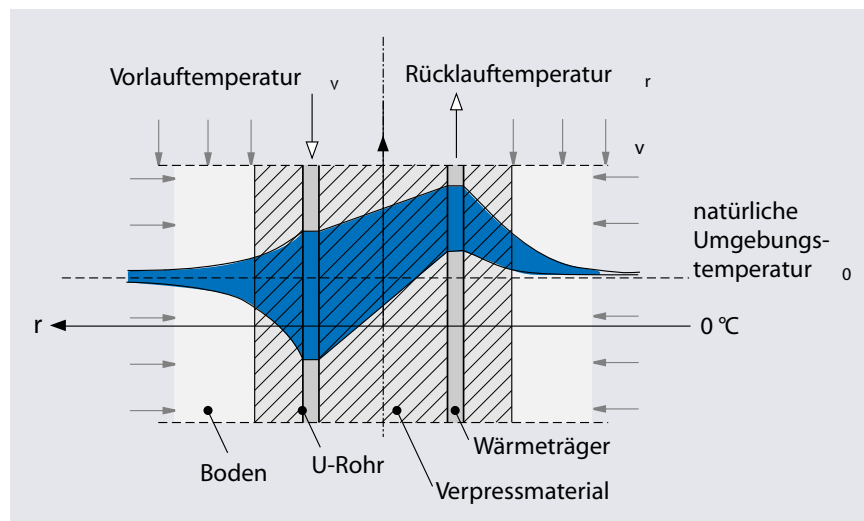


# Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mechanisch-hydraulischen Verhalten bei Frost/Tau-Wechseln

**Materialprüfung** ■ Das beim Bau von Erdwärmesonden einzusetzende Verpressmaterial hat im Wesentlichen zwei Aufgaben zu erfüllen: den möglichst unbeeinflussten Wärmeübergang von der Sonde zum umgebenden Erdreich zu sichern sowie die hydraulisch wirksame Sperrfunktion durchteufter, bindiger Horizonte wieder herzustellen. Beschrieben wird ein Versuchsverfahren, mit dem die Durchlässigkeit des Verpressmaterials auch bei mehrfachen Frost/Tau-Wechseln geprüft werden kann und dabei weitestgehend an bereits eingeführte, bodenmechanische Laborversuche angelehnt ist.

Beim Betrieb von Erdwärmesonden in Kombination mit Wärmepumpen kann bei Verwendung von Wasser-Glykol-Mischungen als Wärmeträgermedium dessen Temperatur unter den Gefrierpunkt des Grundwassers absinken, sodass das Verpressmaterial und ggfs. der umgebende Boden gefrieren (Abb. 1). Dabei liegt ein instationärer Wärmetransport vor, bei dem sich die Vorlauftemperatur und damit der Temperaturverlauf im Verpressmaterial und im Nahbereich des umgebenden Bodens zeitlich ändern. Beim chemischen Abbindeprozess zementgebundener Verpressmaterialien spielt auch die zeitlich veränderliche Abbindewärme eine Rolle. Bei Frost/Tau-Wechseln können sich die hydraulischen Eigenschaften des Verpressmaterials ändern. Infolge von Gefrierprozessen können Volumenänderungen im Verpressmaterial und im umgebenden Boden auftreten. Die Ausdehnung und eine eventuell damit einhergehende Risbbildung bzw. Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit wird durch die Radialspannung infolge des Erddrucks beeinflusst. Diese hängt im Wesentlichen von der Tiefe unterhalb der Geländeoberfläche bzw. von der Überlagerungsspannung ab. Dies zeigt, dass bei der vorliegenden Fragestellung ein mechanisch-hydraulisch-thermisch gekoppeltes Problem vorliegt, bei dem sich der Wärmetransport, die Sickerströmung und die Verformung des Bodens gegenseitig beeinflussen können.



**Abb. 1** Schnitt durch eine Erdwärmesonde im Boden mit Temperaturverlauf  $\vartheta(r)$  bei Änderung der Vorlauftemperatur  $\Delta\vartheta$

Eine Optimierung des Verpressmaterials hinsichtlich der oben genannten Funktionen (Wärmeleitfähigkeit und Dichtigkeit) erfordert entsprechende Betrachtungen.

Laborversuche, die zum Nachweis der Dichtfunktion des Verpressmaterials durchgeführt werden, müssen gemäß der VDI-Richtlinie 4620 Blatt 2 einen möglichen Schwankungsbereich der Temperatur von  $\pm 11$  K gegenüber der ungestörten Temperatur im Erdreich und  $\pm 17$  K bei Spitzenlast umfassen, um die Funktionalität der Bohrlochverfüllung in einem Temperaturschwankungsbereich von ca.  $+22$  °C bis  $-5$  °C sicherstellen zu können.

