

Laborversuch: Frost-Tau-Wechsel haben zu Rissen in diese Probe geführt.

# Prüfzelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterial für EWS

**Materialprüfung** ■ Welchen Einfluss haben Frost-Tau-Wechsel auf die Beständigkeit von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden? Dieser letztlich nicht geklärten Frage gehen Behörden, Planer, Hersteller und Wissenschaftler intensiv nach. Denn eine schadhaft gewordene Verpressung könnte u. a. ihre Abdichtungswirkung gegenüber verschiedenen Grundwasserhorizonten verlieren. Vorgestellt wird eine Messzelle, mit der Materialproben im Labor unter realistischen Einbaubedingungen geprüft werden können.

**Z**ur Beurteilung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden gibt es bisher kein einheitliches Prüfverfahren. Die dazu in bbr 3/2011 und 4/2011 erschienenen Veröffentlichungen nehmen Bezug auf die genormten Prüfverfahren für Beton bzw. Naturstein [5, 6]. Diese Normen legen jedoch den Fokus auf die Bewertung der Festigkeitsveränderung. Die Festigkeit des Verpressmaterials darf durch Frost-Tau-Wechsel-Belastungen nicht nachhaltig gestört werden. Maßgeblich erscheint jedoch die Sicherstellung der Funktion dieses Materials zur Abdichtung hydraulisch wirksamer Horizonte. Dazu ist es erforderlich, ein Prüfverfahren zu ent-

wickeln, mit welchem der Einfluss auch mehrerer Frost-Tau-Wechsel auf die Durchlässigkeit des Verpressmaterials untersucht werden kann. Prüfverfahren, die einem Verpressmaterial für Erdwärmesonden (EWS) einen ausreichenden Frost-Tau-Wechselwiderstand attestieren sollen (wobei der Begriff „ausreichend“ normell zu definieren ist), müssen mit Versuchsausrüstungen ausgeführt werden, die die tatsächlichen Gegebenheiten einer sich im Betrieb befindlichen Sonde berücksichtigen. Das heißt, es müssen zum einen mehrere Frost-Tau-Wechsel an einer dauerhaft dehnungsbehinderten Probe simuliert werden können, zum anderen muss die Systemdurchlässigkeit entlang der Erdwärmesondenrohre und damit die

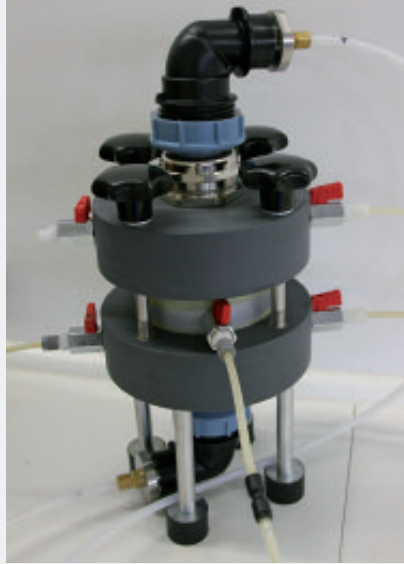
durch einen Frost-Tau-Wechsel hervorgerufenen Strukturänderungen des Verpressmaterials bei den Messungen Berücksichtigung finden. Die Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH (KED) hat in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg (TUHH) und mit der Unterstützung der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) Hamburg eine Messzelle entwickelt, die die o. g. Kriterien erfüllt.

### Grundlegende Prüfbedingungen

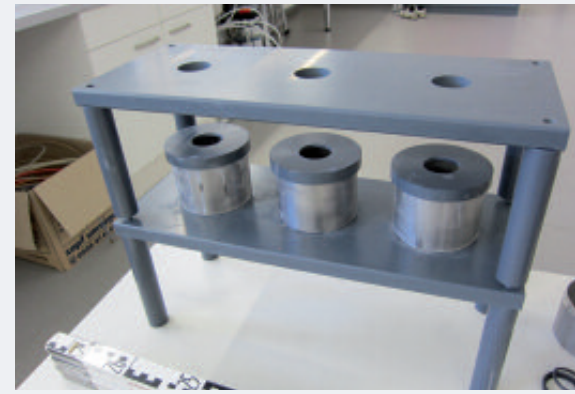
Eine Prüfzelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechselwiderstands von Verpressmaterial für EWS muss folgende vier grundlegende Prüfbedingungen erfüllen:



