

Frost - Tau – Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden

Prof. Dr. Lutz Müller,

Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachbereich Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Geotechnik

Keywords: Grundwasserschutz, Qualitätssicherung, Materialanforderungen an Hinterfüllbaustoffe

Zusammenfassung

Die in Geothermiebohrungen eingesetzten Hinterfüllbaustoffe müssen unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes und der Effizienz und Langzeitbeständigkeit der Erdwärmesondenanlage unterschiedliche Materialanforderungen erfüllen. In letzter Zeit ist die Frost – Tau – Beständigkeit der Materialien verstärkt in den Fokus gerückt. Bisher fehlende, einheitliche Untersuchungs- und Bewertungsmöglichkeiten haben in einigen Bundesländern bereits zu einer restriktiven Genehmigungspraxis geführt. Befürchtet wird eine mangelhafte Abdichtung des Bohrlochringraums durch Frost – Tau – Beanspruchung und daraus resultierende nachteilige Auswirkungen für das Grundwasser.

Vorgestellt wird eine Untersuchungsmethodik, mit der durch Kombination standardisierter Messverfahren die Dichtigkeit und die Frost – Tau – Beständigkeit von Hinterfüllbaustoffen geprüft werden kann. Außerdem werden Qualitätsanforderungen und Bewertungskriterien dargestellt, mit denen dem Grundwasserschutz auf der einen Seite und der Erdwärmegewinnung auf der anderen Seite Rechnung getragen werden kann.

1. Einleitung

An die Planung und Ausführung von Erdwärmesonden sind Qualitätsanforderungen zu stellen, die sowohl den Grundwasserschutz, als auch die Funktionalität und Langzeitbeständigkeit der Erdwärmesondenanlagen sicherstellen. Dies gilt insbesondere für das Bohrverfahren, für den Sondereinbau und für die eingesetzten Produkte und Baustoffe, die einer den Einsatzbedingungen entsprechenden Qualitätsprüfung und Qualitätskontrolle unterzogen werden müssen.

Bei der Errichtung von Erdwärmesondenanlagen sind derzeit die VDI – Richtlinie 4640 und die in zahlreichen Bundesländern existierenden Leitfäden zu berücksichtigen. Die dort formulierten Anforderungen sind jedoch weder einheitlich noch ausreichend. Es fehlt bisher ein verbindliches Regelwerk, das Materialeigenschaften, Einbaukriterien und Prüfmethode konkret festlegt. In der Praxis werden derzeit verschiedenartige Baustoffe mit teilweise sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften zur Ringraumverfüllung der Sonden eingesetzt. Eine Festlegung der erforderlichen Materialeigenschaften für Hinterfüllbaustoffe und geeigneter Prüfmethode ist für die Qualitätssicherung und zur Vermeidung von Schadensfällen dringend geboten.

2. Funktion der Ringraumverfüllung

Beim Bau von vertikalen Erdwärmesonden, der heute üblichsten Bauform zur Erschließung oberflächennaher Geothermie, werden Sondenrohre in Bohrungen eingebaut, die in Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen und der Dimensionierung der Anlage üblicherweise Tiefen zwischen 50 m und 150 m aufweisen. Die derzeit üblichste Bauform sind Doppel U–Sonden aus

Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), in denen ein Wärmeträgermedium, meist ein Monoethylenglykol - Wasser – Gemisch zirkuliert.

Der Ringraum zwischen den Rohren und der Bohrlochwand und alle Spalträume zwischen den Rohren müssen über die gesamte Länge der Sonde mit einer erstarrungsfähigen, dauerhaft abdichtenden Suspension hoher Leitfähigkeit verfüllt werden. Eine optimale Verfüllung ohne Luft einschüsse und Hohlräume stellt den Wärmefluss zwischen dem umgebenden Gestein und dem Wärmeträgermedium in der Sonde sicher. Weiterhin ist für den Grundwasserschutz von Bedeutung, dass das Bohrloch ausreichend abgedichtet wird (siehe Abb.1). Die Hinterfüllung soll eine hydraulische Verbindung von zwei oder mehreren Grundwasserstockwerken verhindern und den Eintrag von Schadstoffen von der Oberfläche ausschließen.