Da bodenmechanische Vorschriften für die Untersuchung des Einflusses von Frost/Tau-Wechseln auf Böden nicht einheitlich standardisiert sind, wurde bei bisherigen Studien für Verpressmaterialien von Erdwärmesonden hilfsweise die DIN 52104 für Naturbaustoffe bzw. die DIN 1045-1 und EN 206-1 oder die ÖNORM B 3303 für Beton herangezogen.

## Laboruntersuchungen

In der Literatur [4-8] sind Versuchsserien beschrieben, bei denen der Frage der Frost/Tau-Wechselbeständigkeit von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden nachgegangen wurde. Hierbei wurde in erster Linie die Frost/Tau-Be-

ständigkeit anhand von optischen Kriterien und durch Wägung nach Frost/Tau-Beanspruchungen beurteilt. Am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg wurden in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgesellschaft Enders & Dührkop mbH erste Versuche zur Festigkeits- und Durchlässigkeitsentwicklung mit zunehmendem Erhärtungsgrad nach mehrfachen Frost/Tau-Wechseln und unter Berücksichtigung der beim Abbinden in situ herrschenden Umgebungstemperaturen durchgeführt. Ziel dieser Vorversuche war es, ein Versuchsverfahren zu entwickeln, mit welchem die Durchlässigkeit des Verpressmaterials auch nach mehrfachen Frost/Tau-Wechseln mit standardisierten bodenmechanischen Versuchsgeräten, ggfs. mit Modifikation geprüft werden kann.

### Probenmaterial

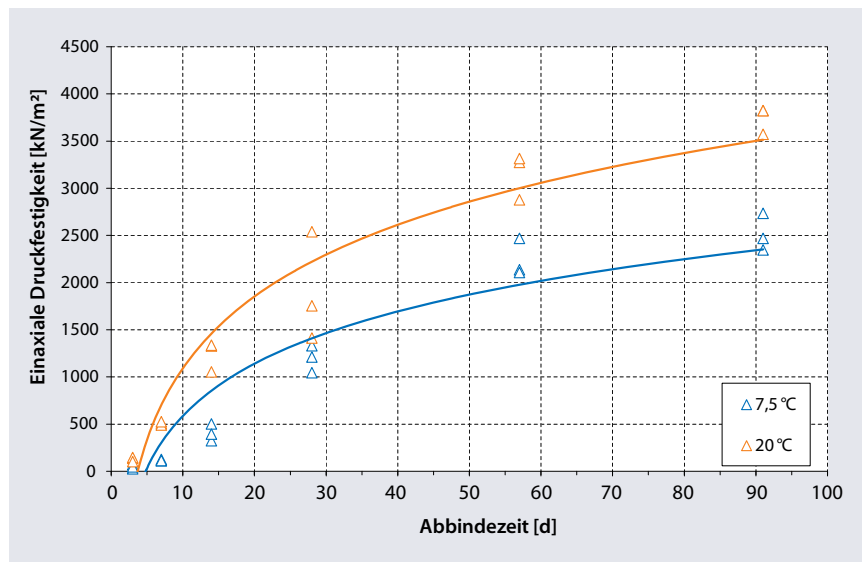
Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde ein handelsübliches Verpressmaterial eingesetzt, das allgemein als frost/tau-wechselbeständig eingeschätzt wird. Das Probenmaterial wurde im 4. Quartal 2008 und im 1. Quartal 2009 aus dem Fachhandel bezogen. Die Herstellung des Verpressmaterials erfolgte im Rahmen der Vorversuche nach der vom Hersteller beschriebenen Rezeptur für das Mischungsverhältnis  $H_2O$ /Trockensubstanz unter Verwendung von Leitungswasser.



**Abb. 2** Foto einer Probe des abgebindenen Verpressmaterials nach Frost/Tau-Wechselbeanspruchung (mit Dehnungsbehinderung gefroren)

Durchmesser	9,7 cm
Probenhöhe	12 cm
Porenanteil	0,6
Korndichte	2250 kg/m <sup>3</sup>
Wassergehalt	66,7 %
Wärmeleitfähigkeit	0,77 W/(m K)
Wärmekapazität	2280 J/(kg K)

**Tabelle 1** Probengeometrie und Eigenschaften des Verpressmaterials



**Abb. 3** Zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des Verpressmaterials für Proben, die bei 7,5 bzw. 20 °C erhärteten