**Abb. 1** Fußplatte der Messzelle mit Filterstein und Dichtring



**Abb. 2** Messzelle mit Anschluss an den Kühlkreislauf



**Abb. 3** Gießanlage zur Prüfkörperherstellung mit exakt mittlerer Einbindung der PE-Rohre

### Prüfbedingung 1

Aus hydrogeologischer Sicht ist die abdichtende Funktion des Verpressmaterials für EWS bei durchteuften, bindigen, hydraulisch wirksamen Trennschichten das maßgebliche Kriterium [1]. Das eingesetzte Material muss deshalb mindestens den Durchlässigkeitsbeiwert des durchteuften Horizontes aufweisen. Folglich muss ein Prüfverfahren für die Genehmigung von Verpressmaterialien den Fokus auf die Messung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes legen. Prüfbedingung 1 lautet somit: Entscheidendes Kriterium für die Beurteilung der Eignung eines Verpressmaterials ist die Wasserdurchlässigkeit.

### Prüfbedingung 2

Die Abdichtfunktion des Verpressmaterials muss über die gesamte Nutzungsdauer der EWS und darüber hinaus gewährleistet sein. Das bedeutet, dass die Wasserdurchlässigkeit des Materials unter allen anlagentechnisch möglichen Betriebsbedingungen, also auch unter mehrfacher Frost-Tau-Beanspruchung, gewährleistet sein muss. Prüfbedingung 2 lautet damit: Für die Beurteilung der Eignung von Verpressmaterialien unter Frost-Tau-Wechseleinfluss ist auch die Wasserdurchlässigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung entscheidend.

### Prüfbedingung 3

Wenn Prüfkörper aus Verpressmaterial in Anlehnung an die Versuchsdurchführung von Beton im Wasserbad eingefroren werden, kommt es zu einer Formveränderung, die in-situ nicht möglich ist. Vorversuche der E&D Ingenieurgesellschaft (heute KED) und des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TUHH haben gezeigt, dass die Prüfkörper beim Einfrieren im Proctor-Topf in axialer Richtung auslängen. Beim Einfrieren von Verpressmaterial kommt es ohne Dehnungsbehinderung zu Volumen- und damit Strukturveränderungen, die einen negativen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit haben können. Die Volumenänderung des Verpressmaterials einer eingebauten EWS wird durch das umgebende Erdreich und die Auflast behindert, d. h. durch die insitu-Spannungsbedingungen eingeschränkt. Folglich muss der Prüfkörper sowohl axial als auch radial in der Messzelle dehnungsbehindert eingebaut und auch während der gesamten Prüfung unter definierten Spannungsrandbedingungen gehalten werden [2]. Somit lautet die dritte Prüfbedingung: Das zu prüfende Verpressmaterial muss während des gesamten Prüfablaufes dehnungsbehindert in der Prü fzelle eingebaut sein.

### Prüfbedingung 4

Bei dem Gefriervorgang einer EWS ist das Wärmeträgermedium die Frostquelle, welche dem umgebenden Verpressmaterial und dem anstehenden Boden die Wärme entzieht. Das bedeutet, dass das Verpressmaterial von innen nach außen hin durchfriert. Dies ist entscheidend für den Ort der Eislinsenbildung und folglich auch für den Ort der daraus resultierenden Gefügeveränderung [3]. Prüfbedingung 4 lautet demnach: Die Durchfrostung der Prüfkörper muss von innen nach außen erfolgen.

### Prüfzelle

Wie auf dem Geothermiekongress 2010 in Karlsruhe angekündigt, wurde eine Messzelle konzipiert, die alle vier oben genannten Anforderungen an ein einheitliches Prüfverfahren für die Bestimmung der Eignung von Verpressmaterialien für EWS unter Frost-Tau-Wechseleinfluss erfüllt [4]. Diese Messzelle wurde im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg in dreifacher Ausführung gebaut; sie wird im Erdbaulabor der KED Ingenieure betrieben. Es handelt sich um eine modifizierte Durchlässigkeitsmesszelle nach DIN 18130. Bei dieser Messzelle wird eine radiale ►

