

## Hydraulische Integrität des Systems Erdwärmesonde

**Hauke Anbergen, Manfred Reuß, Jens M. Kuckelkorn, Jens Frank, Lutz Müller und Ingo Sass**

Technische Universität Darmstadt, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V., Hochschule Ostwestfalen-Lippe und Frank GeoConsult GmbH

**Keywords:** Frost-Tau-Wechsel, Systemdurchlässigkeit, Hinterfüllmaterial, Erdwärmesonde

### Zusammenfassung

Die Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden (EWS) ist seit Jahren Gegenstand von Forschung und Diskussionen. In dem Beitrag werden die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Systemdurchlässigkeit von EWS vergleichend gegenübergestellt. Der Lastfall zyklischer Frost-Tau-Beanspruchung und dessen Auswirkung auf die vertikale Systemdurchlässigkeit von EWS wird qualitativ und quantitativ bewertet. Neben den bisherigen Untersuchungen zur Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen wird der Stand der Forschung dargestellt. Dieser beinhaltet einen Technikumversuchsstand des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e. V. und ein Laborprüfverfahren der Kooperationspartner Technische Universität Darmstadt, Hochschule Ostwestfalen-Lippe und Frank GeoConsult. Die Messprinzipien der beiden Verfahren werden vorgestellt und die Untersuchungsergebnisse diskutiert. Als Ausblick wird die angestrebte Untersuchungskampagne zum Vergleich der beiden Messverfahren skizziert.

### 1. Einleitung

Für die Beurteilung der hydraulischen Integrität von Erdwärmesonden (EWS) ist eine systemische Betrachtung zwingend erforderlich. Die hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen Komponenten haben zwar großen Einfluss, jedoch ist das Zusammenwirken im System entscheidend für den tatsächlichen Fließwiderstand (Kuckelkorn & Reuß 2010). Dabei stellt die Kontaktfläche von hydrophoben Kunststoffoberflächen (Sonde) und der hydrophilen Hinterfüllsuspension eine präferierte Wasserwegsamkeit dar. In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Untersuchungskonzepte mit dem Ziel, zuverlässige Aussagen zum hydraulischen Verhalten von EWS treffen zu können, entwickelt. Die maßgebliche Versuchsrandbedingungen wie einer thermischen Belastung von innen nach außen, der Verhinderung von Randumläufigkeiten am Außenrand der Proben und die Erfassung der präferierten Fließwege entlang des Sondenrohres müssen dabei umgesetzt werden, um die tatsächlichen *in-situ*-Randbedingungen zu simulieren (Anbergen et al. 2011). Die Randbedingungen sind aus dem konstruktiven Aufbau und dem Betrieb von EWS abgeleitet.

### 2. Erdwärmesonden

#### 2.1 Aufbau und Funktion

Die Mehrheit der in Deutschland errichteten EWS sind vertikale Doppel-U-Sonden. Als Sondenmaterial wurde und wird meistens eine Polyethylenvariante verwendet. In den vergangenen Jahren wurde häufig hochdichtes Polyethylen (HDPE) eingesetzt. Das Sondenbündel wird in ein Bohrloch von oben eingelassen und im Anschluss von unten nach oben mit einer Hinterfüllsuspension verfüllt. Ein schematischer Vertikalschnitt durch eine EWS ist in Abb. 1 dargestellt.

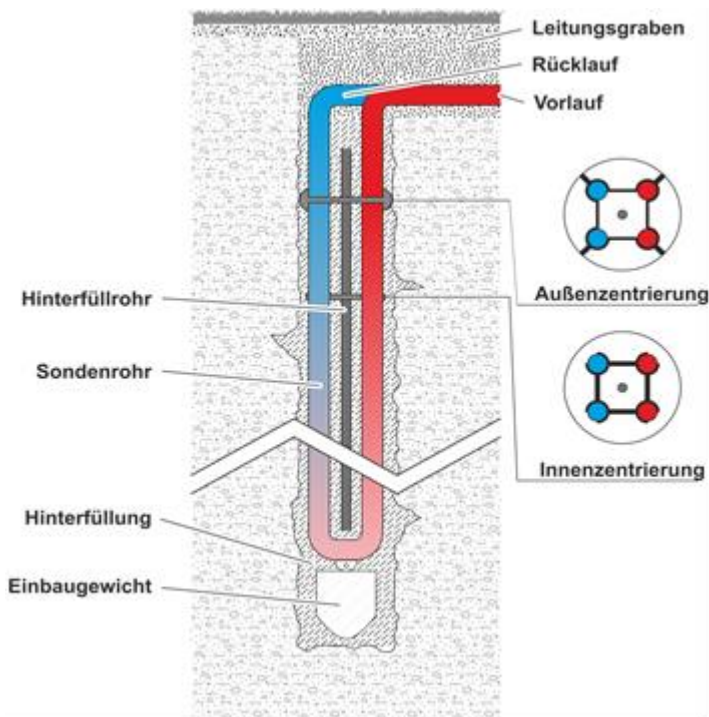


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer hinterfüllten Doppel-U-Sonde (DGG & DGGT 2014).