### Probenherstellung und Versuchsrandbedingungen

Zum Gefrieren der Proben wurden Vorversuche durchgeführt. Dabei wurden die Proben in Stahlzylindern (hergestellt mit Dehnungsbehinderung) von außen nach innen gefroren. Dementsprechend ergab sich beim Gefrieren eine Längenänderung der Probe in axialer Richtung. Wie in **Abbildung 2** dargestellt, zeigten die Proben nach Frost/Tau-Wechseln konzentrische Risse, Aufweichungen an der Oberfläche sowie Abplatzungen am Rand. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer Versuchsapparatur, bei der das Verpressmaterial unter realistischen Spannungsrandbedingungen abbindet und bei der die Probekörper anschließend Temperaturänderungen unterzogen werden können. Die nachfolgenden Vorversuche wurden mit Proben durchgeführt, die bei radialer Dehnungsbehinderung erhärteten und von außen nach innen gefroren wurden. Der genaue Herstellungsprozess der Proben wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Für Versuche mit Frost/Tau-Wechsel war sicherzustellen, dass die Proben während der Versuche vollständig gefroren bzw. aufgetaut sind. Dazu wurde die Dauer des Gefrier- und Tauvorgangs jeweils von außen nach innen mit stationären thermischen Analysen berechnet. Die dabei verwendeten Eigenschaften des Verpressmaterials sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Bei der Berechnung des Gefriervorgangs wird ausgehend von einer Anfangstemperatur der Probe von 20 °C die Außentemperatur unmittelbar auf konstant -8 °C abgesenkt. Um den Worst-case zu simulieren, wird für das Verpressmaterial eine Wärmeleitfähigkeit von 0,77 W/(mK) vorgegeben, was der schlechtesten Wärmeleitfähigkeit aller in [4] getesteten Verpressmaterialien entspricht. Die Berechnungen zeigen, dass nach ca. 5,5 Stunden am Mittelpunkt der Probe eine Temperatur von -8 °C erreicht wird. Mit einem Sicherheitszuschlag von 100 Prozent wird für die Versuche eine Gefrierdauer von 11 Stunden gewählt. Zur Berechnung der Dauer des Tauvorgangs wird die Außentemperatur unmittelbar auf 20 °C angehoben. Daraus ergibt sich eine Taudauer von 2,5 Stunden. Mit dem Sicherheitszuschlag von 100 Prozent wurde für die Versuche die Dauer der Tauphase auf fünf Stunden festgelegt.

### Einaxiale Druckversuche bei konstanter Temperatur

Die Suspension des Verpressmaterials wurde in gefettete Plastikzylinder mit einem Durchmesser von 5 cm eingebracht. Die einaxialen Druckversuche wurden an erhärteten Proben durchgeführt, die bei Labortemperatur (20 °C) bzw. bei Kühlschranktemperatur (7,5 °C) erhärteten. Zum jeweiligen Prüftermin wurden die Probekörper aus den Zylindern herausgedrückt, auf ca. 10 cm abgelängt und es wurde ein

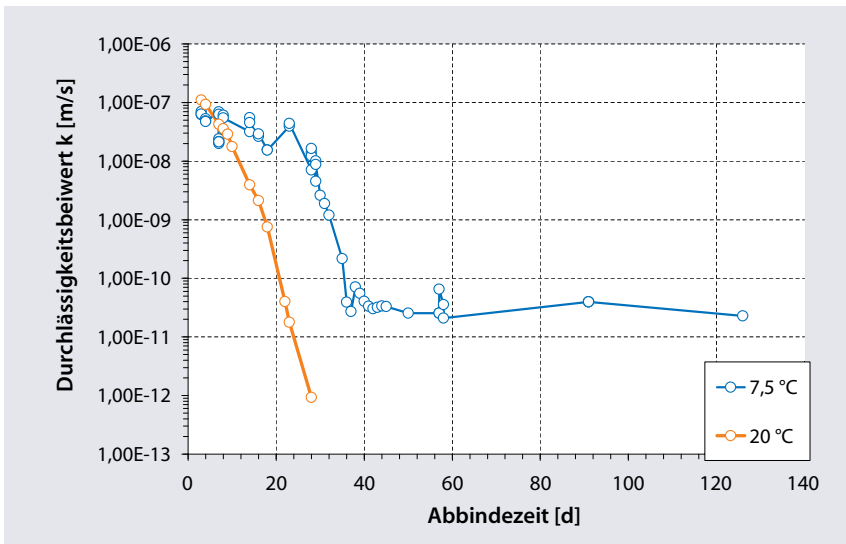


Abb. 4 Zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit des Verpressmaterials für Proben, die bei 7,5 bzw. 20 °C erhärteten