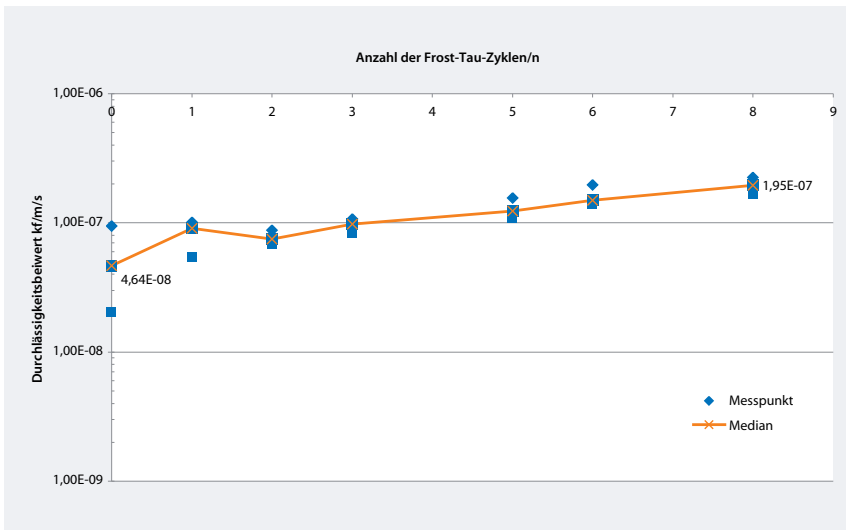


## Sole für Erdwärmesysteme

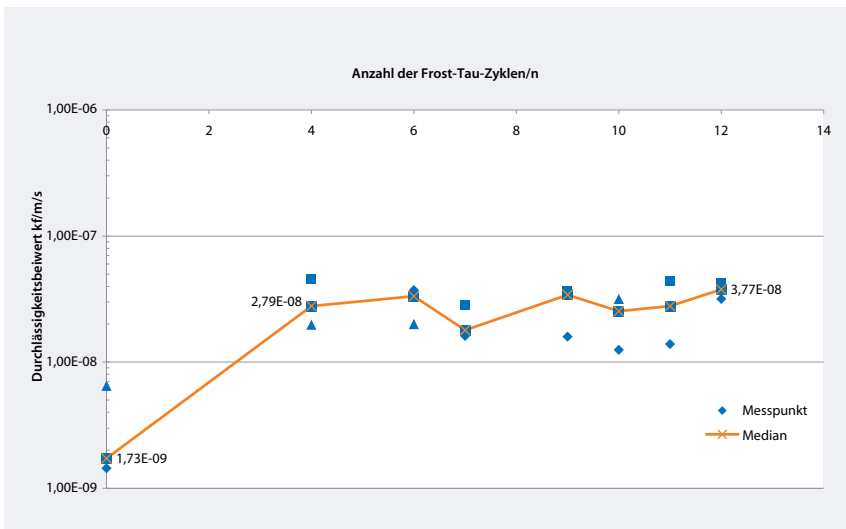
umweltverträglich – leicht biologisch abbaubar

- Basis Ethylenglykol / - Basis Propylenglykol und glykolfreie Spezialsole  
Lieferform: Konzentrat oder gebrauchsfertiges Gemisch

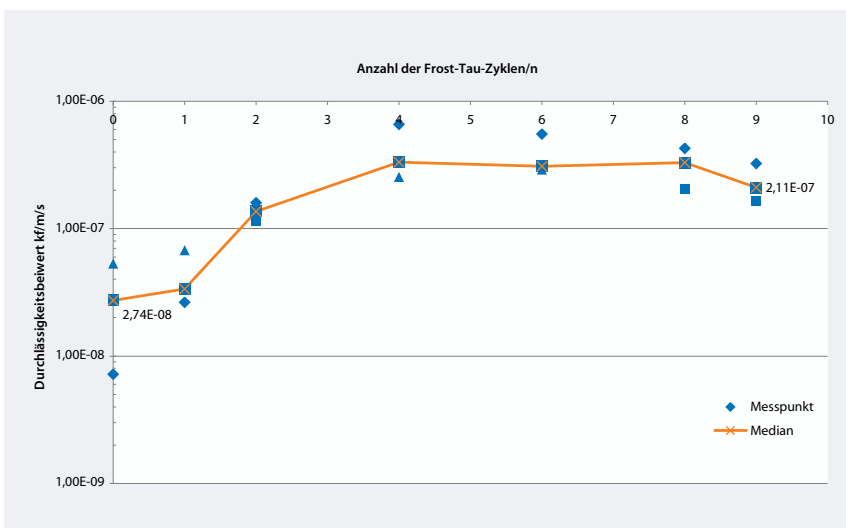
TYFOROP CHEMIE GmbH / Anton-Rée-Weg 7 / 20537 Hamburg / Tel. 040 20 94 97 - 0 / Fax - 20 / E-Mail: info@tyfo.de / www.tyfo.de



**Abb. 4** Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwerts in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Zyklen von Prüfkörpern mit 7 Tagen Abbindezeit, ...



