Prüfbericht

Untersuchung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstandes des Hinterfüllmaterials Calidutherm Öko

21. Dezember 2015

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Prof. Dr. Ingo Sass
Markus Schedel, M.Sc.
TU Darmstadt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Fachgebiet Angewandte Geothermie
Schnittspahnstraße 9
64287 Darmstadt

Inhaltsverzeichnis

1. Veranlassung 2
2. Messverfahren 2
2.1. Verfahrensbeschreibung 2
2.2. Prüfkörperherstellung 2
2.3. Versuchsdurchführung 3
3. Ergebnisse 3
3.1. Ermittelte Systemdurchlässigkeiten 3
3.2. Visuelle Begutachtung 5
4. Bewertung der Ergebnisse 5
Literaturverzeichnis 7

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemdurchlässigkeiten in Anhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel-Simulationen. 4
Abbildung 2: Prüfkörper nach sechs FTW-Simulationen und konsekutiver Trocknung bei 105 °C (Aufsicht). 5

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Untersuchungen an der Hinterfüllsuspension des Materials Calidutherm Öko. 3
Tabelle 2: Auszug aus den ermittelten mittleren Systemdurchlässigkeiten und empirische Variationskoeffizienten (FTW 0 und FTW 6). 4

Anlagenverzeichnis

Versuchsdokumentation Anlage 1

1. Veranlassung

An der Technischen Universität Darmstadt wurde ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf die hydraulische Durchlässigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden entwickelt (Anbergen et al. 2014). Das Prüfverfahren wurde 2013 verbindlich von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) der Freien und Hansestadt Hamburg eingeführt (BSU 2013) und in die überarbeitete VDI-Richtlinie 4640-2 (Gründruck 2015) als zulässiges Prüfverfahren aufgenommen. Demnach sind in Hamburg nur solche Hinterfüllmaterialien für den Einsatz mit negativen Wärmeträgerfluidtemperaturen gemäß VDI-Richtlinie 4640-2 (2001) zugelassen, welche nach diesem Prüfverfahren getestet wurden und die Anforderungen der BSU erfüllen.

Die **Terra Calidus GmbH** hat das Fachgebiet Angewandte Geothermie der Technischen Universität Darmstadt mit der Prüfung des Hinterfüllmaterials **Calidutherm Öko** beauftragt. Mit diesem Prüfbericht werden die Ergebnisse der Prüfung übergeben und bewertet.

2. Messverfahren

2.1. Verfahrensbeschreibung

Für die Beurteilung der Eignung der hydraulischen Eigenschaften eines Materials für die Hinterfüllung von Erdwärmesonden (EWS) ist eine Betrachtung im System zwingend erforderlich. Dazu werden Prüfkörper hergestellt, die aus einem axialen Sondenrohrstück bestehen, das in einen zylindrischen Hinterfüllkörper eingebettet ist. Der Prüfkörper wird in eine modifizierte Wasserdurchlässigkeitszelle eingebaut (Anbergen et al. 2014) und von unten nach oben mit einer Prüfflüssigkeit (entionisiertem Wasser) durchströmt. Somit werden die präferierten Wasserwegsamkeiten in dem Bereich der Kontaktfläche Sondenrohr / Hinterfüllung miteinbezogen. Die ermittelte Durchlässigkeit der Prüfkörper stellt folglich eine Systemdurchlässigkeit dar. Die Bestimmung der Systemdurchlässigkeit erfolgt in Anlehnung an die einschlägigen Normen (DIN 18130-1 1998 und ASTM D-5084 2010).

Die Frost-Tau-Wechsel-Simulation erfolgt gemäß VDI 4640-2 Anhang C (Gründruck 2015). Die Temperierung der Prüfkörper (Durchfrostung) erfolgt über das axiale Sondenrohr von innen nach außen. Das Sondenrohr wird dabei wie in-situ von einem Wärmeträgerfluid durchströmt. Das Wärmeträgerfluid kommt in keinen direkten Kontakt mit dem Hinterfüllkörper. Über die Temperierung der Prüfkörper können die Prüfkörper durch Frost-Tau-Wechsel (FTW) belastet und der Einfluss auf die Systemdurchlässigkeit bestimmt werden. Während des gesamten Prüfablaufes verbleibt der Prüfkörper in der Messzelle unter definierten Spannungsrandbedingungen.

Das Verfahren entspricht somit den Voraussetzungen für die Beurteilung des Frost-Tau-Wechselwiderstands gemäß den Vorgaben der BSU Hamburg (BSU 2013) und VDI 4640-2 (Gründruck 2015).