Als Hinterfüllsuspension werden i. d. R. zementbasierte Gemische verwendet, welche durch Wasserzugabe zu einer Suspension angemacht werden. Nach der VDI-Richtlinie 4640-2 (2001) werden Gemische aus Wasser, Zement, Sand, Bentonit empfohlen. Die Gemische werden entweder als eine Fertigmischung aus Trockensubstanz auf die Baustelle angeliefert oder erst auf der Baustelle aus Einzelkomponenten vermengt (Baustellenmischungen). Dabei stellt die Verwendung von Fertigmischungen aus Gründen der Qualitätssicherung meist die favorisierte Variante dar.

Die erhärtete Hinterfüllung soll zum einen eine gute thermische Anbindung der Sonde an den Untergrund sicherstellen, zum anderen soll die Hinterfüllung der EWS einen möglichst hohen Fließwiderstand aufweisen (VDI 4640-2 2001). Aus grundwasserhydraulischer Sicht ist die Forderung nach einem möglichst hohen Fließwiderstand bezüglich der Beeinträchtigung von Aquiferen und der Genehmigungsfähigkeit von EWS-Bohrungen von hoher Relevanz.

## 2.2 Systemdurchlässigkeit

Bei der Betrachtung der hydraulischen Integrität von EWS sind grundsätzlich zwei Fließrichtungen von Interesse, zum einen die radiale, zum anderen die axiale Fließrichtung.

Die radiale Fließrichtung ist für eine eventuelle Leckage der Sonde von Bedeutung. Bei einem eventuellen Austritt der Wärmeträgerflüssigkeit stellt die Hinterfüllung einen Fließwiderstand dar, der die Austrittsmenge verringern kann. Dieses hängt maßgeblich von der Sondenlage, sowie der Wasserdurchlässigkeit des Materials ab.

Bei der Durchörterung von Grundwasserstauern ist die axiale Fließrichtung von großem Interesse, wie in Abb. 2 dargestellt.

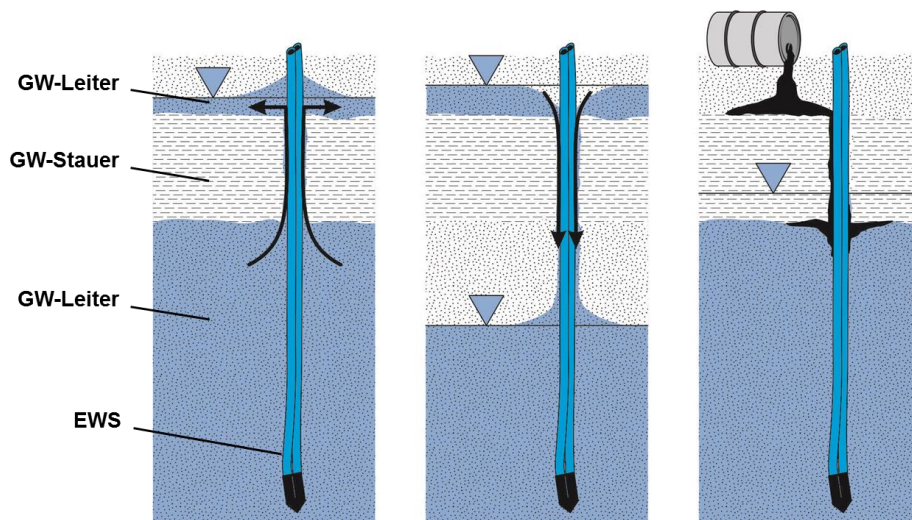


Abb. 2: Mögliche Szenarien erhöhter axialer Wasserwegsamkeiten bei vertikalen EWS (nach DGG & DGGT 2014).

Eine EWS stellt einen Bereich mit einem potenziell niedrigeren Fließwiderstand als das umgebende Gebirge dar. Daher ist eine Betrachtung der axialen Durchlässigkeit des Systems EWS erforderlich. Baumann et al. (2003) haben in einer Studie die Systemdurchlässigkeit von hinterfüllten Brunnenbauwerken untersucht und dabei festgestellt, dass die Systemdurchlässigkeit höher als die Materialdurchlässigkeit des Hinterfüllbaustoffes ist. Der Bereich der höchsten Durchlässigkeit ist die Kontaktzone zwischen Hinterfüllbaustoff und Kunststoffrohr (Abb. 3).

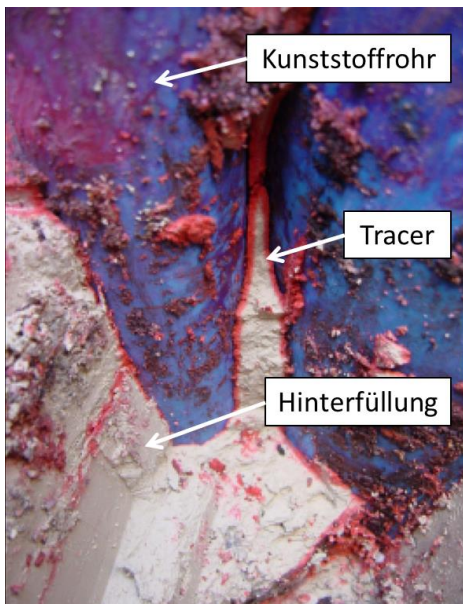


Abb. 3: Verfärbungen der präferierten Fließwege entlang der Kunststoffrohre nach einem in-situ Tracerversuch von Baumann et al. (2003).

