

## **Praxistaugliche Qualitätskontrollen des Hinterfüllmaterials bei geothermischen Bohrungen**

**Hauke Anbergen<sup>1</sup>, Jens Frank<sup>2</sup>, Hartmut Dittrich<sup>3</sup> und Ingo Sass<sup>4</sup>**

1) APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH, 2) Frank GeoConsult GmbH, 3) Behörde für Stadtentwicklung und Energie Hamburg, 4) Technische Universität Darmstadt

**Keywords:** Qualitätskontrolle, Hinterfüllmaterial, Feldversuche, Systemdurchlässigkeit, Frost-Tau-Wechsel

### **Zusammenfassung**

Im Rahmen einer von der Behörde für Umwelt und Energie (BUE) der Freien und Hansestadt Hamburg beauftragten Untersuchung war die Einsatzmöglichkeit des von Frank und Anbergen entwickelten Prüfverfahrens zur Bestimmung der Systemdurchlässigkeit von Hinterfüllmaterialien von Erdwärmesonden (EWS) bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen im Baustelleneinsatz, in Anlehnung an die Fremdüberwachung bei Betonbauwerken (VDZ B5 (2014)), zu untersuchen. Im Zeitraum von drei Monaten wurde eine Auswahl an geothermischen Bohrungen im Hamburger Raum überwacht. Dabei wurden neben Feldversuchen auch labortechnische Untersuchungen an auf der Baustelle gewonnenen Proben durchgeführt. Es wurden die Systemdurchlässigkeit und der Frost-Tau-Wechselwiderstand der Hinterfüllmaterialien bestimmt. In dem Beitrag werden der Ablauf der Überwachung, die Messergebnisse sowie die Praktikabilität der Überwachung dargestellt und diskutiert.

### **1. Einleitung**

Seit Ende der 1990er Jahre wird die Fragestellung nach den Auswirkungen zyklischer Frost-Tau-Belastungen auf Hinterfüllmaterialien von Erdwärmesonden diskutiert. Es wurde eine Vielzahl an Labor- und Technikumuntersuchungen durchgeführt und Prüfverfahren entwickelt, die eine Eignungsprüfung der eingesetzten Hinterfüllmaterialien ermöglichen. Da aus Sicht des Grundwasserschutzes die hydraulische Integrität des Systems Erdwärmesonde im Mittelpunkt steht, haben sich Prüfverfahren durchgesetzt, die die Wasserdurchlässigkeit des Systems ermitteln. Das von Frank und Anbergen entwickelte Prüfverfahren zur Messung der Systemdurchlässigkeit von Hinterfüllmaterialien von EWS bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen ist zwischenzeitlich in die Empfehlungen der EA Geothermie aufgenommen worden (DGG & DGGT 2014). Auch die seit April 2015 im Entwurf (Gründruck) vorliegende aktualisierte VDI 4640-2 (2015) schlägt das Messverfahren im Anhang C vor. In Hamburg ist das Verfahren seit Januar 2014 verbindliche Voraussetzung für die wasserrechtliche Genehmigung von Erdwärmesonden, sofern die installierte Technik eine Frost-Tauwechsel-Belastung zulässt. Damit spiegelt das Prüfverfahren den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik wider und weist Norm-Charakter auf (Seibel 2013). Die bisherigen Untersuchungen haben die Praxistauglichkeit der Frank-und-Anbergen Messzelle im Labor bestätigt. Zu prüfen war nun, ob das entwickelte Prüfverfahren auch unter Baustellenbedingungen anwendbar ist und dort im Rahmen der Qualitätskontrolle eingesetzt werden kann.

Aus diesem Grund hat die Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (BUE, ehem. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt [BSU]) das Ingenieurbüro Frank GeoConsult 2014 mit einer Untersuchung der Praxistauglichkeit der Baustellenbeprobung von Hinterfüllmaterialien für Erdwärmesonden beauftragt. In diesem Zuge wurde ein Beprobungskonzept erarbeitet, Feldversuche auf den Baustellen und anschließende Laboruntersuchungen durchgeführt, sowie die Praxistauglichkeit derartiger Untersuchungen bewertet.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse und eines geordneten Beprobungsablaufes wurde eine Handlungsanweisung für die durchzuführenden Arbeitsschritte aufgestellt. Die Anforderungen an die Baustellenversuche und deren organisatorische und verfahrenstechnische Vorbereitung sind dem Ablaufplan (Abb. 1) zu entnehmen.

