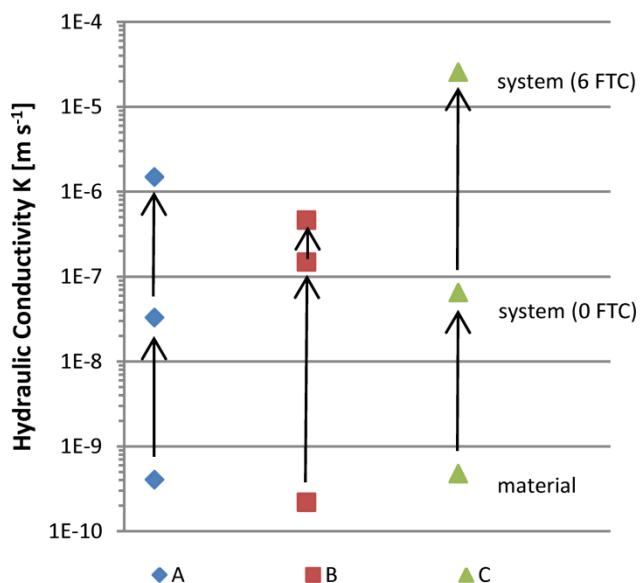


Abb. 8: Darstellung der Materialdurchlässigkeit k_f , der Systemdurchlässigkeit vor und nach 6 Frost-Tau-Wechseln von drei handelsüblichen Hinterfüllbaustoffen. Abbindezeit 28 Tage, Abbinde temperatur 8 °C. (Anbergen et al., 2013b)

Wie aus Abbildung 8 zu erkennen ist, beträgt der Unterschied zwischen Materialdurchlässigkeit und Systemdurchlässigkeit ca. zwei Zehnerpotenzen. Der Anstieg der Durchlässigkeit bei den bisher untersuchten Hinterfüllbaustoffen aufgrund zyklischer Frost-Tau-Belastungen ist materialabhängig zwischen einer halben und drei Zehnerpotenzen.

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass alle drei geprüften Materialien die Forderung von einer Materialdurchlässigkeit kleiner $1 \times 10^{-9} m/s$ erfüllen. In der Systemdurchlässigkeit variieren die gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte und befinden sich im *schwach durchlässigen* Bereich gemäß DIN 18130 (1998). Material B verzeichnet lediglich einen geringen Anstieg der Durchlässigkeit aufgrund der Frost-Tau-Belastungen, während der k_f -Wert von Material C deutlich ansteigt. Es ist

erkennbar, dass die Materialien einen unterschiedlichen Frostwiderstand aufweisen, welcher messtechnisch über die Durchlässigkeit erfasst werden kann.

3.4 Diskussion und Ableitungen der Versuchsergebnisse für die Praxis

Die in dieser Arbeit vorgestellten Laborversuche eignen sich, um eine Aussage zu den grundsätzlichen Materialkennwerten zu treffen und auf den Einbauzustand zu übertragen. Die Belastbarkeit dieser Kennwerte für die Anwendung in der Praxis, hängt direkt von der sachgemäßen Ausführung auf der Baustelle ab. Ein unbeabsichtigtes oder mutwilliges Abändern der Rezepturen kann zu gravierenden Unterschieden in den Materialparametern führen.

Die rheologischen Untersuchungen können nicht nur auf der Baustelle zur Qualitätskontrolle verwendet werden, sondern auch im Labor einen erheblichen Beitrag leisten. Neben der grundsätzlichen Eignung des Hinterfüllbaustoffes (z.B. im Rahmen der Produktentwicklung), kann über diese Versuche die Übertragbarkeit der weiteren Laborversuche auf den Praxisbetrieb geprüft werden. Fehler in der Materialkomposition oder der Anmischung werden durch Abweichungen zum Soll-Zustand der Kennwerte erkannt und können dementsprechend bewertet werden.

Die Anwendung von genormten geotechnischen Versuchen an Hinterfüllbaustoffen hat sich etabliert. So lassen sich über die Druckfestigkeitsuntersuchungen präzise Aussagen zur Einhaltung der Mindestanforderungen der Druckfestigkeit treffen. Diese Mindestanforderungen müssen jedoch im Einzelfall gesondert betrachtet werden, wie z.B. bei Bentonit- oder Pellet-Hinterfüllungen. Über die Durchlässigkeitsuntersuchungen können die Abdichtungseigenschaften der Baustoffe quantifiziert werden. Für Baustoffe die für EWS im Betrieb mit negativen Fluidtemperaturen angewendet werden, können über das beschriebene Verfahren, Aussagen zur Eignung dieser Baustoffe getroffen werden. Die Frost-Tau-Versuche werden grundsätzlich als Dreifachbestimmung durchgeführt und so die statistische Relevanz der Ergebnisse geprüft bzw. sichergestellt. Mit über 650 Frost-Tau-Wechsel-Simulationen und Ringversuchen, wurde die Praxistauglichkeit des Prüfverfahrens belegt.