2.2. Prüfkörperherstellung

Das Trockenmaterial für die Prüfkörperherstellung wurde von dem Hersteller geliefert. Das Material wurde vor Ort mit Leitungswasser (20 °C) zu einer Suspension angemacht. Dazu wurden Zugabewasser und Trockenmaterial eingewogen, in einem 5l-Gefäß vorgerührt und anschließend mit einem Wendelquirl bei 300 $U \cdot min^{-1}$ (Umdrehungen pro Minute) für fünf Minuten homogenisiert. In einem weiteren Arbeitsschritt wurde die Suspension umgetopft und erneut für zwei Minuten bei 300 $U \cdot min^{-1}$ gerührt. Es wurde ein Wasser-Feststoff-Wert von 0,4 angewendet. Das Vorgehen wurde mit dem Hersteller abgesprochen und dokumentiert.

An der Suspension wurden die Suspensionsdichte, die Trichterauslaufzeit (TAZ im Marsh-Trichter), das Absetzmaß sowie der pH-Wert bestimmt. Die Suspensionsdichte wurde mit der Spülungswaage und per Laborwaage und einem 1l-Gefäß bestimmt. Nach beiden Messverfahren ergab sich eine Suspensionsdichte von 1,79 kg · l^{-1}. Für die Bestimmung der Trichterauslaufzeit (TAZ) wurden Marsh-Trichter mit einem Auslaufdüsendurchmesser von 4,76 mm und 10,00 mm verwendet. Die Messung ergab bei Labortemperatur eine TAZ (Ø 4,76 mm) von 62 s sowie eine TAZ (Ø 10,00 mm) von 9 s. Somit erfüllt die Suspension die Empfehlungen des Arbeitskreises Geothermie von einer TAZ (Ø 4,76 mm) zwischen minimal 40 s und maximal 100 s (DGG & DGGT 2014). Die Messung des pH-Wertes der Suspension ergab einen pH-Wert von 13. Das stark basische Milieu bestätigt das Vorhandensein der Zementanteile.

Ein Liter der Suspension wurde in einen Standzylinder gefüllt. Der Zylinder wurde verschlossen um Feuchtigkeitsverluste zu vermeiden und bei Labortemperatur (20 °C) erschütterungsfrei gelagert. Nach 24 h wurde das Wasserabsetzmaß bestimmt. Dieses betrug 3,0 % und erfüllt damit die Forderungen des Arbeitskreises Geothermie von kleiner gleich drei Prozent nach 24 h (DGG & DGGT 2014). In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen an der Suspension zusammengefasst.

Tabelle 1: Ergebnisse der Untersuchungen an der Hinterfüllsuspension des Materials Calidutherm Öko.

Calidutherm Öko (W/F = 0,4)	
Suspensionsdichte	1,79 g · cm^{-3}
Trichterauslaufzeit (Ø 4,76 mm)	62 s
Trichterauslaufzeit (Ø 10,00 mm)	9 s
Absetzmaß (24 h)	3,0 %
pH-Wert	13

Aus der Suspension wurden drei Prüfkörper hergestellt und verdunstungsgeschützt bei 10 °C gelagert. Die Abbindezeit vor der Prüfung betrug 56 Tage.

2.3. Versuchsdurchführung

Zum Prüftermin wurden die Prüfkörper auf eine axiale Länge von 70 mm abgelängt (Hinterfüllkörper) und in die Messzellen überführt. Die Prüfkörper wurden mit einem Sättigungsdruck von 2000 mbar aufgesättigt und die hydraulische Durchlässigkeit in Anlehnung an DIN 18130-1 (1998) bestimmt. Der hydraulische Gradient wurde dabei gemäß ASTM D-5084 (2010) den jeweiligen Systemdurchlässigkeiten angepasst.

Nach der Bestimmung der Durchlässigkeit wurde das hydraulische Druckgefälle auf i = 0 eingestellt und die Prüfkörper von innen nach außen für 20 Stunden durchfrostet. Die Wärmeträgerfluidtemperatur wurde dabei auf -10 °C eingestellt. Die Temperaturen an den Außenseiten der Prüfkörper wurden messtechnisch überwacht. Anschließend wurden die Prüfkörper wieder aufgetaut mit einer Wärmeträgerfluidtemperatur von +8 °C. Nach Beendigung der FTW-Simulation erfolgte die erneute Ermittlung der Durchlässigkeit. Das Procedere wurde für sechs FTW-Simulationen durchgeführt.