Daher muss bei der Bewertung der hydraulischen Integrität von EWS das System Sonde-Hinterfüllung betrachtet werden. Die Kontaktfläche zwischen der Hinterfüllung und dem umgebenden Boden resp. Gebirge stellt den unkritischeren Bereich dar (Baumann et al. 2003).

## **2.3 Betriebsbedingte Einflüsse auf die Systemdurchlässigkeit**

Erdwärmesonden werden i. d. R. taktweise und in Kombination mit Wärmepumpen betrieben. Dadurch wirken stark schwankende Temperaturen auf die Sonde, die Hinterfüllung und das umgebende Gebirge. Ein besonders kritischer Lastfall ist der zeitweise hohe Wärmeentzug mit negativen Wärmeträgerfluidtemperaturen, welcher potenziell zu Frostereignissen in der Hinterfüllung führen kann. Dieses Phänomen wird allgemein als Frost-Tau-Wechsel (FTW) bezeichnet. Bassetti et al. (2006) haben eine Vielzahl von Schadensfällen dokumentiert, welche durch FTW hervorgerufen wurden. Bei einem nicht ausreichenden Frostwiderstand des Hinterfüllmaterials kann es zu einem Verlust der hydraulischen Integrität der EWS kommen und ggf. zu einem unplanmäßigen Grundwasser- und Stofftransport (s. a. Abb. 2). Wenn FTW-Ereignisse nicht ausgeschlossen werden können, muss sichergestellt werden, dass die Hinterfüllung im System EWS seine hydraulische Funktion nicht verliert. Daher muss bei der Eignungsprüfung von Hinterfüllmaterialien für EWS die Systemdurchlässigkeit in diesem Fall nach FTW-Belastungen geprüft werden.

## **3. Prüfung der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden**

### **3.1 Bisherige Untersuchungskonzepte**

Für die Prüfung der Durchlässigkeit von Hinterfüllbaustoffen für EWS und die Auswirkungen von FTW-Belastungen wurden bis dato keine allgemein gültigen Normen etabliert (Anbergen et al. 2014). Daher wurde in Deutschland für die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit die DIN 18130-1 (1998) für die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit von Böden angewendet. Frost-Tau-Wechseluntersuchungen wurden meist in Anlehnung an die Normen für Betone und Naturstein durchgeführt (Müller 2004, 2009). Die bisherigen Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten von hinterfüllten EWS legten meist den Fokus auf die Durchlässigkeit des Hinterfüllmaterials. In nationalen und internationalen Regelwerke wurden daher Grenzwerte für die hydraulische Durchlässigkeit des Hinterfüllmaterials etabliert (u. a. Skouby 2010, EA UK 2013, DGG & DGGT 2014).

Für die Beurteilung der hydraulischen Integrität einer hinterfüllten EWS ist jedoch das System zu betrachten (Frank & Albrecht 2010, Kuckelkorn & Reuß 2010).

### **3.2 Aktuelle Versuchskonzepte**

#### **3.2.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau**

Für die Beurteilung der Systemdurchlässigkeit von hinterfüllten Sondensystemen ist es erforderlich, Prüfkörper zu verwenden, welche die tatsächlichen Randbedingungen realer EWS repräsentieren. Das bedeutet, dass die Einbindung von Sondenrohren in einen Hinterfüllbaustoff zwingend erforderlich ist. Bei der Materialwahl ist darauf zu achten, dass die tatsächlichen Oberflächeneigenschaften wie bei realen Sonden eingehalten werden. Die meisten EWS wurden mit Sonden aus hochdichtem Polyethylen (HDPE) und glatter Oberfläche hergestellt. Zur Simulation der Sondenrohre in System-Prüfkörpern sollte mindestens dieses Material eingebaut und geprüft werden.

Weiterhin muss eine geeignete Prüfeinrichtung folgende Grundanforderungen erfüllen:

- 1) Es muss die Wasserdurchlässigkeit des Systems gemessen werden.
- 2) Es muss die Wasserdurchlässigkeit des Systems nach FTW-Simulation gemessen werden.
- 3) Für die Simulation von Frost-Tau-Wechsel muss die Durchfrostung von innen nach außen erfolgen.

- 4) Die Prüfkörper müssen während des gesamten Prüfablaufs in der Messapparatur unter definierten Spannungsrandbedingungen verbleiben.

Diese Anforderungen wurden in einem Technikumversuchsstand und in einem Laborprüfverfahren umgesetzt. Die beiden Versuchseinrichtungen werden nachfolgend beschrieben.

### 3.2.2 Technikumversuchsstand

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden“ (Förderkennzeichen 0327453A) wurde am ZAE Bayern ein Verfahren zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit des Gesamtsystems unter realen Betriebsbedingungen entwickelt. Hierzu wurde ein Großversuchsstand zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen errichtet (Kuckelkorn et al. 2010, Reuß & Kuckelkorn 2011) und komplette EWS-Systemproben mit unterschiedlichen Baustoffmischungen vermessen (Kuckelkorn & Reuß 2010, 2012, 2013).