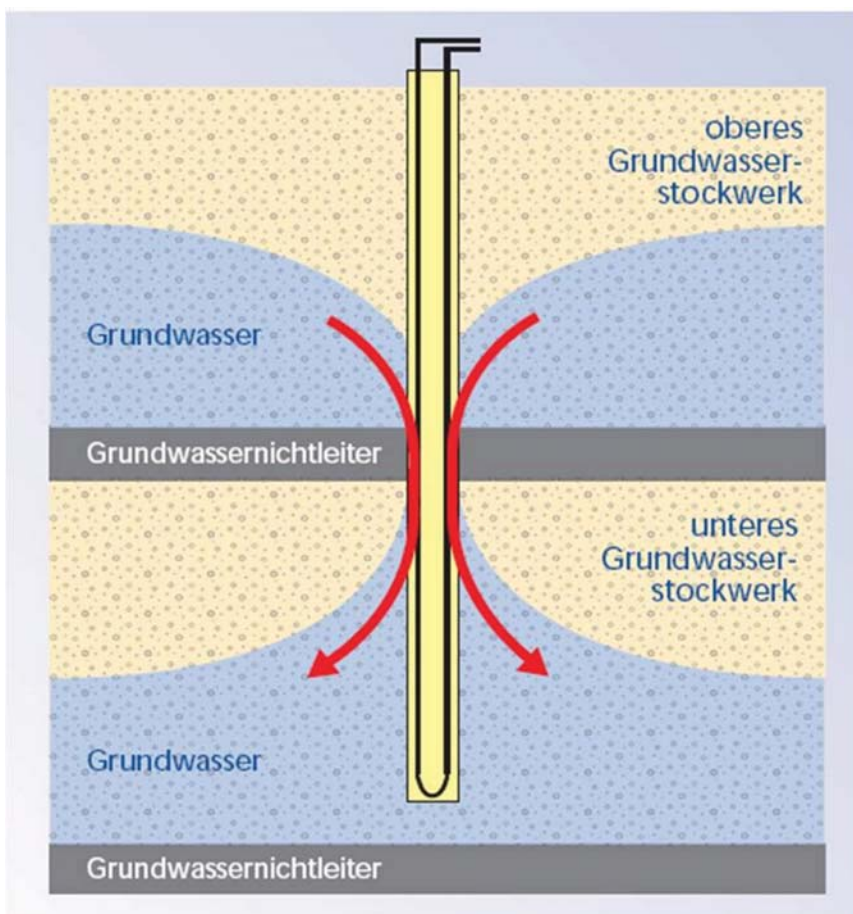


Abb. 1 Verbindung von zwei Grundwasserstockwerken durch unzureichend abgedichtete Erdwärmesonde (HLUG, 2005)

Für die Ringraumverfüllung werden in der Praxis derzeit verschiedene Baustoffe eingesetzt, wobei generell zwischen werksfertigen Verfüllbaustoffen und Baustellenmischungen zu unterscheiden ist:

- Zement-Bentonit-Mischungen aus dem Brunnenbau und für Hohlraumabdichtungen (sogenannte „Dämmer“)
- Baustellenmischungen aus Zement, Bentonit und Quarzsand in unterschiedlicher Zusammensetzung gemäß VDI 4640, Blatt 2 (2001)
- Thermisch verbesserte Fertigprodukte für Erdwärmesonden
- Thermisch verbesserte und Frost – Tau – beständige Fertigprodukte für Erdwärmesonden

Während die Dämm- und Baustellenmischungen aus anderen tiefbautechnischen Anwendungsbereichen stammen, wurden die beiden letztgenannten Fertigprodukte speziell für Erdwärmesonden entwickelt.

3. Frost – Tauwechsel – Problematik

Wird im realen Betrieb der Erdwärmesondenanlage dem Boden/Gestein mehr Wärme entzogen, als nachströmen kann, kommt es zu einer zunehmenden Abkühlung bis zum Gefrieren der unmittelbaren Umgebung der Sonde. Der Hinterfüllbaustoff gefriert und wird anschließend durch den Wärmefluss bei nachlassendem Wärmeentzug aufgetaut. Derartige Betriebszustände können auftreten bei:

- Temporär hohen Entzugsleistungen zur Abdeckung von Spitzenlasten,
- fehlerhaft bemessenen Anlagen
- veränderten Nutzungsbedingungen

Dabei wird der die Sonde umgebende Verfüllbaustoff einer Frost – Tau – Belastung ausgesetzt. Nicht frostbeständige Verfüllbaustoffe bekommen Risse, die zum Verlust der Festigkeit und der Abdichtungsfunktion des Verfüllbaustoffs führen. Abb. 2 zeigt die Entstehung frostbedingter Wasserwegsamkeiten.

Nach VDI 4640, Blatt 2, muss die Verfüllsuspension für die jeweilige Einsatztemperatur geeignet sein. Dabei ist insbesondere bei reinem Wärmeentzug auf Frostsicherheit zu achten. Durch Zugabe von Zement wird der Einsatz von Temperaturen bis -15°C möglich. Andererseits sollen zu hohe Zementzugaben vermieden werden, damit die Bohrlochverfüllung leicht plastisch bleibt und die thermische Dilatation der Erdwärmesonde nicht behindert wird.