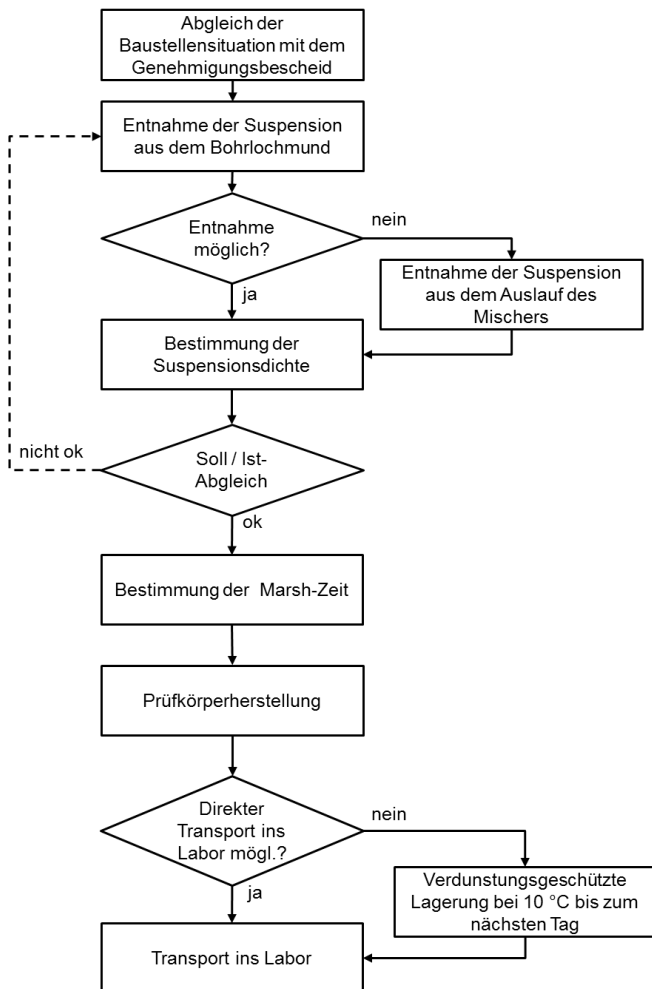


Abb. 1: Flussdiagramm des Beprobungsablaufes einer Überwachung der Hinterfüllung von Erdwärmehohrungen.

## 2. Entwicklung eines praxistauglichen Probenahmeprotokolls

Für die Nachvollziehbarkeit der jeweiligen Versuchsergebnisse ist eine detaillierte Aufnahme der örtlichen Randbedingungen zum Probenahmezeitpunkt notwendig. Dazu gehören neben den üblichen Daten wie Ort, Zeit, Witterungsbedingungen, auch Projektdaten (Anzahl und Länge der EWS, verwendetes Material, Quelle des Zugabewassers und Mischerart), die Angaben zum Probennehmer (Institut, Name) und zur Bohrfirma (ausführende Firma, Name des Bohreräteführers). Vor Ort muss ein Soll-/Ist-Abgleich der Genehmigungsunterlagen erfolgen. Bei fehlender Übereinstimmung ist die zuständige Behörde zu informieren.

Grundsätzlich kann dabei auf Erfahrungen aus dem Betonbau (DIN 12390-2 2009 und 12390-2B1 2011) und dem Brunnenbau (z. B. DVGW W-116 1998 oder DVGW W-123 2001) zurückgegriffen werden. Aus den Projektdaten kann eine Volumenermittlung der zu verwendenden Hinterfüllmaterialmenge durchgeführt werden (DVGW W123, 2001). Diese ist für eine Plausibilitätskontrolle heranzuziehen. Dabei sollte der Bohrkopf nach der Bohrung gemessen

werden, ob mit diesem ein Bohrloch mit dem geplanten Durchmesser hergestellt werden kann. Sollte mit dem verwendeten Bohrkopf keine ausreichende Überdeckung der Sondenrohre möglich sein, ist ein Nachbohren mit einem ausreichend großen Bohrkopf durchzuführen. Bei Unregelmäßigkeiten im Abgleich des rechnerisch ermittelten Hinterfüllvolumens und dem tatsächlich eingebrachten Hinterfüllvolumen kann zusätzlich ein Abgleich mit den aufgenommenen Bohrprofilen durchgeführt werden. Für eine überschlägige Volumenermittlung kann das in Abb.2 dargestellte Diagramm verwendet werden. Je nach Sondentypen können entsprechende Diagramme erstellt und somit die Volumenermittlung vereinfacht werden. Für die Dokumentation der abzufragenden Informationen wurde ein Probenahmeprotokoll entwickelt, in welches auch das in Abb.2 dargestellte Diagramm aufgenommen ist (Anbergen et al. 2015a).