Der Probenkörper besteht aus einer circa 3,5 m langen, funktionsfähigen Doppel-U-Sonde, die mit exakt nach Herstellerangaben hergestelltem Hinterfüllmaterial von unten nach oben in ein Kunststoffrohr eingegossen wird. Der simulierte Bohrlochdurchmesser beträgt 150 mm und das Kunststoffrohr ist von innen besandet, wodurch die Rauigkeit der Bohrlochwand abgebildet werden soll. Dadurch werden versuchsbedingte Randumläufigkeiten entlang der Außenwandung weitestgehend verhindert. Die Unterwasserlagerung und Aushärtung des Probenkörpers erfolgt in einem Probenlager (Abb. 4).

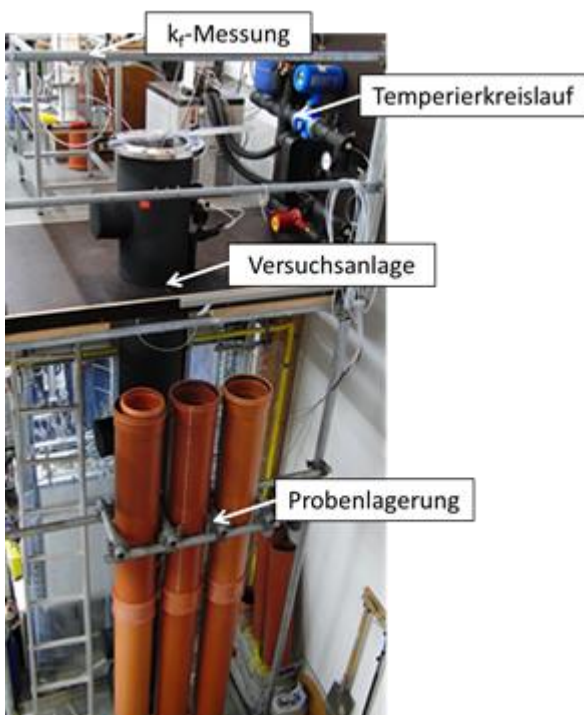


Abb. 4: Versuchsaufbau zur Vermessung von EWS-Systemproben im Labor des ZAE Bayern.

Die ausgehärtete Systemprobe wird zunächst in einen auf 16 bar ausgelegten Druckbehälter eingebaut. Danach wird der komplette Versuchsaufbau inklusive Systemprobe entlüftet, in Anlehnung an die DIN 18130-1 (1998) mit einem Sättigungsdruck von 9 bar aufgesättigt und dann bei einem konstanten hydraulischen Gefälle (bis zu 5 bar Differenzdruck), das zwischen dem

wasserdurchlässigen Sondenfuß und dem abgedichteten Volumen am Sondenkopf aufgebaut wird, vermessen. Dazu wird das durch die Messstrecke von circa 2,75 m fließende Wasservolumen elektronisch erfasst und der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des Systems in Anlehnung an DIN 18130-1 (1998) ermittelt.

Um den Einfluss von Frost-Tau-Wechseln oder hohen Temperaturgradienten zu ermitteln, werden die Systemproben definiert thermisch beansprucht und anschließend erneut vermessen. Der Versuchsstand ermöglicht, wie im realen Betrieb, ein Durchfrieren des Hinterfüllbaustoffs mit standardisierten Frost-Tau-Zyklen (Abb. 5) von innen heraus über die Sondenrohre. Durch die Bohrlochwand und den Zellentdruck wird das Hinterfüllmaterial mechanisch stabilisiert.

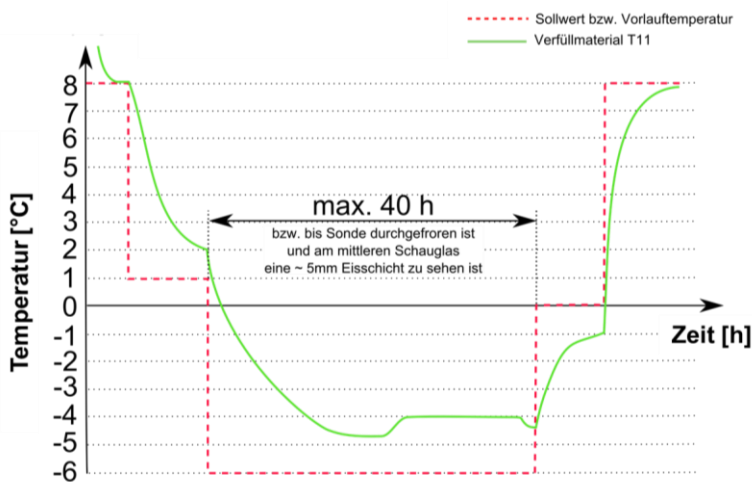


Abb. 5: Schema zum Gefrierzyklus. Dargestellt ist die Sondeneintrittstemperatur (gestrichelte Linie) des standardisierten Gefrierzyklus sowie die resultierende Temperatur an einem exemplarischen Fühler, der wenige Zentimeter vom Sondenrohr entfernt im Hinterfüllmaterial eingebaut wird.

Eine Temperiereinrichtung ermöglicht die definierte thermische Beanspruchung der Systemprobe mit Fluidtemperaturen im Bereich von  $-10\text{ °C}$  bis  $+80\text{ °C}$ . Der thermisch isolierte Druckbehälter ermöglicht eine nahezu konstante Temperaturverteilung während der Aufsättigung und der Durchlässigkeitsmessung. An verschiedenen Stellen in der Probe und im Druckbehälter werden Temperaturen aufgenommen und ausgewertet. Um eine möglichst präzise Volumenmessung (Zylinder mit Wegaufnehmer) zu gewährleisten, befindet sich die Volumenmeseinrichtung ebenfalls in einer temperierten Kammer. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 6 dargestellt.