**Abb. 5** ... mit 28 Tagen Abbindezeit



**Abb. 6** ... mit 56 Tagen Abbindezeit

Spannung ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) über einen Flüssigkeitsdruck zwischen einem äußeren Stahlzylinder und einer an dem Prüfkörper anliegenden Gummihülle aufgebracht. Da dieser Druck größer ist als der Druck des durchströmenden Wassers, werden Randumläufigkeiten verhindert. Hierbei wird anstelle von Wasser ein Wasser-Glycol-Gemisch verwendet, um einem Phasenwechsel des Fluides bei der Durchfrostung des Prüfkörpers vorzubeugen. In axialer Richtung wird der Prüfkörper bündig durch zwei Filterplatten begrenzt, welche für eine gleichmäßig verteilte Anströmung des Prüfkörpers sorgen und eine axiale Ausdehnung verhindern sollen (Abb. 1).

Bei der Herstellung des zylindrischen Prüfkörpers wird ein axial durch den Probekörper verlaufendes PE-Rohr mit eingegossen, welches das Erdwärmesondenrohr simulieren soll. Die Prüfkörperabmessungen einschließlich des Durchmessers des PE-Rohrs wurden maßstabsgetreu zu einer Doppel-U-EWS errechnet (Tab. 1). Das PE-Rohr ragt am oberen und unteren Ende aus der Messzelle heraus und wird über Quetschschraubungen fixiert. Die herausragenden Enden werden an ein Kälte-Umwälzthermostat angeschlossen, sodass eine Wärmeträgerflüssigkeit mit definierten Temperaturen durch das PE-Rohr fließen kann. Über den geschlossenen Kreislauf kann so der Prüfkörper von innen nach außen hin abgekühlt, komplett durchgefrostet und schließlich wieder aufgetaut werden (Abb. 2). Die benötigten Zeiten für die Durchführung eines Frost-Tau-Wechsels hängen neben der Leistungsfähigkeit des Thermostats und der Fluidtemperatur maßgeblich von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Verpressmaterials ab. So resultieren für unterschiedliche Verpressmaterialien unterschiedliche Durchfrostungszeiten.

## Materialuntersuchungen

Mit der oben beschriebenen Messzelle wurde im zweiten und dritten Quartal 2011 eine umfangreiche Prüferie im Auftrag der BSU Hamburg durchgeführt. Dabei wurden Prüfkörper eines ausgewählten Verpressmaterials mit unterschiedlichen Abbindezeiten (7, 28, 56 und 91 Tage) hergestellt, bis zu 15

Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt und die Veränderung der Durchlässigkeit gemessen. Die Messungen erfolgten als Dreifachbestimmungen.

**Prüfkörperherstellung und -lagerung**

Das geprüfte Material wurde im ersten Quartal 2011 aus dem Fachhandel bezogen. Die Anmischung erfolgte nach Herstellerangaben und mit dem empfohlenen Wasser/Feststoff-Verhältnis. Zur Herstellung wurde Leitungswasser verwandt. Die Herstellung erfolgte bei Raumtemperatur in einer eigens entwickelten Gießanlage zur Sicherstellung der genau mittigen Einbindung des PE-Rohres. Nach 24 Stunden wurden die Prüfkörper aus der Gießanlage (Abb. 3) entfernt und anschließend im Kühlschrank bei ca. 8 Grad Celsius verdunstungsgeschützt gelagert. Die Lagerungstemperatur wurde in diesem Bereich gewählt, da die in *bbr 05/2010* veröffentlichten Voruntersuchungen eine ergebnisrelevante Temperaturabhängigkeit des geprüften Verpressmaterials ergeben hatten [2].