4. Prüfung des Frost – Tauwechsel – Verhaltens

Standardisierte Prüfmethode zur Untersuchung der Frost – Tauwechsel – Beständigkeit existieren für Natursteine und für Beton (DIN 52104, DIN EN 1367/1, DIN EN 12371, DIN CEN/TS 12390-9). Spezielle Prüfmethode zur Beurteilung des Frost – Tauwechsel – Verhaltens von Hinterfüllbaustoffen existieren bisher nicht. Für diese Baustoffe wird daher auf die standardisierten Frostuntersuchungsmethode für Gesteine und betonhaltige Baustoffe zurückgegriffen.

Im Regelfall wird der Frostwiderstand durch Befrieren an Luft und Auftauen im Wasserbad geprüft. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden am Fachgebiet Geotechnik der Hochschule Ostwestfalen – Lippe in den Jahren 2003/2004 erstmals marktgängige Hinterfüllbaustoffe Frost – Tauwechsel – Versuchen nach DIN 52104 unterzogen (MÜLLER, 2004). Seitdem wurden zahlreiche weitere Untersuchungen an unterschiedlichen Fertigprodukten und Baustellenmischungen durchgeführt und an der Entwicklung neuer Produkte mitgearbeitet.

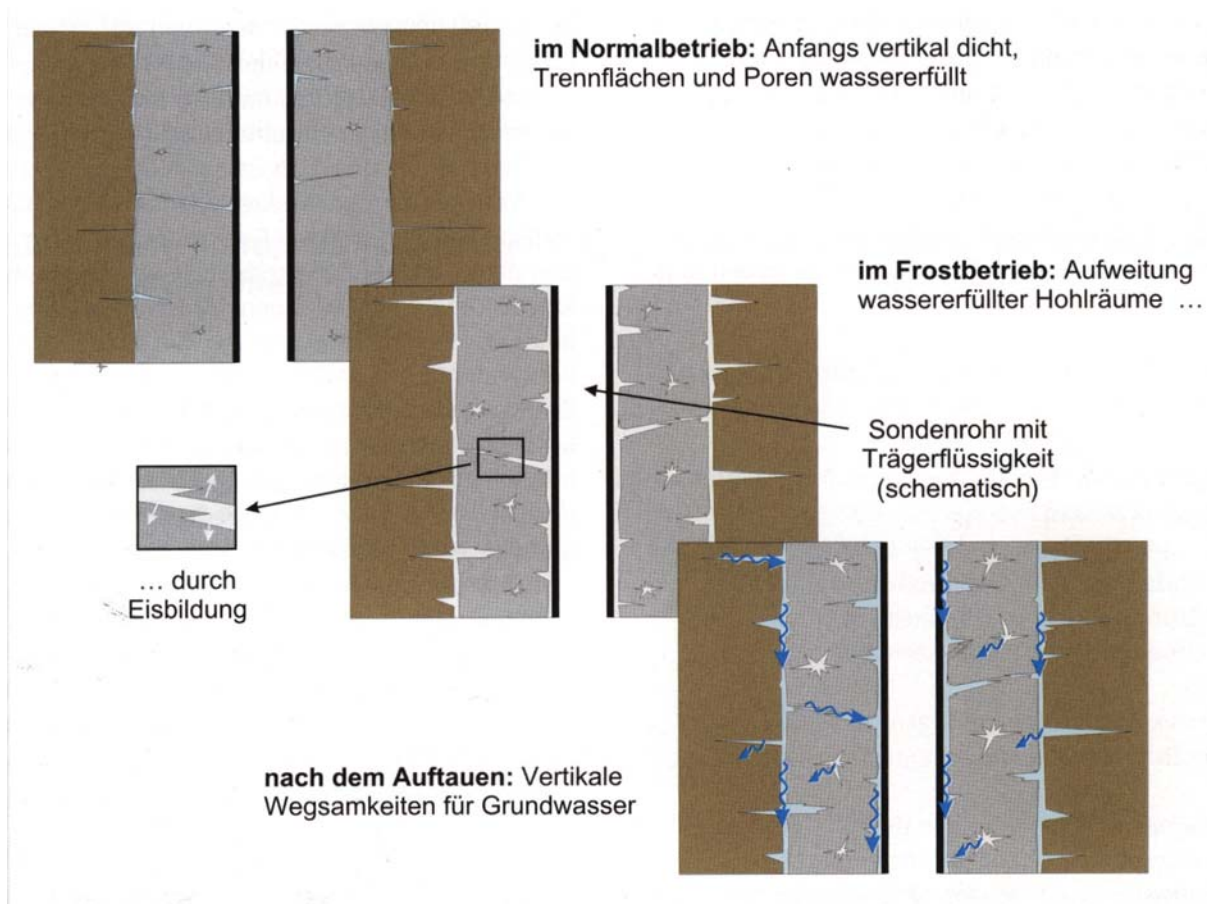


Abb. 2: Wasserwegsamkeiten für Grundwasser durch Frosteinwirkungen (HELLENTHAL & WLOFF, 2005)