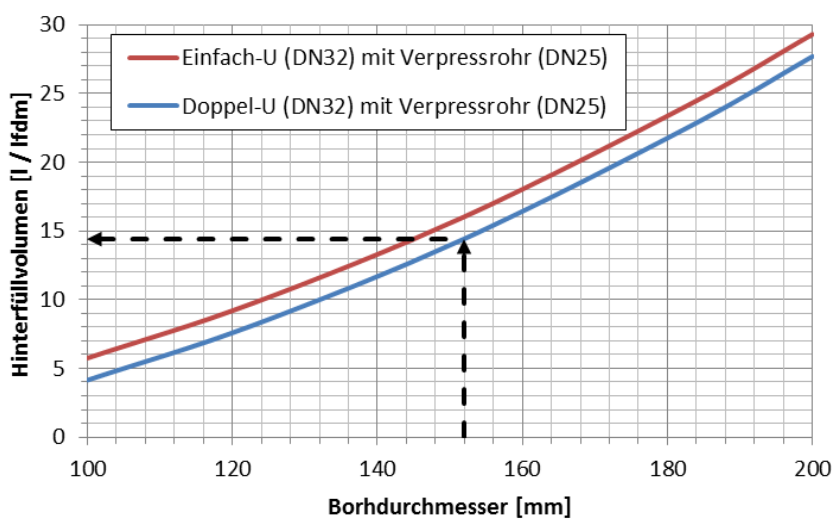


Abb. 2: Überschlägige grafische Volumenermittlung (Einfach-U- und Doppel-U-Sonde DN32 mit Hinterfüllrohr DN25).

### 3. Feldversuche

#### 3.1 Feldversuche an Hinterfüllsuspensionen

Für eine fundierte Bewertung der Hinterfüllsuspension sind auf der Baustelle die maßgeblichen Suspensionsparameter aufzunehmen. Diese sind üblicherweise die Suspensionsdichte, die Trichterauslaufzeit (TAZ oder Marshzeit) sowie das Absetzmaß. Die ersten beiden Parameter sind relativ zügig auf der Baustelle bestimmbar. Die Prüfung des Absetzmaßes erfordert einen unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand, welcher nicht geleistet werden kann, ohne den Bauablauf zeitlich maßgeblich zu belasten.

Grundsätzlich sollte die zu untersuchende Suspension am Bohrlochmund entnommen werden, sodass die tatsächlich im Bohrloch vorhandene Suspension beprobt wird. Der Entnahmeort ist in dem Probenahmeprotokoll festzuhalten. Losgelöst von dem Ort der Probenahme, gilt es sicherzustellen, dass die Bohrspülung in ausreichendem Maße durch die Hinterfüllsuspension verdrängt wird. Aktuelle Untersuchungen (Rolker & Riegger 2015) zeigen, dass eine visuelle Beurteilung rein über die Trübung zu Fehlinterpretationen führen kann, da der Farbumschlag der tatsächlichen Hinterfüllspiegelhöhe deutlich vorausläuft.

Bei der Entnahme sollte deshalb direkt die Suspensionsdichte bestimmt werden, um zu prüfen, ob diese dem Sollwert entspricht. Die Hinterfüllung der Erdwärmesonde kann als abgeschlossen angesehen werden, wenn die Suspensionsdichte am Bohrlochmund der Solldichte entspricht. Die

weiteren Versuche und die Prüfkörperherstellung sind dann durchzuführen, wenn die Soll-Suspensionsdichte erreicht wird (Abb. 1).

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurden die Proben am Mischer entnommen und die Suspensionsdichte sowie die Trichterauslaufzeit bestimmt. Für die Bestimmung der Suspensionsdichte stehen drei gängige Verfahren zur Verfügung. Diese sind:

- (A) Bestimmung durch Wägung (im Litergefäß),
- (B) Bestimmung mittels Spülungswaage (s. Abb. 3),
- (C) Bestimmung mittel Aräometer.

Jedes der drei Verfahren ist praktikabel und für eine Baustellenüberwachung von Hinterfüllsuspensionen geeignet. Für einen Abgleich der ermittelten Suspensionsdichten mit den Herstellerangaben sind die Genauigkeiten der Verfahren ausreichend.