**Versuchsablauf**

Nach Einbau der Prüfkörper dieser Versuchsserie in die modifizierte Messzelle wird der Sättigungsdruck gemäß DIN 18130 stufenweise bis auf 2,0 bar aufgebracht. Durch einen dauerhaften Zelldruck von 2,5 bar und somit einem effektiven Anpressdruck von 0,5 bar werden Randumläufigkeiten verhindert und eine radiale Spannungsrandbedingung eingestellt. Nach Sättigung erfolgt die Durchlässigkeitsmessung mit einem Druckgefälle von  $i = 30$ . Die Durchlässigkeitsmessung läuft solange,

Prüfkörpergeometrie	
PE-Rohr	
Länge	35,00 cm
Durchmesser (innen)	3,10 cm
Durchmesser (außen)	4,00 cm
Verpresskörper	
Höhe	7,00 cm
Durchmesser (außen)	9,60 cm
Anströmfläche	59,82 cm <sup>2</sup>

Tabelle 1 Prüfkörpergeometrie

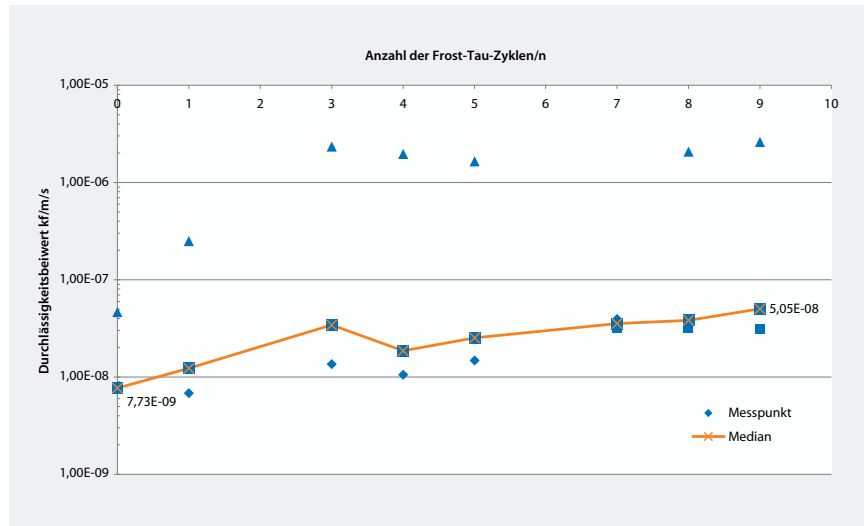


Abb. 7 ... und mit 91 Tagen Abbindezeit

bis die Durchflussrate annähernd konstant ist. Nach Beendigung der Messung wird das Druckgefälle auf  $i = 0$  reduziert und der Frost-Tau-Zyklus eingeleitet. Der Kälte-Umwälzthermostat kühlt dabei die Wärmeträgerflüssigkeit auf -10 Grad Celsius ab und pumpt diese durch die PE-Rohre. Die Durchfrostungszeit wurde mittels numerischer Simulation mit der Software Abaqus errechnet und zusätzlich durch Temperaturmessungen an der Außenseite des Stahlzylinders kontrolliert. Bei dem geprüften Verpressmaterial mit dessen spezifischen thermischen Eigenschaften beträgt diese Zeit 20 Stunden. Mit Erreichen der kompletten Durchfrostung wird der Tauvorgang eingeleitet, indem der Kälte-Umwälzthermostat die Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit auf 8 Grad Celsius anhebt. Nach weiteren 20 Stunden wird der Thermostat abgeschaltet und die Durchlässigkeitsmessung wiederholt. Anschließend erfolgt der nächste Frost-Tau-Zyklus.

**Laborergebnisse untersuchter Prüfkörper**

Die Auswertung der Messwerte erfolgte gemäß DIN 18130. Bei den Diagrammen 4 bis 7 wurde der Median als Versuchsspur aufgetragen, um Ausreißer zu kompensieren. Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsmessungen der Prüfkörper mit 7 Tagen Abbindezeit sind in **Abbildung 4** dargestellt. Mit zunehmender Anzahl an Frost-Tau-Zyklen kommt es zu einem Anstieg der Durchlässigkeit. Nach acht

Frost-Tau-Zyklen liegt die Durchlässigkeit um etwa den Faktor 4 über der Durchlässigkeit vor der Frost-Beaufschlagung.