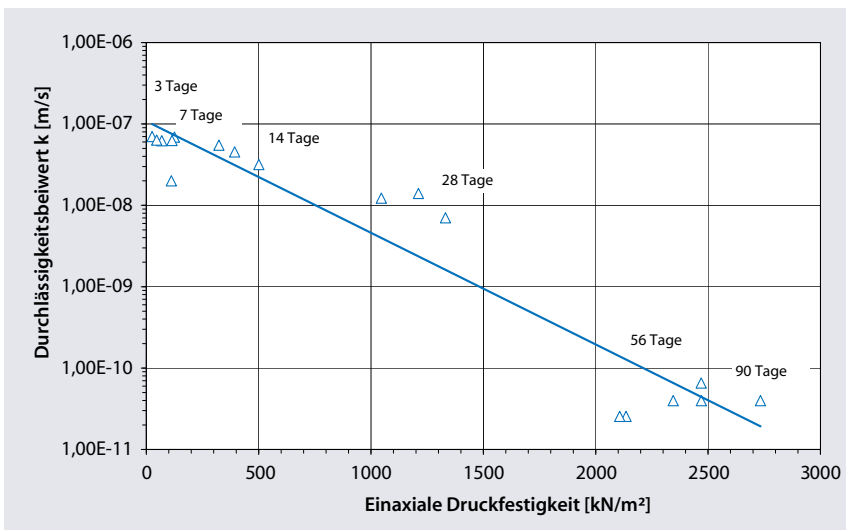


Abb. 5 Korrelation zwischen Durchlässigkeit und einaxialer Druckfestigkeit des Verpressmaterials für Proben, die bei 7,5 °C erhärteten

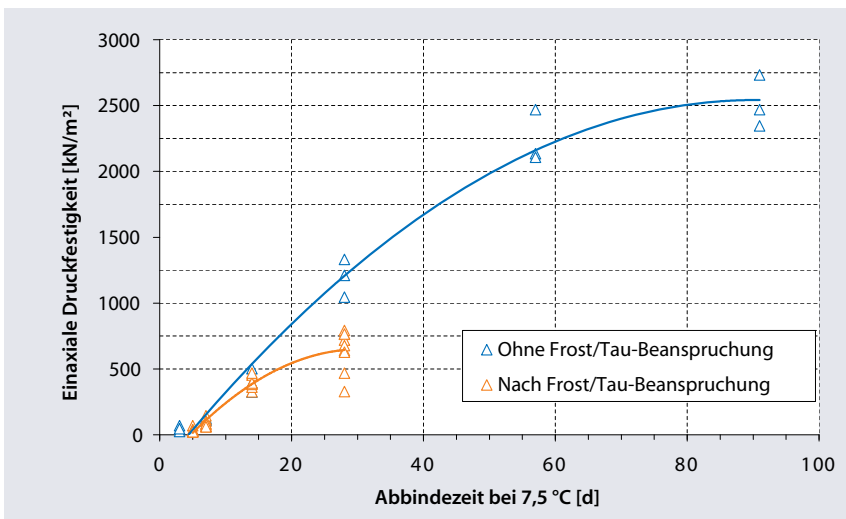


Abb. 6 Zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des Verpressmaterials mit und ohne Frost/Tau-Wechsel für Proben, die bei 7,5 °C erhärteten

einaxialer Druckversuch mit einer Stauchungsgeschwindigkeit von 1 % der Probenhöhe/min durchgeführt. Die einaxiale Druckfestigkeit wurde jeweils an drei Proben nach 3, 7, 14, 28, 56 und 90 Tagen ermittelt (Abb. 3).

Wie bei zementgebundenen Stoffen zu erwarten, zeigen die Versuchsergebnisse einen deutlichen Einfluss der Temperatur beim Abbinden der Probenkörper auf die einaxiale Druckfestigkeit. Die unter 7,5 °C erhärteten Proben zeigen geringere Festigkeiten bei gleicher Aushärtezeit.

### Durchlässigkeitsversuche bei konstanter Temperatur

Die Suspension wurde in einen Stahlzylinder mit einem Innendurchmesser von 9,6 cm und einer Höhe von 12 cm eingefüllt. Die Erhärtung fand unter Labortemperatur (20 °C) bzw. im Kühlschrank (7,5 °C) statt. Nach der jeweiligen Erhärtungszeit wurden die Probekörper aus den Zylindern herausgedrückt und in eine dreiaxiale Durchlässigkeitsanlage nach DIN 18130-1-TX-DEST-UO-1 eingebaut. Dabei wurde die Probe in eine Gummimembran überführt und in der Durchlässigkeitszelle platziert. Die Versuche wurden bei einem isotropen Zelldruck von 1,5 bar und einem hydraulischen Gefälle von  $i = 30$  durchgeführt. Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes erfolgte jeweils in drei Einzelversuchen.

Die Versuchsergebnisse in Abbildung 4 zeigen zum einen, dass die Wasserdurchlässigkeit mit der Dauer der Abbindezeit abnimmt. Für unter 7,5 °C erhärtete Proben ist die maximale Durchlässigkeit von  $k = 4 \times 10^{-11}$  m/s nach ca. 36 Tagen erreicht. Zum anderen zeigt sich, dass die Temperatur beim Abbinden der Probekörper einen deutlichen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit hat. Die erreichte Dichtigkeit von  $4 \times 10^{-11}$  m/s der unter 7,5 °C erhärteten Probekörper tritt ca. zehn Tage später als diejenige der unter 20 °C erhärteten Proben ein.