Abb. 3: Spülungswaage zur Bestimmung der Dichte von Hinterfüllsuspensionen.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen erfolgten die Messungen mit einer Spülungswaage.

Konsekutiv zu den Dichtebestimmungen wurden die Trichterauslaufzeiten mit dem Marsh-Trichter (Abb. 4) bestimmt. Die TAZ dient als indirektes Maß für die Viskosität der Suspension. Bei der Ermittlung der TAZ ist unbedingt darauf zu achten, welcher Marsh-Trichter-Typ verwendet wird. Es existieren Trichter mit unterschiedlichen Durchmessern der Auslaufdüsen. Kleinere Durchmesser führen zu einem langsameren Auslaufen der Suspension. Daher ist stets der Durchmesser der Auslaufdüse anzugeben. Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden mit einer Auslaufdüse von 4,76 mm Durchmesser durchgeführt.



Abb. 4: Marsh-Trichter zur Bestimmung der Trichterauslaufzeit von Hinterfüllsuspensionen (DGG & DGGT 2014).

Es ist darauf zu achten, dass die Suspensionen entsprechend den Herstellervorgaben angemacht und verarbeitet werden, sowie den sonstigen behördlichen/länderspezifischen Vorgaben entsprechen. Das Hinterfüllmaterial mit den dazugehörigen Suspensionsparametern ist ein wichtiger Teil des Qualitätsmanagements auf der Baustelle und muss stets kontrolliert werden. Werden die Vorgaben nicht eingehalten oder weichen die Suspensionsparameter signifikant ab, bleibt es der zuständigen Wasserbehörde vorbehalten, Konsequenzen für den zukünftigen Betrieb der Sonde festzusetzen. Denkbar wäre beispielsweise die Durchführung zusätzlicher geophysikalischer Messungen bis hin zum Widerruf der wasserrechtlichen Erlaubnis. Sollte der Verdacht einer nicht ordnungsgemäß oder mangelhaft hergestellten Ringraumabdichtung bestehen, wären darüber hinaus Forderungen nach einem Rückbau der Sonde einschließlich einer durchzuführenden Ringraumnachdichtung möglich.

### 3.2 Ergebnisse der Feldversuche

Im Rahmen des von der BUE initiierten Versuchsprogrammes wurde auf sechs Baustellen die Hinterfüllung von EWS begleitet (B01 bis B06). Dabei kamen ausschließlich Hinterfüllmaterialien zum Einsatz, die in Hamburg für Frost-Tau-Wechsel belastete Sonden zugelassen sind (BSU, 2014).

In der Abb. 5 sind die ermittelten Suspensionsdichten (blau) dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen den von der EA Geothermie empfohlenen Dichtebereich (Minimum / Maximum), die roten Markierungen weisen die Herstellerangabe aus. Es ist ersichtlich, dass die vor Ort ermittelten Suspensionsdichten in dem Bereich der Herstellerangaben liegen. Die Dichte der Hinterfüllsuspension der Baustelle B04 liegt geringfügig über dem Grenzwert des nach der EA Geothermie empfohlenen Wertes von  $1,9 \text{ kg / m}^3$ .

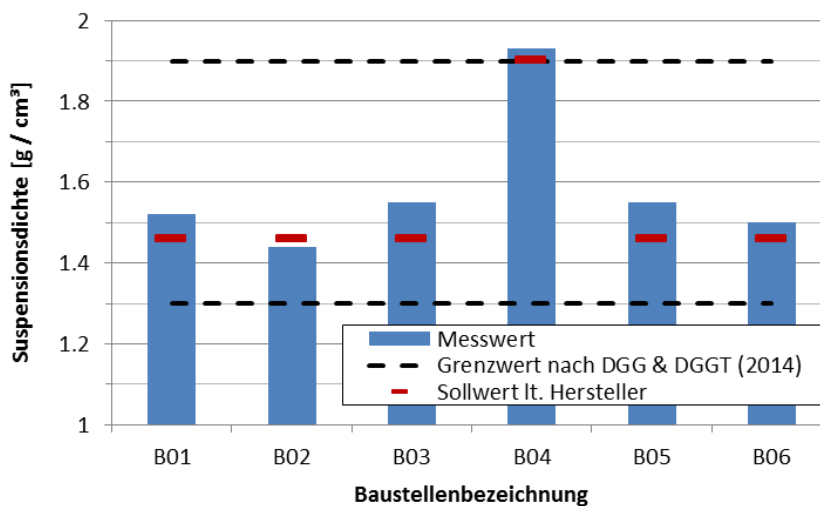


Abb. 5: Ermittelte Suspensionsdichten der jeweiligen Hinterfüllsuspensionen.