3. Ergebnisse

3.1. Ermittelte Systemdurchlässigkeiten

Für die Ermittlung der Systemdurchlässigkeiten wurde ein Dreifach-Parallelversuch durchgeführt. Die Messergebnisse der drei Proben (A, B, C) sind in der Abbildung 1 grafisch dargestellt.

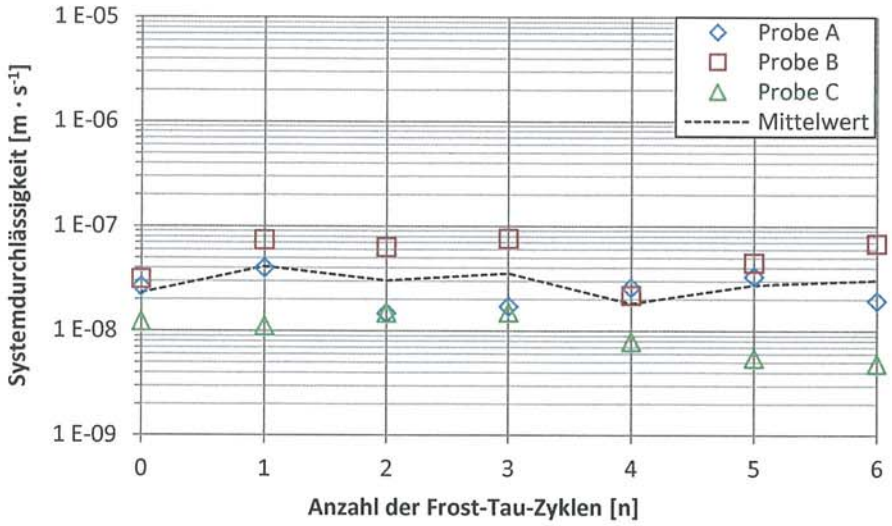


Abbildung 1: Systemdurchlässigkeiten in Anhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel-Simulationen.

Es ist ersichtlich, dass die Systemdurchlässigkeiten der drei Proben vor der FTW-Simulation in einem Bereich zwischen minimal $1 \cdot 10^{-8}$ m · s^{-1} und maximal $3 \cdot 10^{-8}$ m · s^{-1} liegen. Aufgrund der FTW-Simulationen kommt es zu einem geringen Anstieg der mittleren Systemdurchlässigkeiten. Die Systemdurchlässigkeit steigt im Mittel um circa 50 % an. Dabei verzeichnet nur Probe B einen Anstieg der Durchlässigkeit, wohingegen die Prüfkörper A und C insgesamt ein stabiles Systemdurchlässigkeitsverhalten aufweisen. Die genauen Prüfwerte können der Anlage 1 entnommen werden.

Der mittlere relative Anstieg der Systemdurchlässigkeit vom fünften zum sechsten FTW beläuft sich auf 11 % und liegt damit unter dem von der BSU Hamburg geforderten Maximalwert von 15 %.

Die statistische Auswertung der Versuchsserie wird über die gewichtete Standardabweichung durchgeführt. Dazu wird die Standardabweichung der Systemdurchlässigkeiten der drei Parallelversuche ermittelt und ins Verhältnis zum Mittelwert gesetzt. Dieser dimensionslose Wert wird als empirischer Variationskoeffizient (VC) bezeichnet. In der Tabelle 2 sind die mittleren Systemdurchlässigkeiten und empirischen Variationskoeffizienten vor der FTW-Simulation und nach dem sechsten FTW dargestellt. Die Variationskoeffizienten der einzelnen Dreifachversuche können der Anlage 1 entnommen werden.

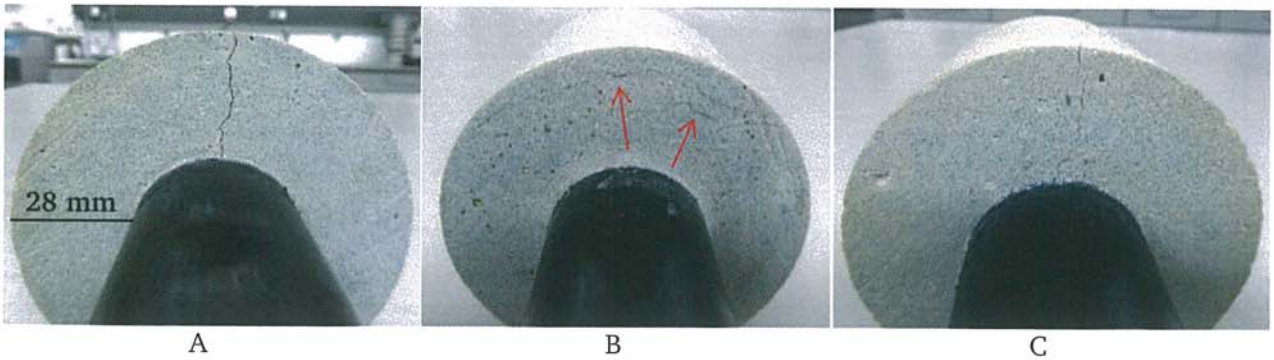
Tabelle 2: Auszug aus den ermittelten mittleren Systemdurchlässigkeiten und empirische Variationskoeffizienten (FTW 0 und FTW 6).