In Abbildung 5 ist eine Korrelation zwischen der Durchlässigkeit und der einaxialen Druckfestigkeit des Verpressmaterials aufgetragen. Wie zu erwarten besteht ein Zusammenhang, der aller-

dings ausschließlich für das hier verwendete Verpressmaterial bzw. für die verwendeten Versuchsrandbedingungen gültig ist. Allgemeine Aussagen setzen wesentlich breiter angelegte Versuchsreihen voraus.

### Einaxiale Druckversuche bei Frost/Tau-Wechsel

Um den Einfluss von Frost/Tau-Wechseln auf die einaxiale Druckfestigkeit des Verpressmaterials zu prüfen, wurden Probekörper in gefetteten Plastikzylindern mit einem Durchmesser von 5 cm bei einer Abbinde-temperatur von 7,5 °C hergestellt. Nach 5, 7, 14 und 28 Tagen Aushärtungsdauer wurden die Probekörper bei -8 °C im eingefroren. Nach 1, 5 und 15 Frost/Tau-Zyklen wurde die einaxiale Druckfestigkeit mit einer Stauchungsgeschwindigkeit von 1 % der Probenhöhe/min in jeweils drei Einzelversuchen ermittelt.

Die Ergebnisse, in **Abbildung 6** dargestellt, zeigen deutlich, dass bei Frost/Tau-

Wechseln die einaxiale Druckfestigkeit sinkt. Je länger die Probe unter 7,5 °C erhärten konnte, umso stärker ist die Abminderung der einaxialen Druckfestigkeit im Vergleich zu der frostfreien Festigkeit. Die Festigkeiten nach 1, 5 und 15 Frost/Tau-Zyklen unterscheiden sich nur geringfügig, der erste Frost/Tau-Wechsel ist maßgebend (**Abb. 7**). Ein früher erster Frost/Tau-Wechsel wirkt sich besonders negativ auf die einaxiale Druckfestigkeit aus.

### Durchlässigkeitsversuche bei Frost/Tau-Wechsel

Die Probekörper wurden in Stahlzylindern bei einer Abbinde-temperatur von 7,5 °C hergestellt. Die Suspension wurde in einem Stahlzylinder mit einem Innendurchmesser von 9,6 cm und einer Höhe von 12 cm eingefüllt. Nach 14, 28, 57 und 91 Tagen Aushärtungsdauer wurden die Probekörper aus den Zylindern herausgedrückt und in eine drei-axiale Durchlässigkeitsanlage nach DIN 18130-1-TX-DE-ST-UO-1 eingebaut. Dabei wurden die Proben in eine

Gummimembran überführt und in der Durchlässigkeitszelle platziert. Die Versuche wurden bei einem isotropen Zell-druck von 1,5 bar und einem hydraulischen Gefälle von  $i = 30$  durchgeführt. Für jede Probe wurde nur ein Versuch durchgeführt und für die Frost/Tau-Wechselbeanspruchung aus der Zelle heraus in ein Gefriergerät bei -8 °C überführt. Dabei waren die Proben ausschließlich von der Gummimembran umschlossen. Die Erhärtung der Proben erfolgte bei behinderter Seitenausdehnung, der Gefriervorgang erfolgte innerhalb der Gummimembran.

Die Ergebnisse in **Abbildung 8** zeigen deutlich, dass sich die Durchlässigkeit des Verpressmaterials nach der Frost/Tau-Wechselbeanspruchung um zwei bis drei Zehnerpotenzen von  $2 \times 10^{-11}$  m/s auf bis zu  $3 \times 10^{-8}$  m/s erhöht. Mit zunehmender Anzahl von Frost/Tau-Zyklen steigt die Durchlässigkeit weiter an (**Abb. 9**), jedoch wirkt sich die erste Frost/Tau-Beanspruchung am stärksten aus, je länger die Probe unter 7,5 °C ►

## Ihr Erfolg – Unsere Bohrtechnik!

### ROTOMAX XL GTC i

für Brunnenbau und Geothermie

Leistung	168 kW
Drehmoment	34 kNm
Gesamtgewicht (Container leer)	11t
Doppelkopf	
Container-Inhalt	54 m, ø 178 + 162 m, ø 95

**Die kraftvollste und zugleich kompakteste Bohranlage Ihrer Klasse mit 58% Power-Plus!**

lieferbar ab April 2010



Born to drill



Geotec Bohrtechnik GmbH | 02596 9700-0  
Aspastraße 26 | contact@geotec-bohrtechnik.de  
59394 Nordkirchen | www.geotec-bohrtechnik.de