In der Abb. 6 sind die ermittelten Trichterauslaufzeiten (TAZ), der von der EA Geothermie empfohlene Bereich sowie die Herstellerangaben (falls vorhanden) dargestellt. Die ermittelten TAZ überschreiten bei B01, B03 und B04 den empfohlenen Wertebereich von 100 Sekunden. Diese Suspensionen weisen auch eine Suspensionsdichte über denen, von den Herstellern angegebenen Werten auf.

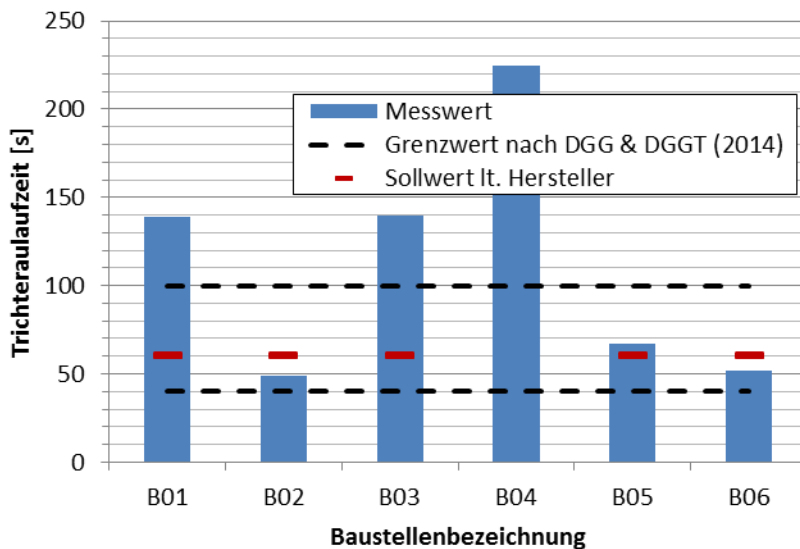


Abb. 6: Ermittelte Trichterauslaufzeiten der jeweiligen Hinterfüllsuspensionen.

Trotz der guten Übereinstimmung der Dichten ergaben sich deutliche Streuungen bei der indirekten Viskositätsmessung mit dem Marsh-Trichter. Aus Abb. 6 ist ersichtlich, dass die ermittelten TAZ teilweise signifikant von den Herstellerangaben abweichen. Es werden die einschlägigen Empfehlungen zur maximalen TAZ deutlich überschritten. Trotz der teilweise hohen TAZ wurden keine Hinweise auf eine unsachgemäße Hinterfüllung (Pumpleistung) beobachtet. Eine genaue Ursache der höheren Viskositäten lässt sich nicht direkt ableiten, da diese von vielen Faktoren beeinflusst wird, wie der Temperatur, der Anmachgeschwindigkeit und -dauer, dem pH-Wert, den Lagerungsbedingungen des Trockenmaterials, dem Suspensionsalter und viele weitere (Haist et al. 2015). Eine mögliche Ursache können die stark unterschiedlichen Mischverfahren sein, die zum Einsatz kamen. Bei der Beprobung der Baustellen wurden neben Kolloidalmischern auch Eigenkonstruktionen der Bohrfirmen mit Umdrehungsgeschwindigkeiten des Rührwerkes von ca. 60 U / min angetroffen (B01). Im Gegensatz dazu werden die Hinterfüllmaterialien bei Kolloidalmischern mit deutlich höheren Umdrehungszahlen (Scherkräften) aufgeschlossen. Daher ist mit einer unterschiedlichen Homogenisierung (Aufschluss) der Hinterfüllmaterialien zu rechnen, was direkte Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften und die Materialeigenschaften des ausgehärteten Baustoffs haben kann. Aus Gründen der Qualitätssicherung sollten geeignete Mischverfahren für die jeweiligen Hinterfüllbaustoffe fest vorgeschrieben und kontrolliert werden. Die Ermittlung der Suspensionsdichten und Trichterauslaufzeiten sind praktikable Methoden für eine erste Überprüfung des verwendeten Hinterfüllmaterials. Über die beiden Suspensionsparameter können Rückschlüsse auf die Einhaltung der Rezeptur und der empfohlenen Mischvorgaben gezogen werden. Es liegen aus vorgehenden Untersuchungen (u.a. Müller 2009, Frank & Albrecht 2010, Kuckelkorn & Reuß 2010, Anbergen et al. 2015b oder Haist et al. 2015) ausreichend Informationen über die Suspensionsparameter der erhältlichen Hinterfüllmaterialien vor.