Anzahl der FTW-Simulationen [n]	Arithm. Mittelwert der Systemdurchlässigkeit [m · s^{-1}]	Empirischer Variationskoeffizient [-]
0	$2.3 \cdot 10^{-8}$	0,35
6	$3,1 \cdot 10^{-8}$	0,88

Der mittlere Variationskoeffizient nach sechs FTW-Simulationen beträgt 0,85. Trotz der relativ großen Streuung der Durchlässigkeit, lässt sich lediglich ein geringer FTW-Einfluss beobachten. Alle drei Prüfkörper verbleiben auf einem Durchlässigkeitsniveau unter $1 \cdot 10^{-7}$ m · s^{-1} und erfüllen die Anforderungen der BSU von einem Systemdurchlässigkeitsbeiwert geringer $5 \cdot 10^{-7}$ m · s^{-1}.
Weiterhin lässt sich keine weiter ansteigende Tendenz erkennen. Die Durchlässigkeiten der einzelnen Proben nach sechs FTW-Simulationen liegen unter den ermittelten Durchlässigkeiten nach der ersten FTW-Simulationen. Damit ist kein weiterer FTW-bedingter Anstieg der Systemdurchlässigkeit zu erwarten.

3.2. Visuelle Begutachtung

Nach den Systemdurchlässigkeitsuntersuchungen mit FTW-Simulationen wurden die Prüfkörper aus den Messzellen ausgebaut und in einem Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Die Trocknung dient dabei neben der Bestimmung des Trockengewichtes, dem Ausschluss von scheinbarer Kohäsion an möglichen Trennflächen entstandener Rissstrukturen. Durch die Kohäsion ist es möglich, dass im teilgesättigten Zustand die Risse nicht aufklaffen und somit unerkannt blieben. Im trockenen Zustand werden die Rissstrukturen durch das Aufklaffen und den höheren Kontrast zur Baustoffmatrix deutlich sichtbar. Die Prüfkörper wurden nach der Trocknung visuell begutachtet (Abbildung 2).



A B C

Abbildung 2: Prüfkörper nach sechs FTW-Simulationen und konsekutiver Trocknung bei 105 °C (Aufsicht).

Typische frostbedingte Rissstrukturen haben bei dem angewendeten Prüfverfahren einen konzentrischen Verlauf. Bei den hier geprüften Proben sind lediglich in Probe B geringfügige konzentrische Rissstrukturen zu erkennen (Abbildung 2 B). Dies korreliert mit der höchsten Systemdurchlässigkeit dieser Probe (nach 6 FTW). Die beiden deutlich sichtbaren radialen Risse in Probe A und C sind typische Trocknungsrisse, welche infolge der konsekutiven Trocknung bei 105 °C entstanden sind. Insgesamt ist die Rissstrukturenhäufung als gering einzustufen.

4. Bewertung der Ergebnisse

Die ermittelten Systemdurchlässigkeiten der Prüfkörper des Hinterfüllmaterials **Calidutherm Öko** lagen vor der Simulation von zyklischen Frost-Tau-Wechseln in einem Bereich von $2 \cdot 10^{-8}$ m · s^{-1}. Damit ist die wassergesättigte hydraulische Leitfähigkeit als schwach durchlässig, an der Grenze zum sehr schwach durchlässigen Bereich nach DIN 18130-1 (1998) einzustufen. Aufgrund der Simulation zyklischer Frost-Tau-Wechsel kommt es zu einem geringfügigen Anstieg der mittleren Systemdurchlässigkeit um circa 50 % auf eine mittlere Durchlässigkeit von $3 \cdot 10^{-8}$ m · s^{-1}. Die Systemdurchlässigkeit nach sechs Frost-Tau-Wechseln ist somit ebenfalls als schwach durchlässig einzustufen.
Das leichte Absinken der Durchlässigkeit von Probe A und Probe C im Verlauf der Prüfung kann auf eine fortschreitende Hydratation des Bindemittels des Hinterfüllmaterials zurückgeführt werden.