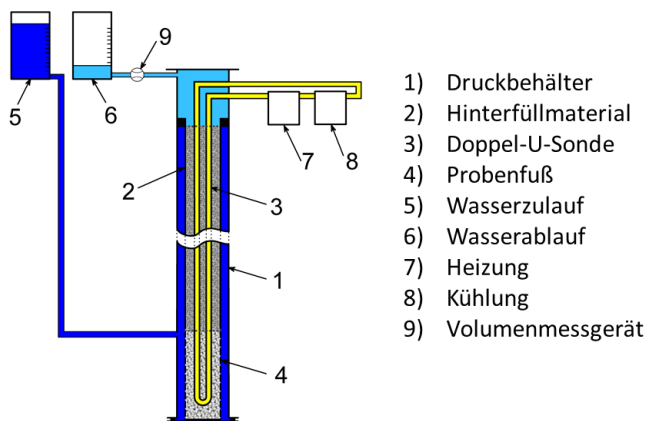


Abb. 6: Schematischer Aufbau des Großversuchsstandes zur Vermessung von EWS-Systemproben.



### 3.2.3 Laborversuchsstand

In Rahmen von Entwicklungsaufträgen der Freien und Hansestadt Hamburg wurde ein Laborprüfverfahren für die Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf die Hinterfüllung von EWS entwickelt und wissenschaftlich durch eine Dissertation im Forschungsverbund Technische Universität Darmstadt, Hochschule Ostwestfalen-Lippe und Frank GeoConsult GmbH begleitet. Die entwickelte Frost-Tau-Wechselmesszelle basiert auf einer Triaxialzelle gemäß DIN 18130-1 (1998), welche in der Lage ist die Systemdurchlässigkeiten von Prüfkörpern vor und nach zyklischen Frost-Tau-Belastungen zu ermitteln. Durch die Abmessungen, welche derer üblicher Triaxialzellen entspricht, kann das Messverfahren in Erdbaulabore implementiert werden, welche Durchlässigkeitsversuche der Versuchsklasse 1 durchführen können (Anbergen et al. 2011). Die Messzelle ist in Abb. 7 abgebildet.

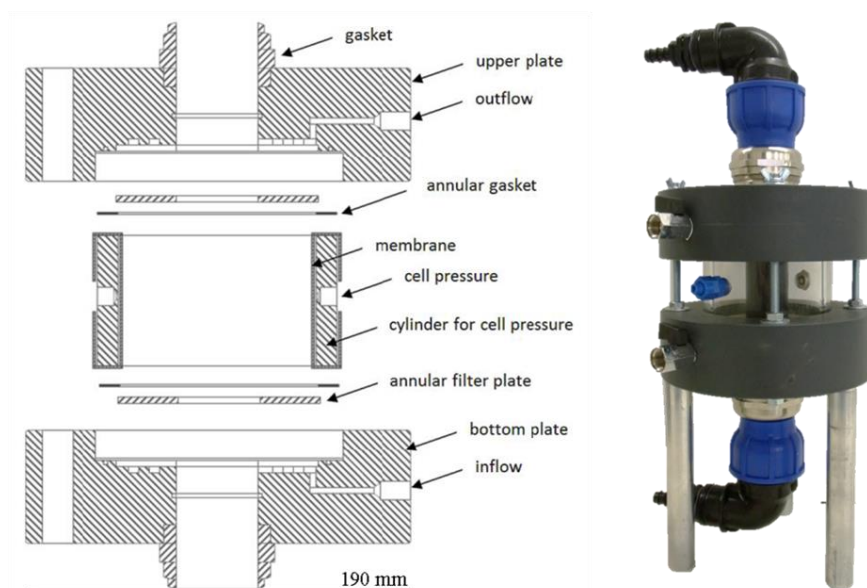


Abb. 7: Messzelle zur Bestimmung der Systemdurchlässigkeit vor und nach Frost-Tau-Wechselbelastungen (links: Explosionszeichnung, rechts: Fotografie) (Anbergen et al. 2014).

Die Prüfkörper für die Messzelle bestehen aus einem mittigen HDPE-Rohr, welche in einen zylindrischen Hinterfüllkörper eingegossen wurden. Die Abmessungen der Prüfkörper wurden maßstabsgetreu zu üblichen EWS (Doppel-U-Sonde 4 x 32 mm in einem Bohrloch 150 – 180 mm Durchmesser) konzipiert, sodass die Systemdurchlässigkeiten korrekt erfasst werden (Anbergen et al. 2014). Weiterhin werden die Prüfkörper bei in-situ-Temperaturen und unter Verdunstungsschutz gelagert und so der tatsächliche Abbindeprozess in den grundwasserstauenden Schichten zu simuliert. Die Prüfkörper binden vor der Prüfung ab (i.d.R. 28 bzw. 56 Tage). Anschließend werden die Prüfkörper in die Messzellen eingebaut, aufgesättigt und gemäß DIN 18130-1 (1998) radial über eine Membrane durch einen Zelldruck ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) belastet. Dadurch wird der Prüfkörper stabilisiert und Randumläufigkeiten verhindert. Das mittige HDPE-Rohr wird an einen Temperierkreislauf angeschlossen, so dass die Durchfrostung von innen nach außen realisiert werden kann (Anbergen et al. 2012). Der schematische Aufbau der Prüfanlage ist in Abb. 8 dargestellt.