Bei der Bestandsaufnahme wurden zunächst handelsübliche Dämmen und Erdwärmesondenhinterfüllbaustoffe sowie eine Baustellenmischung gemäß VDI 4620 (Bentonit / HOZ-Mischung) miteinander verglichen. Die Suspensionen zur Herstellung der zylindrischen Prüfkörper wurden nach Herstellerangaben angemischt (Abb. 3). Zur Charakterisierung der Baustoffe wurden an den frischen Suspensionen die Suspensionsdichten, die Korndichten und die Trichterauslaufzeiten ermittelt. Die Werte lagen im üblichen Bereich und streuten in relativ geringen Grenzen (Abb. 4).



Abb. 3: Prüfkörper für Laboruntersuchungen

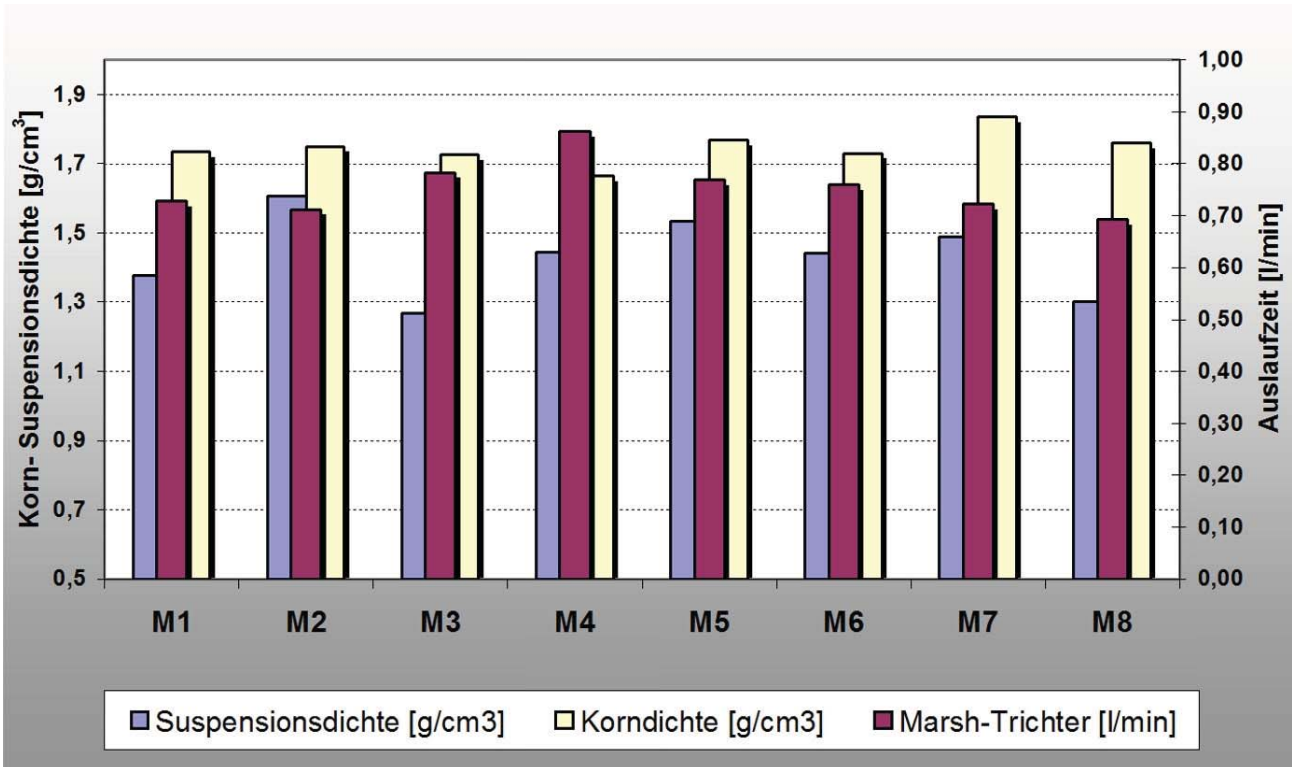


Abb. 4: Suspensionsdichte, Korndichte und Trichterauslaufzeit von Hinterfüllbaustoffen