Umwelt Baugrund Geothermie Geotechnik

### Überlassen Sie die Effizienz Ihrer Erdwärmesondenanlage nicht dem Zufall!

**Unsere Leistungen:**

- Geothermal-Response-Tests
- Geologische / Geothermische Beratung
- Geothermische Machbarkeitsstudien
- Temperaturmessungen
- Sondenfelddimensionierung und -planung
- Planung der Anbindeleitungen
- Geothermische Simulationen (FEM)
- Prognosen der Reichweite thermischer Beeinflussung
- Wasser- und Bergrechtliche Genehmigungsverfahren
- Geologische Fachüberwachung der Ausführung
- Anlagenmonitoring
- Schieds- und Gerichtsgutachten (öbuvSV Dr. E. Mands)

**Kompetente Erkundung**

+ Fachkundige Planung  
+ Erfahrung aus über 1000 Projekten  
= Sicherheit

**Geothermal-Response-Testgeräte**

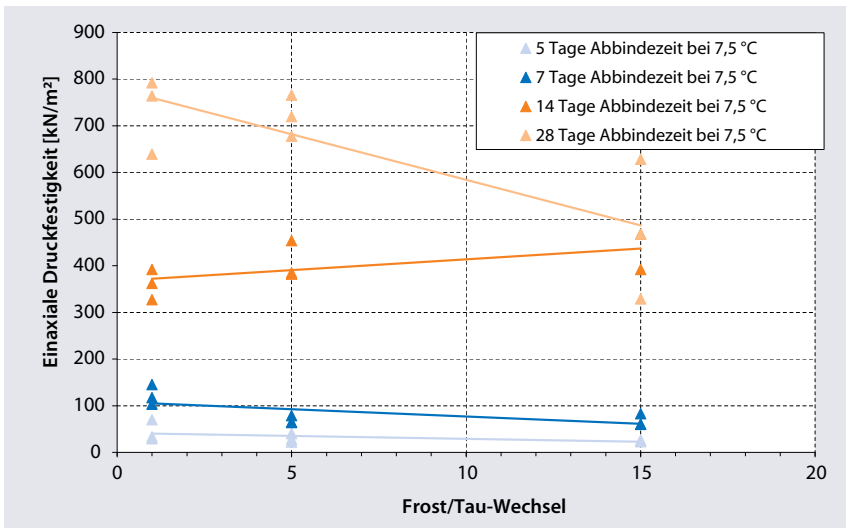


**UBeG Dr. E. Mands & M. Sauer GbR**

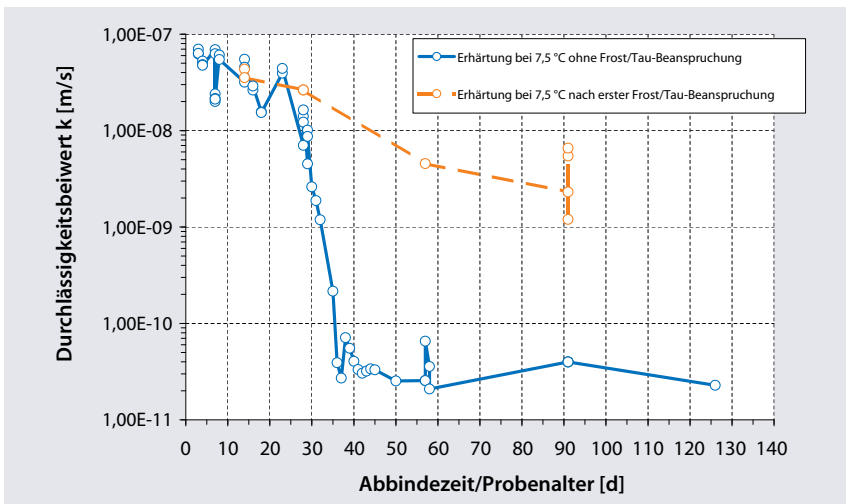
Reinbergstrasse 2 - 35580 Wetzlar - Tel.: 06441/2129-10  
Email: UBeG@UBeG.de - www.UBeG.de - Fax: 06441/2129-11