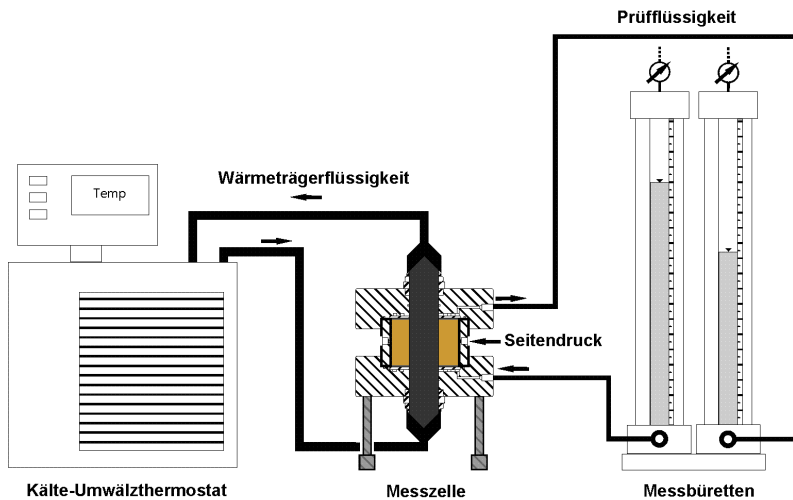


Abb. 8: Schematischer Aufbau des Laborversuchstandes (nach Anbergen & Sass 2013).

Somit kann die Systemdurchlässigkeit vor und nach FTW-Belastungen in der Messzelle ermittelt werden, ohne dass die Probe ausgebaut werden muss, was potenziell zu Störungen führen könnte. Aufgrund der Prüfkörperabmessung gemäß DIN 18130-1 (1998) ist eine praktikable Ermittlung der Systemdurchlässigkeiten möglich. Das Prüfverfahren wurde von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Hansestadt Hamburg als behördlich anerkanntes Prüfverfahren verbindlich eingeführt (Anbergen et al. 2013).

#### 4. Ergebnisse

Im Rahmen der unabhängig voneinander durchgeführten Untersuchungen wurden diverse Prüfkörper auf deren Systemdurchlässigkeit vor und nach FTW-Belastungen geprüft. In dem Technikumversuchsstand wurden 4 Proben geprüft (Kuckelkorn 2013). Von den Laborergebnissen werden die Ergebnisse der Produkte dargestellt, welche in Hamburg eine Zulassung als FTW-beständige Hinterfüllmaterialien haben (Stand Juni 2014). Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist Abb. 9 zu entnehmen.

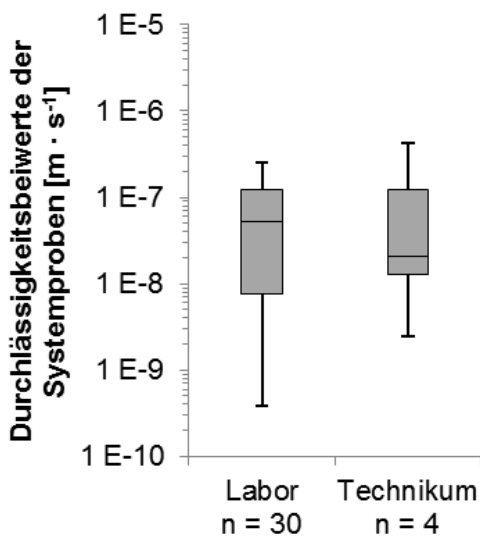


Abb. 9: Gegenüberstellung der ermittelten Durchlässigkeiten der Systemproben. Dargestellt ist die statistische Verteilung der  $k_{f10}$ -Werte von Proben ohne Beeinträchtigung durch Frost-Tau-Wechsel.



Es ist ersichtlich, dass die Systemdurchlässigkeiten der Laborproben und der Technikumsproben in einem ähnlichen Bereich liegen. Das Gros der ermittelten Systemdurchlässigkeit (25 %- und 75 %-Quartil) der beiden Prüfkörperkonzepte, welche reale EWS simulieren sollen, liegen in einem schwach durchlässigen Durchlässigkeitsbereich zwischen  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Die Systemdurchlässigkeiten weisen höhere Werte als die Durchlässigkeitsbeiwerte der reinen Hinterfüllmaterialien auf. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde ein relativer Durchlässigkeitsanstieg definiert (Gl. 1),

$$k_{rel, Sys} = \frac{k_{f, Sys} - k_{f, Mat}}{k_{f, Mat}} \quad (1)$$

wobei  $k_{rel, Sys}$ ,  $k_{f, Sys}$ ,  $k_{f, Mat}$  für den relativen Anstieg der Durchlässigkeit zwischen Material und Systemprobe, die Durchlässigkeit der Systemprobe und die Durchlässigkeit der Materialprobe stehen.

Über den relativen Anstieg der Durchlässigkeit wird verdeutlicht, welchen Einfluss die Sonde im Hinterfüllkörper auf die Wasserdurchlässigkeit hat. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 vergleichend gegenübergestellt.