## 4. Laboruntersuchungen

### 4.1 Prüfkörperherstellung, -lagerung und -transport

Nach der Ermittlung der Suspensionsparameter wurden auf den Baustellen Prüfkörper für Laboruntersuchungen hergestellt. Es wurde ein ausreichendes Volumen (> 3 Liter) entnommen und anschließend in die eingefetteten Gießanlagen gefüllt (Abb. 7). Die Gießanlagen wurden in einer

Kühleinheit in Waage platziert (B01 und B03 - B06). Die Proben konnten für einen Tag auf der Baustelle bei  $10\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  lagern und erhärten, bis sie unter Wahrung der Kühlkette in das Labor transportiert wurden.



Abb. 7: Gießanlagen für die Herstellung von Prüfkörper für Systemdurchlässigkeits- und Frost-Tau-Wechsel-Versuche (Anbergen et al. 2014).

Durch die erste Lagerung auf der Baustelle wird vermieden, dass die Proben in der Frühphase der Hydratation durch dynamische Belastungen beim Transport gestört werden. Die Proben der Baustelle B02 wurden direkt in das Labor transportiert und konnten dort abbinden. Das beprobte Material hat laut Herstellerangaben eine Verarbeitungszeit von 5 Stunden. Die Zeit zwischen Anmachen der Suspension und Beginn der Lagerung im Labor betrug weniger als 60 Minuten, wodurch davon auszugehen ist, dass der Abbindeprozess nicht signifikant gestört wurde. Die Probenherstellung, -transport und -lagerung haben sich als praktikabel erwiesen und ähneln den Lagerungsbedingungen im Labor, sodass von einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse ausgegangen werden kann.

#### 4.2 Systemdurchlässigkeit und des Frost-Tau-Widerstandes

Die auf der Baustelle hergestellten Prüfkörper wurden unter Wahrung der Kühlkette in das Erdbaulabor transportiert. Dort erfolgte die weitere Lagerung unter temperierten und verdunstungsgeschützten Bedingungen bis zum Prüftermin. Zum Prüftermin wurde jeweils ein Prüfkörper zugeschnitten, gewogen und in die Frank-und-Anbergen-Messzellen eingebaut (Abb. 8). Die Probe wurde gesättigt und die Wasserdurchlässigkeit des Systems Sonde – Hinterfüllung im Anschluss in Anlehnung an DIN 18130-1 (1998) bestimmt. Die ermittelte Systemdurchlässigkeit wird zum einen von der Materialdurchlässigkeit des Hinterfüllmaterials beeinflusst, zum anderen von dem Kontaktverhalten des Hinterfüllbaustoffes an das Sondenrohr.



Abb. 8: Frank-und-Anbergen-Messzelle zur Bestimmung der Systemdurchlässigkeit und des Frost-Tau-Wechselwiderstands (nach Anbergen et al. 2011).

Nachdem die Systemdurchlässigkeit bestimmt wurde, wird der hydraulische Gradient auf null reduziert, sodass ein beidseitiger Sättigungsdruck an der Probe anliegt. Das mittige Sondenrohr wird mit einer Wärmeträgerflüssigkeit von unten nach oben durchströmt und der Prüfkörper für 20 Stunden mit  $-10\text{ °C}$  Fluidtemperatur gekühlt. Der Prüfkörper durchfrostet von innen nach außen. Im Anschluss wird die Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit auf  $+8\text{ °C}$  angehoben, und der Prüfkörper taut auf. Durch eine erneute Bestimmung der Systemdurchlässigkeit kann die frost-tau-bedingte Änderung der Durchlässigkeit erfasst werden. Das Prüfablaufschemata entspricht dem Anhang C des Gründrucks der VDI 4640-2 (2015).