Erfahrung und Kompetenz in Erdwärme seit 12 Jahren

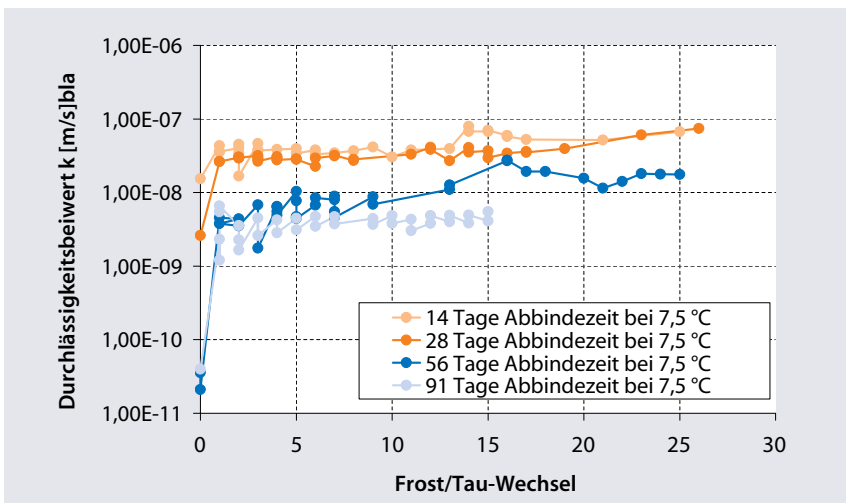




**Abb. 7** Zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des Verpressmaterials nach 1, 5 und 15 Frost/Tau-Zyklen für Proben, die unterschiedlich lange bei 7,5 °C erhärteten



**Abb. 8** Zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit des Verpressmaterials mit bzw. ohne Frost/Tau-Wechsel nach 14, 28, 56 und 91 Tagen Abbindezeit für Proben, die bei 7,5 °C erhärteten



**Abb. 9** Zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit des Verpressmaterials nach Frost/Tau-Wechseln für Proben, die unterschiedlich lange bei 7,5 °C erhärteten

erhärten konnte. Die resultierende Durchlässigkeit ist umso kleiner, je später der erste Frost/Tau-Wechsel eintritt.

Mit zunehmender Anzahl von Frost/Tau-Zyklen nahm die Qualität der Probekörper ab. Die Endflächen weichten auf und wurden vor jedem Versuch erneut abgelängt. Nach ca. 15 Wechselbeanspruchungen kam es zu Abplatzungen an den Kanten der Probekörper (siehe auch Abbildung 2).

### Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Änderung der mechanisch-hydraulischen Eigenschaften von Verpressmaterial für Erdwärmesonden während der Erhärtung bzw. infolge von Frost/Tau-Wechseln wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Dazu gehören Durchlässigkeitsversuche und einaxiale Druckversuche. Diese Versuche ergaben, dass wie für zementgebundene Verpressmaterialien zu erwarten während des Abbindeprozesses bei konstanter Temperatur die einaxiale Druckfestigkeit zunimmt und die Wasserdurchlässigkeit abnimmt. Im Vergleich zur Zimmertemperatur von 20 °C wurden während der Versuchsphase bei In-situ-Bedingungen (7,5 °C) eine geringere einaxiale Druckfestigkeit und eine größere Wasserdurchlässigkeit erreicht. Bei Frost/Tau-Wechsel ergab sich grundsätzlich bei gleicher Abbindezeit eine geringere einaxiale Druckfestigkeit und eine größere Wasserdurchlässigkeit. Der Zeitpunkt des ersten Frost/Tau-Zyklus verändert die Eigenschaften der Proben offensichtlich am meisten. Die durchgeführten Versuche sind damit für die Erarbeitung einer Untersuchungsmethode zur Bewertung der Dichtfunktion von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden relevant.

### Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen die Notwendigkeit einer standardisierten Untersuchungsmethode zur Festigkeits- und Wasserdurchlässigkeitsprüfung an Proben aus Verpressmaterial für Erdwärmesonden auf. Aufgrund der bei einer Erdwärmesonde ablaufenden mechanisch-hydraulisch-thermisch gekoppelten Prozesse und der Erfahrungen der gezeigten Vorver-

suche lassen sich folgende Anforderungen an Eignungsversuche für zementgebundene Verpressmaterialien für Erdwärmesonden ableiten:

Bei Laborversuchen sollten Proben aus Verpressmaterial bei In-situ-Temperaturen (natürliche tiefenabhängige Temperatur des Erdreichs) und In-situ-Spannungsbedingungen (tiefenabhängige Überlagerungsspannung) hergestellt werden. Dies ist z. B. in einer modifizierten triaxialen Durchlässigkeitszelle mit isotropem Druck oder in einer Triaxialzelle mit anisotropem Druck möglich.