An den ausgehärteten Proben wurden die Absetzmaße und nach 28 Tagen Abbindezeit, die einaxiale Druckfestigkeit und die Wasserdurchlässigkeit ermittelt. Die einaxialen Druckfestigkeiten waren insgesamt sehr niedrig und variierten zwischen 0,25 und 1,8 N/mm². Druckfestigkeiten von 1 – 5 N/mm² sind als sehr niedrig, Werte < 1 N/mm² als extrem niedrig einzustufen. Sie entsprechen der Druckfestigkeit von Salzgesteinen. Für nicht statisch belastete Hohlräume wird eine einaxiale Festigkeit ≥ 1 N/mm² als ausreichend angesehen (AZ BUT, 1999). Dieser Wert kann als Mindestanforderung für einen ausreichenden Schutz der Sonde vor punktuellen Druckbelastungen angesehen werden. Abb. 5 zeigt, dass die Druckfestigkeiten bei Hinterfüllbaustoffen erheblich variieren können und 3 Materialien mit Werten $\leq 0,5$ N/mm² die Mindestanforderung nicht erfüllen.

5. Ergebnisse der Frost – Tauwechsel – Beanspruchung

Die Untersuchung des Materialverhaltens bei Frost – Tauwechseln erfolgte bisher mit der in DIN 52104-A beschriebenen Versuchsmethode. Die wassergesättigten, zylindrischen Prüfkörper wurden bis zu 10 Mal bei -15° bis -20°C mindestens 4 Stunden befrosten und anschließend im Wasserbad bei +20°C aufgetaut. Nach jedem Frost – Tau – Zyklus erfolgte eine optische Prüfung auf Rissbildungen und Abplatzungen. Zur quantitativen Ermittlung des Massenverlustes wurden die Prüfkörper vor und nach jedem Frost – Tauwechsel gewogen. Abb. 6 zeigt den prozentualen Massenverlust bezogen auf die Ausgangsproben verschiedener Baustoffe.