Die Proben wurden jeweils durch sechs Frost-Tau-Zyklen belastet. Das Probenalter variiert dabei laborbetriebsbedingt zwischen 21 und 42 Tagen. Es gilt zu beachten, dass es sich bei den Messungen um Einzelproben handelt. In der Abb. 9 werden die Versuchsergebnisse mit den Eignungsprüfungen des gleichen Materials vergleichend dargestellt. Auf der Baustelle B01-B03 und B05, B06 wurde das gleiche Hinterfüllmaterial eingesetzt. Auf eine Darstellung des Einzelmesswertes der Probe B04 wird aufgrund der fehlenden statistischen Absicherung verzichtet.



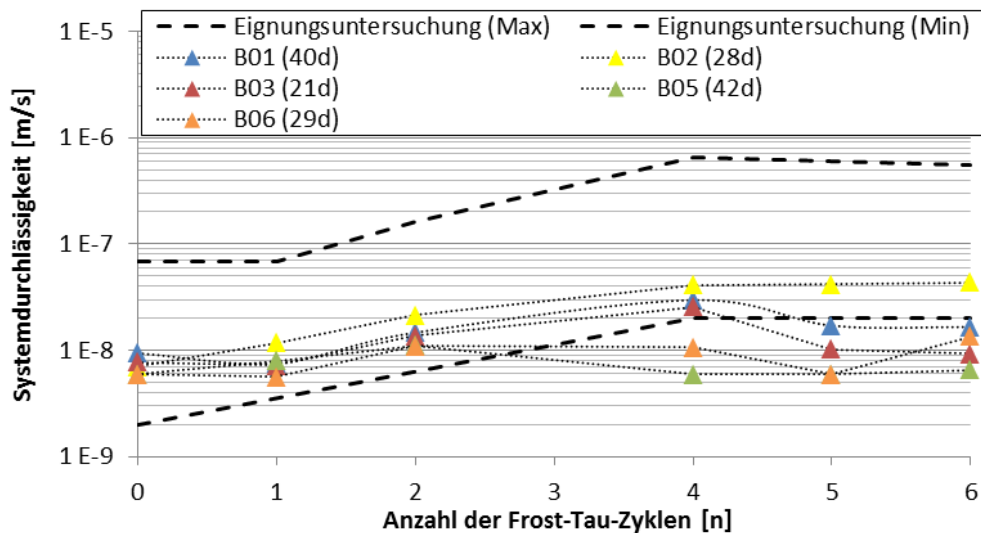


Abb. 9: Vergleich der ermittelten Systemdurchlässigkeiten (Labor- und Feldproben) in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Zyklen.

Es ist ersichtlich, dass die ermittelten Systemdurchlässigkeiten vor der thermischen Belastung in einem Bereich um  $1 \times 10^{-8}$  m/s liegen und damit im Übergangsbereich von schwach durchlässig zu sehr schwach durchlässig (nach DIN 18130-1 1998). Durch die zyklischen Frost-Tau-Belastungen kommt es zu einem moderaten Anstieg der Systemdurchlässigkeit von weniger als einer Zehnerpotenz. Damit wäre dieser Hinterfüllbaustoff nach dem Gründruck der VDI 4640-2 (2015) als frost-tau-beständig einzustufen. Die Systemdurchlässigkeiten verbleiben auch unter dem in Hamburg geltenden Grenzwert von  $5 \times 10^{-7}$  m/s (BSU 2014). Die auf der Baustelle hergestellten Proben erfüllen die Vorgaben für die labortechnischen Eignungsuntersuchungen von Hinterfüllbaustoffen mit erhöhtem Frost-Tau-Wechsel-Widerstand.

## 5. Schlussfolgerungen

Eine Qualitätskontrolle der Hinterfüllmaterialien von geothermischen Bohrungen auf der Baustelle ist praktikabel durchführbar. Die bereits etablierten Feldversuche an der Hinterfüllsuspension sind ausgereift und zeiteffizient umsetzbar. Das Equipment für die Prüfkörperherstellung, -lagerung und -transport ist vorhanden und ausgereift. Die Ermittlung der Systemdurchlässigkeit und des Frost-Tau-Widerstandes der Prüfkörper mit der Frank-und-Anbergen-Messzelle ist praktikabel anwendbar und reproduzierbar. Der Prüfverlauf nach BSU (2014), EA Geothermie (2014) und VDI 4640-2 (Gründruck 2015) ist klar definiert und liefert Aussagen zur hydraulischen Integrität des Systems Erdwärmesonde.