Die Systemdurchlässigkeit verbleibt auch nach zyklischer Frost-Tau-Belastung unter dem Grenzwert der BSU Hamburg von $5 \cdot 10^{-7}$ m · s^{-1} für die Zulassung als Hinterfüllbaustoff für EWS mit negativen Fluidtemperaturen (BSU 2013).

Prof. Dr. Ingo Sass

Prof. Dr. Ingo Sass
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Fachgebiet Angewandte Geothermie
Technische Universität Darmstadt
Schnittspahnstraße 9
64287 Darmstadt
Tel.: 06151-16 28 71

Markus Schedel, M.Sc.

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Geothermie
Beratender Ingenieur, IngKH und IngKBW

Literaturverzeichnis

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

ASTM D-5084 (2010): Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

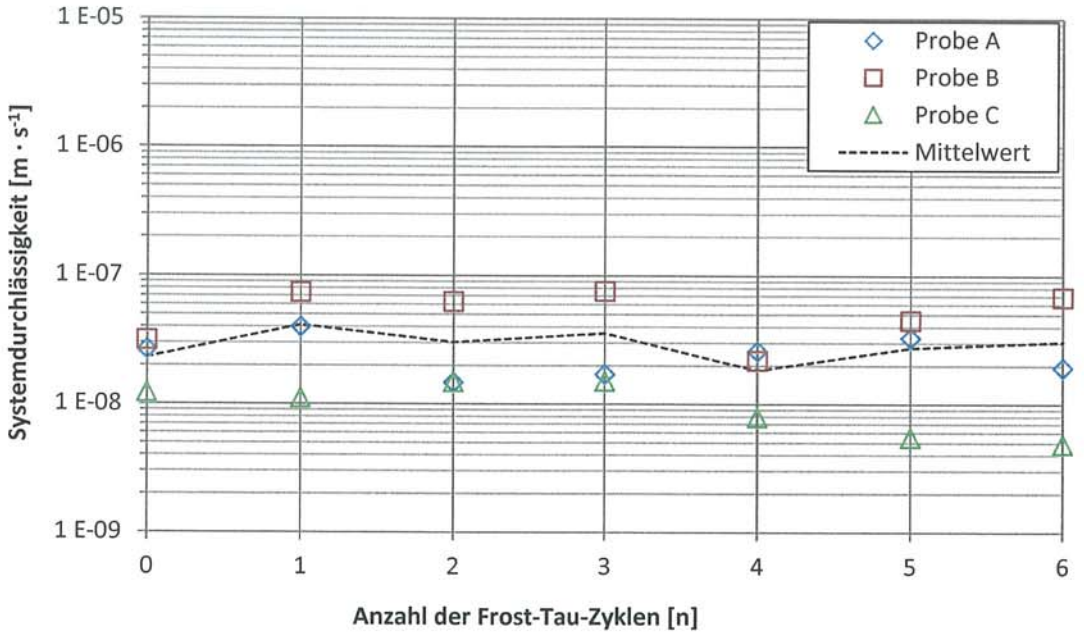
BSU (2013): Eignung von Verpressmitteln. Ergänzungen der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg zur Zulassung von Hinterfüllbaustoffen. (Stand 2013) (http://www.hamburg.de/grundwasser/3511796/eignung-von-verpressmitteln/)

DGG & DGGT (2014): 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

DIN 18130-1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin

VDI 4640-2 (2001): VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Beuth, Berlin

VDI 4640-2 (Gründruck 2015): VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Beuth, Berlin



	Systemdurchlässigkeit [m · s^{-1}]				
FTW	Probe A	Probe B	Probe C	Mittelwert	Variationskoeffizient
0	2,6E-08	3,1E-08	1,2E-08	2,3E-08	0,35
1	3,9E-08	7,3E-08	1,1E-08	4,1E-08	0,62
2	1,5E-08	6,2E-08	1,5E-08	3,0E-08	0,74
3	1,7E-08	7,5E-08	1,5E-08	3,6E-08	0,78
4	2,6E-08	2,2E-08	7,8E-09	1,8E-08	0,42
5	3,3E-08	4,5E-08	5,4E-09	2,8E-08	0,59
6	1,9E-08	6,8E-08	4,8E-09	3,1E-08	0,88

21.12.2015
SB: MSc / Aho