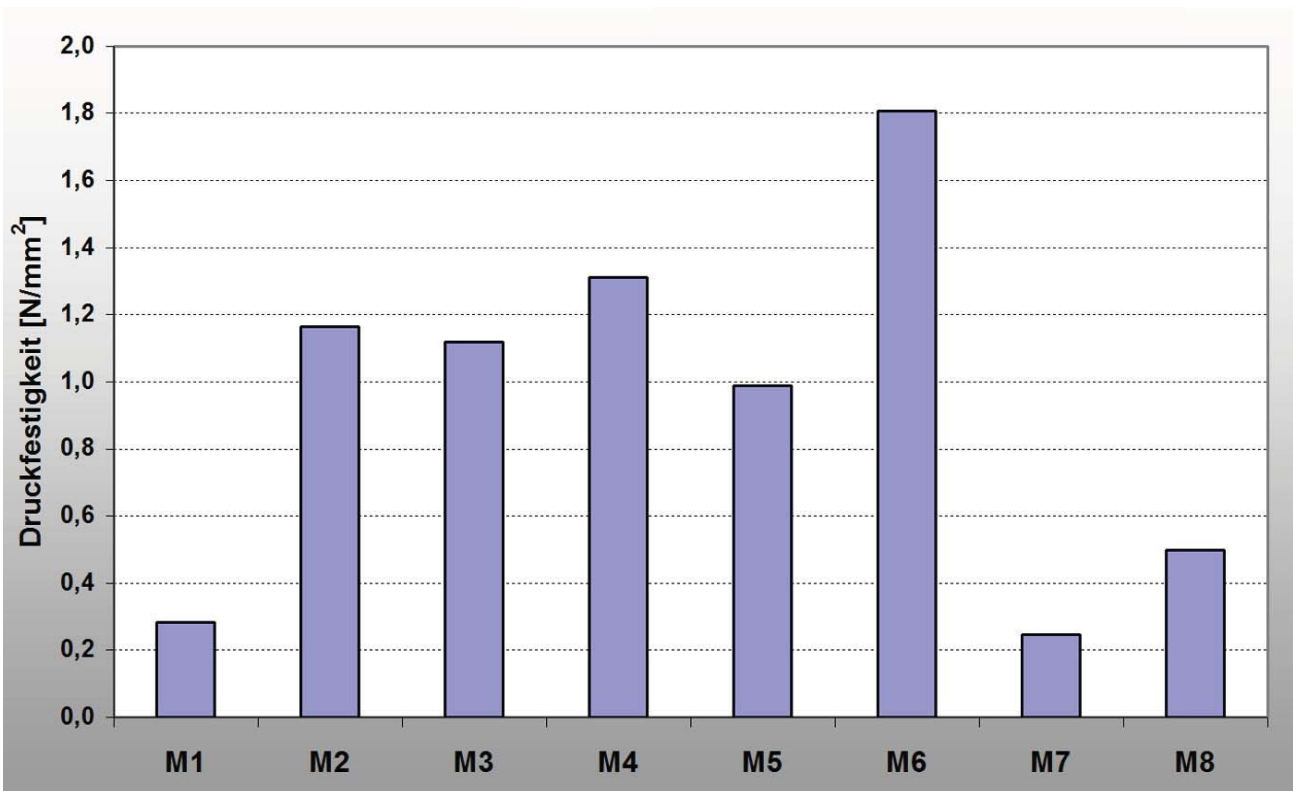


Abb. 5: Einaxiale Druckfestigkeiten nach 28 Tagen Aushärtung

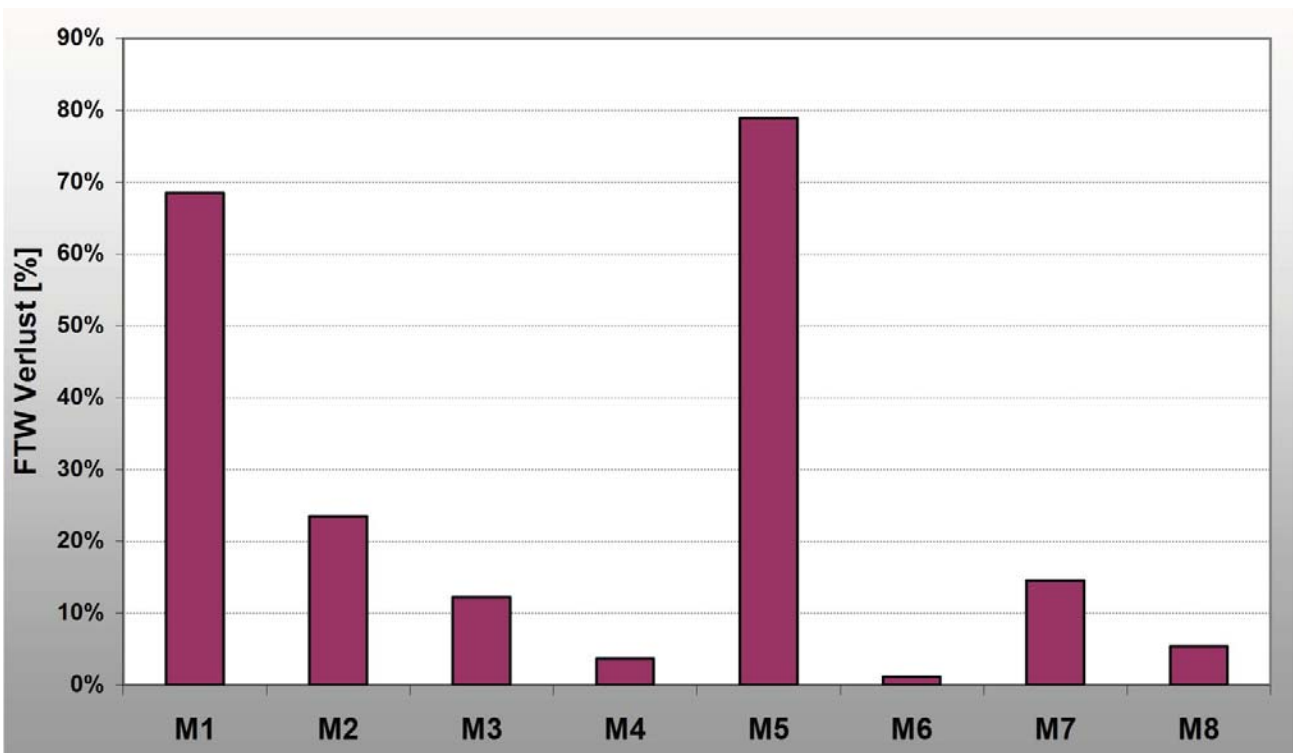


Abb. 6: Massenverluste der Hinterfüllbaustoffe nach Frost-Tauwechsel-Bearbeitung

Bei einigen Baustoffen traten bereits nach wenigen Frost – Tau – Belastungen deutliche Risse und Abplatzungen auf, die bei Versuchsende zu Massenverlusten von bis zu 79% gegenüber der Ausgangsmasse führten. Demgegenüber wiesen speziell für Erdwärmesonden entwickelte Fertigprodukte keine oder nur geringfügige Spuren der Frostbelastung in Form von sehr kleinen Rissen oder geringen Abplatzungen an den Kanten der Probekörper auf. Die Massenverluste lagen hier zwischen 2 und 6%.