Bei den Durchlässigkeiten der Prüfkörper mit 28 Tagen Abbindezeit ist ebenfalls ein Anstieg der Durchlässigkeit zu beobachten. Wie in **Abbildung 5** dargestellt, lässt sich eine Zunahme der Durchlässigkeit von ca. einer Zehnerpotenz nachmessen. Die Veränderung der Durchlässigkeit nach dem vierten Frost-Tau-Zyklus ist gering, die Durchlässigkeitsbeiwerte verlaufen annähernd auf einem konstanten Niveau. ▶

**ERDWÄRMESONDEN**

- Sonden DN 32 (PE 100 SDR 11 PN 16) mit 2 Kreisläufen und 4 Sonderrohren fertig verschweißt
- Das Verschweißen der Muffen mit Rohren und Sondenkopf wird werkseitig druckgeprüft und protokolliert
- Zusätzlich werden die Sonden fremdüberwacht und geprüft



- 50 m / Euro 242,-
- 60 m / Euro 265,-
- 70 m / Euro 288,-
- 80 m / Euro 311,-
- 90 m / Euro 334,-
- 100 m / Euro 357,-
- 110 m / Euro 380,-
- 120 m / Euro 403,-
- 130 m / Euro 426,-
- 140 m / Euro 449,-
- Y-Stück 32/32/40 Euro 11,-
- Y-Stück 40/40/50 Euro 13,-



Alle Preise ab Werk, zzgl. MwSt.

Tel.: 07024/929242  
 Fax: 07024/929244  
 Neuffenstraße 78  
 D 73240 Wendlingen





**Abb. 8** Rissbild eines Prüfkörpers mit 28 Tagen Abbindezeit nach 12 Frost-Tau-Wechseln



**Abb. 9** Gitterartige Rissstruktur eines Prüfkörpers mit 56 Tagen Abbindezeit nach 9 Frost-Tau-Wechseln



**Abb. 10** Prüfkörper mit 28 Tagen Abbindezeit nach zwei Frost-Tau-Wechseln und anschließender Trocknung im Trockenschrank

Ein ähnlicher Effekt lässt sich bei der Messung der Prüfkörper mit einer Abbindezeit von 56 Tagen beobachten. Die in **Abbildung 6** dargestellten Ergebnisse weisen einen Anstieg der Durchlässigkeit aufgrund der Frost-Tau-Belastungen von zirka einer Zehnerpotenz auf. Hier ist ebenfalls zu beobachten, dass die Veränderung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach den ersten Frost-Tau-Wechseln größer ist als zu späteren Frost-Tau-Wechseln.

Die Durchlässigkeitsmessung der Prüfkörper mit einer Abbindezeit von 91 Tagen ergab eine geringere Empfindlichkeit gegenüber der Frost-Tau-Belastung, als die Prüfkörper mit 28 oder 56 Tagen Abbindezeit (**Abb. 7**). Es ist zu erkennen, dass die Veränderung der Durchlässigkeit sich auf etwa eine halbe Zehnerpotenz beläuft. Der Durchlässigkeitsbeiwert des dritten Prüfkörpers (1/91 C) weist bereits vor der ersten Frost-Tau-Belastung auf eine Störung im Prüfkörper hin.

Wie in den obigen Grafiken zu erkennen ist, verändert sich der Durchlässigkeitsbeiwert aufgrund der Frost-Tau-

Beanspruchung. Bei dem geprüften Material ist dieser Anstieg in einem Bereich zwischen einer halben und einer Zehnerpotenz. Es ist ersichtlich, dass es nicht zu einem gänzlichen Versagen der Abdichtfunktion gekommen ist. Den bis dato durchgeführten Versuchen zufolge ist die Schädigung des Verpressmaterials nach den ersten 1 bis 4 Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchungen am stärksten, die Gesamtanzahl der darauf folgenden Frost-Tau-Wechsel scheint keine vergleichbar nachteilige Wirkung zu haben.

### Systemdurchlässigkeit

**Abbildung 8** zeigt das Rissbild eines Prüfkörpers nach 12 Frost-Tau-Beanspruchungen. Dieser Prüfkörper konnte vor der ersten Frost-Tau-Beanspruchung 28 Tage abbinden. Es ist erkennbar, dass die Rissbildung direkt an der Stelle des Frost-Eintrags (dem PE-Rohr) geringer ist als zum äußeren Rand hin. Dies bestätigt die Notwendigkeit der oben genannten vierten Prüfbedingung, wonach die Frostrichtung von entscheidender Bedeutung für eine valide Aussage zur Systemdurchlässigkeit ist. Auch der in **Abbildung 9** dargestellte Prüfkörper weist eine zum Rand hin stärker werdende Gefügeveränderung auf. Dieser Prüfkörper wurde nach 56 Tagen zum ersten Mal mit Frost beaufschlagt und insgesamt durch 9 Frost-Tau-Wechsel belastet. Es zeigt sich ein gitternetz-ähnliches Rissbild, welches auf eine schuppenartige Gefügeveränderung hindeutet. Diese wird nach einer Trocknung im Trockenschrank noch deutlicher. **Abbildung 10** zeigt einen Prüfkörper, der 28 Tage vor der

ersten Frost-Beanspruchung ausgehärtet ist und anschließend mit 2 Frost-Tau-Zyklen belastet wurde. Das schuppenartige Rissbild des Prüfkörpers ist deutlich zu erkennen.