4. Schlussfolgerungen

Neben der Dokumentation der Baustoffbeschaffenheit während des Hinterfüllvorgangs, können Erkenntnisse über die rein technischen Randbedingungen gewonnen werden. Dies sind z.B. Aussagen über die Kontinuität der Suspensionsbeschaffenheit bei unterschiedlichen Mischertypen, die einzusetzenden Füllrohrdurchmesser bei unterschiedlichen Baustoffen oder Dichten. Hieraus lassen sich mit fortschreitendem Kenntnisstand technische Empfehlungen erarbeiten, die für Geräte-Baustoff-Kombinationen einen optimalen Hinterfüllvorgang erwarten lassen.

Die Einhaltung der gestellten Mindestanforderungen an die Hinterfüllbaustoffe lässt sich im Labor reproduzierbar prüfen. Die Eignung von Hinterfüllbaustoffen für den EWS-Betrieb mit negativen Fluidtemperaturen kann über das vorgestellte Verfahren zuverlässig bewertet werden. Die Freie und Hansestadt Hamburg hat das beschriebene Frost-Tau-Wechsel Prüfverfahren zum Dezember 2012 verbindlich eingeführt.

Mit einer klar definierten Zielsetzung, können Laboruntersuchungen und Feldmessungen einen hohen Beitrag zur Sicherung der Qualität der Hinterfüllung leisten.

5. Ausblick

In diesem Artikel wird eine Möglichkeit zur Qualitätssicherung in der Baustoffentwicklung und –prüfung durch Messungen in einer Prüfzelle gezeigt. Weiterhin wird ein Feldmessverfahren zur kontinuierlichen Kontrolle und Dokumentation der Schlüsselparameter Dichte, Volumen und Druck des Hinterfüllvorganges an Erdwärmesonden vorgestellt. Laborversuche werden bisher meist an laborseitig hergestellten Prüfkörpern durchgeführt, Probennahmen auf der Baustelle werden weitere

Erkenntnisse liefern. Eine engere Verzahnung von der Qualitätssicherung im Feld und im Labor wird derzeit geprüft.

Die Entscheidung darüber, welche Maßnahmen zur Qualitätssicherung ergriffen werden müssen, liegt bei den Genehmigungsbehörden und den Fachausschüssen. Die Verantwortung über den Nachweis liegt bei den ausführenden Firmen und bei den Bauherren.

Quellenangaben

ANBERGEN, H., FRANK, J., MÜLLER, L. & SASS, I.: Prüfverfahren zur Frost-Tau-Wechselwiderstands-fähigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden, *Geothermische Energie*, 75, (2013a), 18-19.

ANBERGEN, H., FRANK, J., MÜLLER, L. & SASS, I.: Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchangers Grouts: Impact on the Hydraulic Properties, *Geotechnical Testing Journal*, (2013b) (in review).

ANBERGEN, H., FRANK, J., ALBRECHT, I. & DITTRICH, H.: Prüfzelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterialien für EWS, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 10/2011, (2011), 38-43.

ANBERGEN, H. & SASS, I.: Freeze-Thaw-Behavior: Observations in Grouted BHEs, *Proceedings Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, (2013).

ARIANTA, A.: Versuche zur Bestimmung des Temperatureinflusses auf den Abbindeprozess von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden, *unveröffentlichte Masterarbeit*, Hochschule Ostwestfalen-Lippe Standort Höxter, Fachgebiet Geotechnik (2012).

DIN 18130-1: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeits-beiwertes - Teil 1: Laborversuche, Deutsches Institut für Normung e.V., (1998), Beuth Verlag GmbH

DIN 18136: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch, Deutsches Institut für Normung e.V., (2003), Beuth Verlag GmbH.

FRANK, J. & ALBRECHT, I.: Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost-Tauwechsel, *Tagungs-CD*, Geothermische Vereinigung, Der Geothermiekongress 2010, (2010), Karlsruhe.

HERING, E., MARTIN, R. & STÖHRER, M.: Physik für Ingenieure, 11. Auflage, (2012), Springer Verlag.

LEHR, C.: Qualitätsanforderungen und Qualitätsmanagement bei der Erschließung von Geothermischen Feldern, *GeoHannover 2012*, Schriftenreihe der SDGG, Heft 80, S. 214, Hannover (2012)

MÜLLER, L.: Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 08/2009, (2009), 30-36.

VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Verein Deutscher Ingenieure, (2001), Beuth Verlag GmbH.

Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt
anbergen@geo.tu-darmstadt.de