Die VDI Richtlinie 4640, Blatt 2, empfiehlt zur Hinterfüllung von Erdwärmesonden Bentonit/HOZ/Wasser – Suspensionen. Die an diesen Mischungen durchgeführten Frost – Tauwechsel – Versuche (MÜLLER, 2007) ergaben ebenfalls sehr hohe Massenverluste bis über 50%. Die Baustellenmischungen sollten daher nicht mehr verwendet und eine Überarbeitung der VDI 4640 zu diesem Punkt vorgenommen werden. Abb.7 zeigt das Ergebnis eines Frost-Tau-Versuchs an einem nicht frostbeständigen und an einem frostbeständigen Hinterfüllbaustoff.

Das sehr unterschiedliche Frost–Tauwechsel–Verhalten von Hinterfüllbaustoffen wurde inzwischen durch Untersuchungen mit anderen standardisierten Verfahren (nach DIN CEN/TS 12390-9 und nach ÖNORM B3303) und mit anderen Temperaturprofilen (Befrostung bei -10°, Auftauen bei +10°) bestätigt (HERMANN & CZURDA, 2007 und NIEDERBRUCKER & STEINBACHER, 2008). Die Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit einer Verbesserung der Frostbeständigkeit der Hinterfüllbaustoffe und einer Festlegung einheitlicher Prüfkriterien für ihre Beurteilung.



Abb. 7: Prüfkörper eines nicht frostbeständigen und eines frostbeständigen Hinterfüllbaustoffs nach der Prüfung gemäß DIN EN 12371

Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ist bei allen standardisierten Labormethoden zu berücksichtigen, dass die Randbedingungen einer in Betrieb befindlichen Erdwärmesonde nicht hinreichend berücksichtigt werden. So erfolgt die Befrostung der Proben im Laborversuch bisher von außen nach innen, bei der Erdwärmesonde im Bohrloch jedoch von innen nach außen. Weiterhin ist der Hinterfüllbaustoff im Bohrloch eingespannt, wodurch die Rissbildung behindert oder sogar unterbunden werden kann. Rissbildungen an den Probekörpern im Labor dürfen daher nicht überinterpretiert werden. Für sich allein dienen sie zunächst einem qualitativen Materialvergleich.

6. Prüfung der Frost – Tau – Beständigkeit

Zur besseren Beurteilung der realen Bedingungen und Belastungen einer im Betrieb befindlichen Erdwärmesonde wurde im Geotechniklabor der Hochschule OWL ein Versuchsstand entwickelt, in dem die Hinterfüllbaustoffe wie bei realen Erdwärmesonden von innen nach außen befroren oder erwärmt werden können und dabei in Bodenmaterial eingebettet sind (Abb. 8). Die Prüfkörper, in die Temperaturfühler mit eingegossen werden, sind in Abb. 9 dargestellt. Während des Versuchs werden die Temperaturen in der Sonde, im Hinterfüllbaustoff und im umgebenden Boden aufgezeichnet. Abb.10 zeigt das Temperaturprofil bei Wärmeentzug in einem gut leitenden Boden.