Als Vergleich zu dem geprüften, laut Herstellerangaben frostwiderstandsfähigen Material wurde ein Referenzversuch mit einem nicht-frostwiderstandsfähigen Material durchgeführt. Diese Prüfkörper wurden nach 28 Tagen Abbindezeit in die Messzellen eingebaut und mit einem Frost-Tau-Zyklus beaufschlagt. Nach dem Ausbau wurde der in **Abbildung 11** dargestellte Prüfkörper ebenfalls im Trockenschrank bei 105 Grad Celsius getrocknet. Es ist ein nahezu vollständiges radiales Aufbrechen der Struktur zu erkennen. Es zeigt sich darüber hinaus zum äußeren Rand hin eine größere Gefügestörung als zum inneren Rand.

Die Forderung nach der Versuchsdurchführung unter Berücksichtigung der Frostrichtung, wie in einer EWS gegeben, wird im Vergleich der **Abbildungen 11 und 12** nochmals verdeutlicht. Die negative Gefügeveränderung des von außen nach innen durchfrosteten Prüfkörpers in **Abbildung 12** konzentriert sich eindeutig auf das Innere der Probe. Das bedeutet, dass sich der Verpresskörper hier vom Erdwärmesondenrohr lösen und es damit zu einer falschen Aussage über die Systemdurchlässigkeit kommen würde.

### Fazit

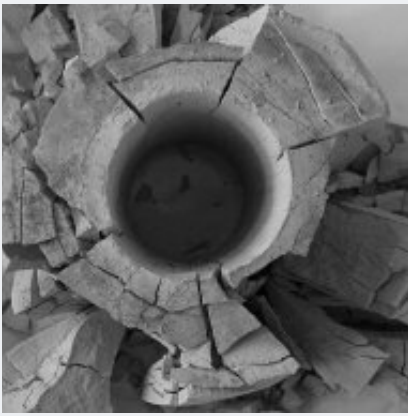
Die postulierten Prüfbedingungen haben sich bei der Durchführung von Labor-



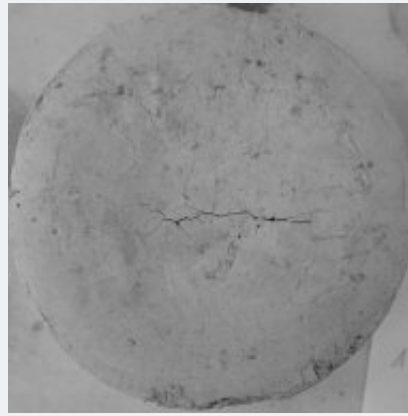
**Teftorec® GmbH**

Hochleistungsentsandung von Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen bei Neubau, Regenerierung und Sanierung

Tel. 0 28 41-1 69 56 89 oder 0 28 41-9 79 16 93  
 Fax 0 28 41-1 69 56 88 oder 0 28 41-9 79 16 95  
 info@teftorec-gmbh.de | www.teftorec-gmbh.de



**Abb. 11** Prüfkörper eines nicht-frostwiderstandsfähigen Verpressmaterials mit 28 Tagen Abbindezeit nach einem Frost-Tau-Wechsel von innen nach außen und anschließender Trocknung



**Abb. 12** Prüfkörper des nicht-frostwiderstandsfähigen Verpressmaterials mit 28 Tagen Abbindezeit nach einem Frost-Tau-Wechsel von außen nach innen und anschließender Trocknung

versuchen als richtig und erforderlich bestätigt. Die konstruierte Messzelle erfüllt die Prüfbedingungen uneingeschränkt. Randumlaufigkeiten werden durch die Konstruktion der Zelle ausgeschlossen und eine gefügeverändernde Ausdehnung des Probenkörpers behindert. Des Weiteren zeigen die Rissbilder der untersuchten Proben, dass es notwendig ist, das zu untersuchende Material entsprechend den Betriebsbedingungen einer Sonde von innen nach außen einzufrieren. Qualifizierte Aussagen zur Systemdurchlässigkeit sind bei den sonst üblichen Laborverfahren mit dem Einfrieren von außen nach innen nicht möglich. Die entwickelte Messzelle liefert reproduzierbare Aussagen über die Frost-Tau-Wechsel-Widerstandsfähigkeit des geprüften Materials. Nach den bisher durchgeführten Laborversuchen konnte festgestellt werden, dass für den Grad der Schädigung von Verpressmaterialien für EWS nicht die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, sondern der Zeitpunkt der ersten Frostbeanspruchung maßgeblich ist.