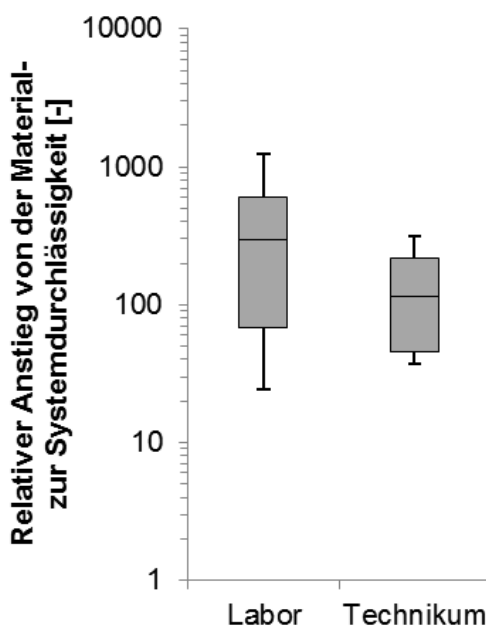


Abb. 10: Relativer Anstieg der Systemdurchlässigkeit aufgrund von mehrfacher FTW-Belastung.

Es ist zu erkennen, dass die Systemdurchlässigkeit um circa zwei Zehnerpotenzen höher ist, als die reine Materialdurchlässigkeit. Wiederum liegen die Ergebnisse der beiden Versuchskonzepte in einem ähnlichen Bereich.

Für die Beurteilung des Einflusses zyklischer Durchfrostungen auf die Systemdurchlässigkeit von EWS wurde ein relativer frostbedingter Anstieg definiert (Gl. 2),

$$k_{rel,FTW} = \frac{k_{f,FTW} - k_{f,Sys}}{k_{f,Sys}} \quad (2)$$

wobei  $k_{rel,FTW}$ ,  $k_{f,Sys}$ ,  $k_{f,FTW}$  für den relativen Anstieg der Durchlässigkeit aufgrund von FTW, die Durchlässigkeit der Systemprobe vor FTW-Belastung und die Durchlässigkeit der Systemprobe nach FTW-Belastung stehen.

Für die Auswertung wurden die Systemdurchlässigkeiten vor und nach mindestens sechs FTW-Belastungen gewählt, da die ersten FTW den größten Einfluss auf die Durchlässigkeit haben (Anbergen et al. 2011, Kuckelkorn & Reuß 2011).

Die Gegenüberstellung der frostbedingten Anstiege der Systemdurchlässigkeiten sind der Abb. 11 zu entnehmen.

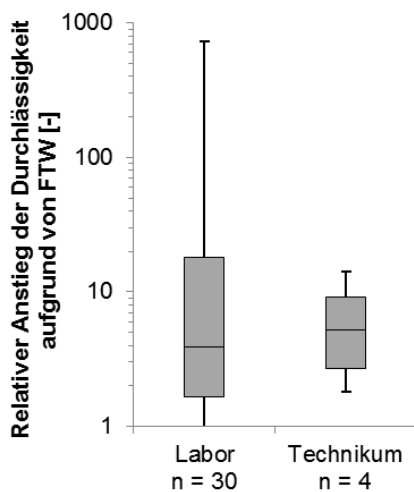


Abb. 11: Relativer Anstieg der Systemdurchlässigkeit aufgrund von mehrfacher Frost-Tau-Wechsel-Belastung.

Es ist ersichtlich, dass es zu einem Anstieg der Systemdurchlässigkeit aufgrund der FTW-Belastungen kommt. Wiederum liegen die Medianwerte der beiden Versuchskonzepte in einem ähnlichen Bereich. Da der Frostwiderstand jedoch materialabhängig ist, streuen die Ergebnisse der Produkte. Die Messungen der gleichen Produkte jedoch nur geringfügig.

## 5. Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass bei den beiden vorgestellten Versuchsaufbauten ein ähnliches Systemverhalten beobachtet wurde. Bei den relativen Betrachtungen (Abb. 10 und 11) ist zu beachten, dass ein hoher relativer Anstieg trotzdem einen absolut niedrigen Durchlässigkeitsbeiwert bedeuten kann. Daher muss im Einzelfall stets das absolute Durchlässigkeitsniveau mit einbezogen werden.

Die vorliegenden Ergebnisse wurden an Proben unterschiedlicher Materialien durchgeführt. Daher können mit dem vorliegenden Vergleich lediglich grundlegende Tendenzen abgeleitet werden. Für Aussagen über das Verhalten einzelner Materialien müssen weitere Auswertungen durchgeführt werden. Für einen direkten Vergleich der Versuchsaufbauten müsste in einem Versuchsprogramm die Probenherstellung, die Abbindebedingungen und die Versuchsdurchführung weitestgehend gleichgestellt werden.

Dabei würden auch die Sondentemperaturen während der Frost-Tau-Zyklen gleichgestellt werden, da bisher der Technikumversuchsstand mit -6 °C und der Laborversuchsstand mit -10 °C Sondereintrittstemperatur betrieben wurde.