Die Führung eines Überwachungsprotokolls sollte (sofern nicht in den Bundesländern schon vorgesehen) in die wasserrechtliche Genehmigung bzw. in die zu erstellenden Dokumentationsunterlagen eingebunden werden. Das ausgefüllte und unterschriebene Protokoll wäre nach Fertigstellung des Bauwerkes an die Genehmigungsbehörde zu übergeben. Die Qualitätskontrollen können sowohl als Eigen- oder Fremdüberwachung durchgeführt werden. Für die Überwachung bedarf es einer sorgfältigen Koordination der Probenahmeterminale und Laborkapazitäten. Da das Prüfverfahren universell einsetzbar ist, kann über ein Cluster an Laboren sichergestellt werden, dass die Kapazitäten vorhanden sind. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollte dabei unbedingt über interne Ringversuche mit Kalibrierungsmaterialien sichergestellt werden (s. z.B. Anbergen 2015).

Sollten die Laborergebnisse einen nicht ausreichenden Frost-Tau-Wechselwiderstand des verwendeten Hinterfüllmaterials ergeben, hat die zuständige Genehmigungsbehörde die Möglichkeit, die wasserrechtliche Genehmigung anzupassen und ggf. die Betriebsgenehmigung auf eine minimale Fluidtemperatur von größer 0 °C anzuheben und den Einbau eines Frostwächters zu fordern. Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben gezeigt, dass die Systemdurchlässigkeit Frost-Tau-Wechsel belasteter, auf der Baustelle hergestellter Prüfkörper, gut mit denen im Labor hergestellten Prüfkörpern korreliert.

## **Quellenangaben**

Anbergen, H.: Prüfverfahren zu Bestimmung des Frost-Tau-Wecheleinflusses auf Hinterfüllmaterialien für Erdwärmesonden, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, (2015)

Anbergen, H., Frank, J., Albrecht, I. & Dittrich, H.: Prüfwelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechselwiderstands von Verpressmaterial für EWS, bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 2011/09, (2015a), 60-67.

Anbergen, H., Frank, J., & Dittrich, H.: Praxistaugliche Qualitätskontrollen der Hinterfüllung geothermischer Bohrungen, bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 2015/10, (2011), 38-43.

Anbergen, H., Frank, J., Müller, L. & Sass, I.: Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties, Geotechnical Testing Journal, 37 (4), (2014), 639-651

Anbergen, H., Frank, J., Reuß, M., Kuckelkorn, J.M., Müller, L. & Sass, I.: Hydraulische Integrität des Systems Erdwärmesonde, bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 2015/02, (2015b), 34-41

BSU: Vorgaben der BSU zur Frost-Stau-Wechselprüfung von Hinterfüllmaterialien, <http://www.hamburg.de/contentblob/3736820/data/pruefverfahren.pdf>, (Zugriff 27.10.2014), (2014)

DGG & DGGT: Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie, Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Qualitätssicherung, DGG & DGGT (Hrsg.), Berlin, (2014)

DIN 12390-2: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen, Deutsches Institut für Normung, Berlin, (2009)

DIN 12390-2B1: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen, Berichtigung zu DIN EN 12390-2:2009-08, Deutsches Institut für Normung, Berlin, (2011)

DVGW W-116: Verwendung von Spülungszusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser, Technische Mitteilung Merkblatt W 116, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn, (1998)

DVGW W-123: Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen, Technische Regel Arbeitsblatt W 123, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn, (2001)

Frank, J. & Albrecht, I.: Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost-Tauwechsel, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2010, (2010).

Haist, M., Eckhardt, J.-D. & Schlager, P.: Entwicklung eines Prüfkonzpts für zementäre Erdwärmesondenverfüllbaustoffe, Vortrag, Geotherm 2015, Offenburg, (2015)

Kuckelkorn, J. M. & Reuß, M.: Untersuchung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2010, (2010).

Müller, L.: Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2009, (2009).

Rolker, J. & Riegger, M.: EWS-tech, Projektübersicht und erste Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von EWS, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2014, (2014)

Seibel, M.: Abgrenzung der 'allgemein anerkannten Regeln der Technik' vom 'Stand der Technik', Neue Juristische Wochenschrift, 41, (2013), 3000-3004

VDI 4640-2 (Gründruck): Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Anhang C, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, (2015)

VDZ B5: Überwachen von Beton auf Baustellen, Zement-Merkblatt Betontechnik B 5, Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.), Düsseldorf, (2014)

APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH, Götzenbreite 12, 37124 Rosdorf  
[hanbergen@wille-geotechnik.com](mailto:hanbergen@wille-geotechnik.com)