### Ausblick

Derzeit wird an der Optimierung der Messzelle gearbeitet. Parallel dazu werden, u. a. im Auftrag der BSU Hamburg,

weitere Versuchsserien an Produkten verschiedener Zusammensetzung und verschiedener Hersteller durchgeführt.

### Literatur

- [1] VDI-Richtlinie 4640 (2001): *Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*
- [2] Albrecht, I.; Frank, J. (2010): *Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost/Tau-Wechseln. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/10, S. 28-33*
- [3] Unold, F. (2006): *Der Gefriersog bei der Bodenfröschung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens. Dissertation, Universität der Bundeswehr München*
- [4] Frank, J. (2010): *Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost/Tau-Wechsel. Enders & Dührkop Ingenieurgesellschaft mbH, Beitrag zum Geothermiekongress 2010 in Karlsruhe*
- [5] Rumohr, S. (2011): *Verfüllbaustoffe für Erdwärmesondenbohrungen: eine kritische Betrachtung bestehender Nachweise der Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 04/11 S.32-36*
- [6] Müller, T. & Schnell, K. (2011): *Prüfung der Frostbeständigkeit von Verfüllmassen für Erdwärmesonden. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 03/11 S.30-33*

- [7] Reuß, M. (2011): *Systemdichtheit von Erdwärmesonden. ZAE Bayern, Beitrag zum QEWS-Workshop Verfüllmaterialien 2011 in Garching*
- [8] Kuckelkorn, J. (2011): *Großversuchsstand zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen. ZAE Bayern, Beitrag zum QEWS-Workshop Verfüllmaterialien 2011 in Garching*

Abbildungen: KED Ingenieure


### Autoren:

Dipl.-Ing. Hauke Anbergen  
 Dipl.-Ing. Dipl.-Geol. Dr. Jens Frank  
 Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH  
 Gasstr. 18, Haus 4  
 22761 Hamburg  
 Tel.: 040 800803-0  
 Fax: 040 800803-111  
 E-Mail: h.anbergen@ked-ingenieure.de  
 j.frank@ked-ingenieure.de  
 Internet: www.ked-ingenieure.de

Dipl.-Geol. Ingrun Albrecht  
 Technische Universität Hamburg-Harburg  
 Institut für Geotechnik und Baubetrieb  
 Harburger Schloßstr. 20  
 21079 Hamburg  
 Tel.: 040 42878-3762  
 Fax: 040 42878-4020  
 E-Mail: ingrun.albrecht@tuhh.de  
 Internet: www.tu-harburg.de

Dipl.-Ing. Hartmut Dittrich  
 c/o Freie und Hansestadt Hamburg  
 Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt  
 Amt für Umweltschutz  
 Abteilung Wasserwirtschaft  
 Billstr. 84  
 20539 Hamburg  
 Tel.: 040 42845-3039  
 Fax: 040 42845-2482  
 E-Mail: hartmut.dittrich@bsu.hamburg.de  
 Internet: www.hamburg.de/bsu





**BARTSCH**  
PUMPEN- UND WASSERTECHNIK

**Pumpen aller Art • Mietpumpenpark • Stromerzeuger • Brunnenregenerierung • Behälterreinigung • Rohrleitungsreinigung**

- Handels- und Servicestation für Wilo EMU, HONDA, Pleuger, KSB u.a.
- Seit über 30 Jahren kompetenter Partner für die Wasser- und Bauwirtschaft, Industrie, Handel und Handwerk

Spezialgebiet u.a. BRUNNENREGENERIERUNG • BRUNNENBEWERTUNG • BRUNNENOPTIMIERUNG • BETRIEBSSICHERHEIT • SENKUNG DER BETRIEBSKOSTEN • WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNGEN • PUMPEN AUSLEGUNG

**BARTSCH Pumpen- und Wassertechnik**  
 Johs.-Kepler-Straße 4 - 28816 Stuhr  
 Tel.: 0421/ 56612-0 - Fax: 0421/ 56612-22  
 mail: bartsch@bartsch-wassertechnik.de · www.bartsch-wassertechnik.de