## 6. Schlussfolgerungen

Es lassen sich eindeutige Tendenzen aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse der beiden Verfahren ableiten:

- 1) Die Systemdurchlässigkeiten sind höher als die Materialdurchlässigkeiten der zugehörigen Hinterfüllmaterialien. Die Systemdurchlässigkeiten der untersuchten Materialien in Verbindung mit glatten HDPE-Rohren sind als schwach durchlässig einzuordnen.
- 2) Frost-Tau-Wechselbelastungen führen zu einem Anstieg der Systemdurchlässigkeit. Dieser liegt bei den hier untersuchten Materialien meist in einem Bereich von einer Zehnerpotenz.

Mit den vorgestellten Versuchsaufbauten lassen sich Systemdurchlässigkeiten vor und nach FTW-Belastungen messtechnisch erfassen, wodurch die Beurteilung der hydraulischen Integrität des Systems EWS ermöglicht wird.

## 7. Ausblick

Um die Vergleichbarkeit der ermittelten Systemdurchlässigkeiten vor und nach FTW-Belastungen der beiden Prüfverfahren zu untersuchen, wird ein gemeinsames Untersuchungsprogramm angestrebt. Dabei sollen an einem Standort Prüfkörper mit dem gleichen Hinterfüllbaustoff und Sondenmaterial hergestellt werden. Die Hinterfüllsuspension der Prüfkörper soll dabei aus einer Charge stammen, sodass gleiche Rahmenbedingungen geschaffen werden. Diese Prüfkörper härten unter gleichen Bedingungen aus und werden zeitgleich in die jeweiligen Prüfapparaturen eingebaut und geprüft. Die ermittelten Systemdurchlässigkeiten werden mit weiteren Untersuchungen verglichen. Ziel ist es, neben der Etablierung eines allgemein anerkannten Prüfverfahren, praxistaugliche Sondenmaterialien zu entwickeln, die eine Verbesserung der Systemdurchlässigkeit erbringen.

## Quellenangaben

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*, 2011/10, (2011), 38-43.

Anbergen, H., Frank, J. & Sass, I.: Quality assurance of grouting for Borehole Heat Exchangers, *Tagungsband*, 12th International Conference on Energy Storage - InnoStock 2012, Lleida, Spanien, (2012).

Anbergen, H., Frank, J., Müller, L. & Sass, I.: Prüfverfahren zur Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden, *Geothermische Energie*, 75, (2013), 18-19.

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. & Sass, I.: Freeze-Thaw-Behaviour: Observations in Grouted Borehole Heat Exchangers, *Tagungsband*, 38<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, USA, (2013).

Baumann, K., Niehues, B., Tholen, M. & Treskatis, C.: Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätskriterien für Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau, Abschlussbericht, Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. - DVGW, Bonn, (2003).

Bassetti, S., Rohner, E., Signorelli, S. & Matthey, B.: Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden - Schlussbericht, Geothermie Report 99995, Schweiz.

- DGG & DGGT.: Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie – Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb, Qualitätssicherung, Version der Offenlegung, Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaft e.V. (DGG) und Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (Hrsg.), Ernst & Sohn, Berlin, (2014).
- DIN 18130-1: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 1: Laborversuche. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg.], Beuth Verlag, Berlin, (1998).
- UK EA: Environmental good practice guide for ground source heating and cooling, United Kingdom Environmental Agency, Bristol, Großbritannien, (2010).
- Frank, J. & Albrecht, I: Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost-Tauwechsel, *Tagungsband*, Der Geothermiekongress 2010, (2010).
- Kuckelkorn, J. M.: Systemdichtheit von Verfüllbaustoffen, *Tagungsband*, 12. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI, Regensburg, (2013).
- Kuckelkorn, J. M., Biank, M. & Reuß, M.: Großversuchsstand zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen, *Tagungsband*, 10. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI, Regensburg, (2010).
- Kuckelkorn, J. M. & Reuß, M.: Untersuchung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen, *Tagungsband*, Der Geothermiekongress 2010, (2010).
- Kuckelkorn, J. M. & Reuß, M.: Methodik und Ergebnisse zur hydraulischen Durchlässigkeit von Verfüllbaustoffen bei Erdwärmesonden - Bestimmung des kf-Wertes und Alterung von Erdwärmesonden-Systemen in einem Großversuchsstand, *Tagungsband*, 3. VDI-Fachkonferenz Wärmepumpen, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, (2012).
- Kuckelkorn, J. M. & Reuß, M.: Hydraulische Systemdichtheit und Frostbeständigkeit von Erdwärmesonden, *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, Sonderheft Geothermie, (2013), 6-13.
- Müller, L.: Geotechnische Untersuchungen zur Optimierung der geotechnischen Energiegewinnung mit Erdwärmesonden“, In: Mitt. Ingenieur- und Hydrogeologie, H. 89, , RWTH Aachen, (2004), 49-58.
- Müller, L.: Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden, *Tagungsband*, Der Geothermiekongress 2009, (2009).
- Reuß, M. & Kuckelkorn, J. M.: Verfahren zur Bewertung der Abdichtung von Erdwärmesonden mit Verfüllbaustoffen, *Tagungsband*, 11. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI, Regensburg, (2011).
- Skouby, A. (Ed.): Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems – Design and Installation Standards 2010 Edition, International Ground Source Heat Pump Association, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA, (2010).
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N.: Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden, Technischer Endbericht. Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Umwelt- u. Wasserwirtschaft [Hrsg.], Linz, (2008).
- VDI 4640-2.: Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure [Hrsg.], Beuth Verlag, Berlin, (2001).