Die Forderung nach einer einheitlichen Abbindezeit für die Durchführung von Durchlässigkeits- und Scherversuchen wurde mit den vorliegenden Vorversuchen aufgezeigt. Gegebenenfalls können die Bodeneigenschaften für verschiedene Abbindezeiten umgerechnet werden. Zur Ermittlung entsprechender Umrechnungsfaktoren sind weitere Untersuchungen erforderlich. Ob beim Gefriervorgang eine axiale Ausdehnung des zylindrischen Verpresskörpers In-situ eintreten kann, hängt wesentlich von der Tiefe, der Bodenart bzw. von der Überlagerungsspannung ab. Das gleiche gilt für die radiale Ausdehnung. Werden Proben aus Verpressmaterial im Labor gefroren, so sollte dies bei In-situ-Temperaturen und bei In-situ-Spannungsrandbedingungen erfolgen. Das Versuchsgerät muss eine beliebige Zahl von Frost/Tau-Wechseln zulassen. In modifizierten Durchlässigkeits- bzw. Triaxialzellen ist die übliche Zellflüssigkeit Wasser z. B. durch Glykol zu ersetzen.

Der Gefriervorgang im Boden ist nicht nur mit einem Phasenwechsel flüssig/fest des Porenwassers, sondern auch mit Änderungen der Eigenschaften des Bodens verbunden, z. B. Gefüge, Dichte, Gehalt des ungefrorenen Wassers, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität. Diese Änderungen werden durch die Volumenzunahme beim Gefrieren des Wassers und durch die Sogwirkung [3] an der Gefrierfront und damit verbundene Ansammlungen von Eislinsen verursacht. Die entsprechenden Prozesse hängen u. a. vom Bodentyp, vom Sättigungsgrad des Bodens und

vom Wasserangebot an der Gefrierfront ab. Wenn bei Erdwärmesonden auch der Boden gefriert, sollte dies bei der Konzeption des Versuchsgeräts berücksichtigt werden. Die Autoren planen weitere Versuche mit einer modifizierten Durchlässigkeitszelle gemäß DIN 18130-1-TX-DE-ST-UO-2 in Kooperation mit E&D durchzuführen.

#### Literatur

- [1] Jessberger, H. L./Jagow-Klaff, R. (1996): Frost im Baugrund Im Grundbau-Taschenbuch, 5. Auflage, Abschnitte 1.13, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [2] Hager M. (1996): Eisdruk. Im Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 5. Auflage, Abschnitt 1.14, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [3] Unold, F. (2006): Der Gefriersog bei der Bodenfröschung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- [4] ASC (2002): Eignungsuntersuchungen von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden – Technischer Endbericht. Austrian Research Center GmbH

#### Autoren:

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

- [5] Czurda, H. (2007): Reliable und Durable Grouting of Borehole Heat Exchangers. Proc. of European Geothermal Congress 2007 in Unterhaching (Germany)
- [6] Herrmann, V. (2008): Hinterfüllung von Erdwärmesondenbohrungen – Systemsicherheit, Qualitätsprüfung und Frost-/Taubeständigkeit. Vortrag 30. Baugrundtagung 2008 Dortmund
- [7] Niederbrücker, R./Steinbacher, N. (2008): Eignung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden – Teil 1: Laboruntersuchungen. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 2/08, S. 48 – 56
- [8] Müller, L. (2009): Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. Beitrag zum Geothermiekongress 2009 in Bochum
- [9] DVGW Positionspapier Erdwärmennutzung in Trinkwassereinzugsgebieten, Stand 10. November 2008
- [10] VDI-Richtlinie 4640 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

Abbildungen: Technische Universität Hamburg-Harburg, ausser Abb. 2: Ingenieurgesellschaft Enders & Dührkop mbH

Dipl.-Ing. Dipl.-Geol. Dr. Jens Frank  
Ingenieurgesellschaft Enders & Dührkop mbH  
Gasstr. 18, Haus 4  
22761 Hamburg  
Tel.: 040 87 08-680  
Fax: 040 87 30-10  
E-Mail: frank@enders-duehrkop.de  
Internet: www.enders-duehrkop.de

**HDG**  
UMWELTECHNIK  
GmbH  
Systempartner für Bohr- und Installationsunternehmen

**Einführung der neuen Produktlinie**

**HDG DAEMO HS**  
Hydraulischer Spezialbinder für Bohrtechnik, Tiefbau und Geothermie

**HDG THERMO HS**  
Hydraulisch thermisch verbesserter Spezialmörtel für Erdwärmesonden

**HDG UMWELTECHNIK GmbH**  
Stolzenseeweg 1, D-88353 Kisslegg  
Telefon +49 (0) 7563 - 91 24 78 - 0  
Telefax +49 (0) 7563 - 91 24 78 - 20  
[www.hdg-gmbh.com](http://www.hdg-gmbh.com)

Grundbau  
Geothermie  
Erdbaulabor  
Umwelttechnik

INGENIEURGESSELLSCHAFT  
ENDERS & DÜHRKOP

Gasstraße 18 Haus 4 . 22761 Hamburg  
Tel.: 040 / 87 08 68-0 . Fax: 040 / 87 30 10  
[www.enders-duehrkop.de](http://www.enders-duehrkop.de)