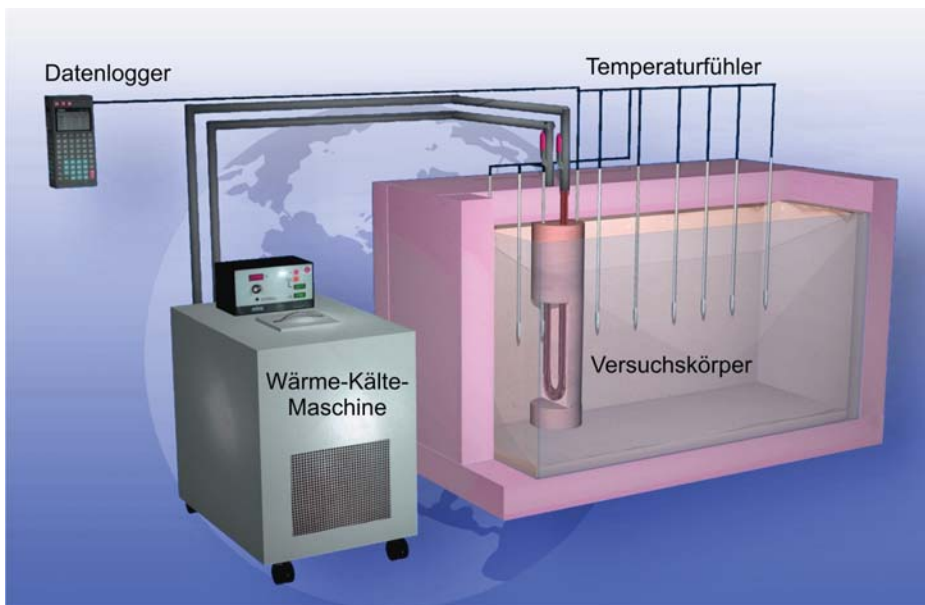


Abb. 8: Versuchsstand im Technikumsmaßstab



Abb. 9: Prüfkörper für den Einbau im Versuchsstand

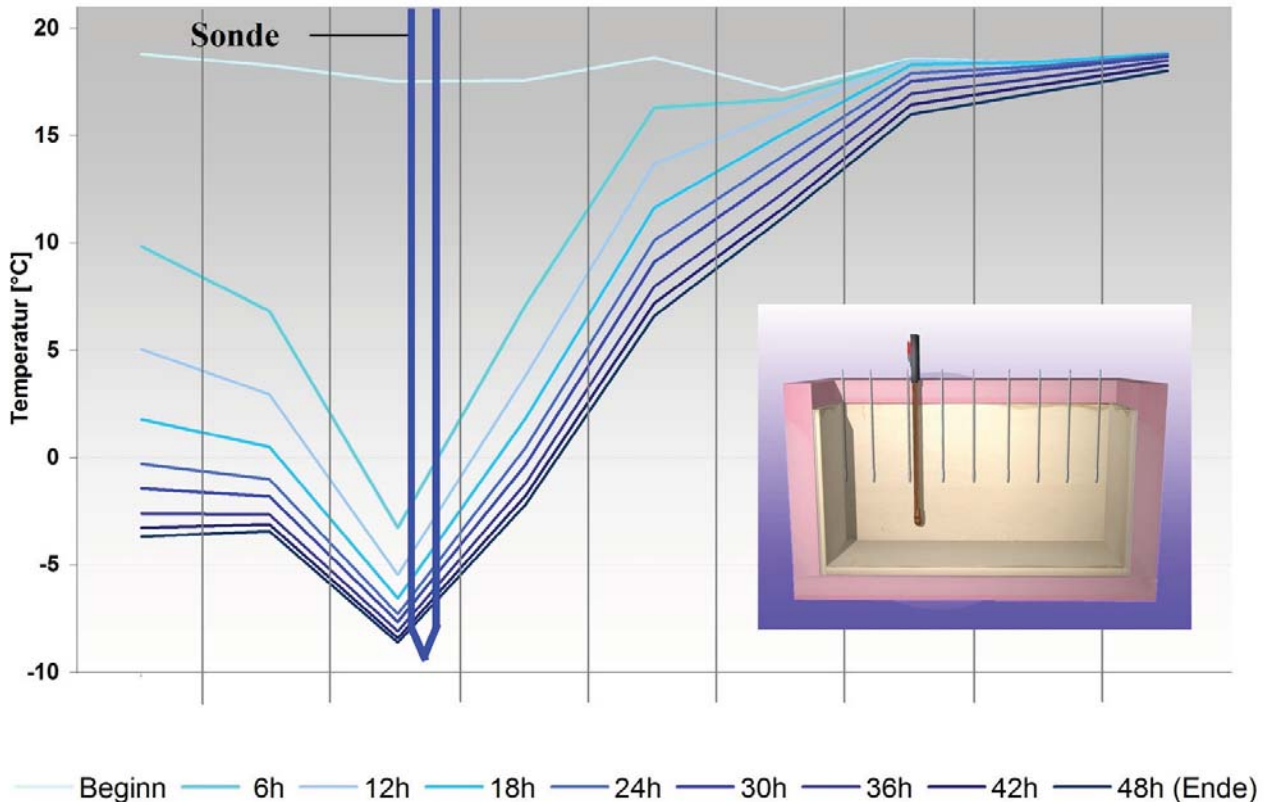


Abb. 10: Temperaturprofil bei Wärmeentzug

Bei Reihenuntersuchungen, z. B. im Rahmen einer Qualitätsüberwachung, ist der Technikumsversuch zu aufwendig. Nach den bisher gemachten Erfahrungen kann die Frost – Tau – Widerstandsfähigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden auch mit standardisierten Prüfverfahren hinreichend genau untersucht werden, wenn diese mit Druckfestigkeits- und Wasserdurchlässigkeitsprüfungen kombiniert werden (MÜLLER, 2009). Zurzeit wird durch Vergleichsuntersuchungen genauer untersucht, welche Prüfmethode für die Frost- Tauwechsel - Untersuchung am ehesten zu empfehlen ist, da auch der Einfluss der Prüfmethode zu beachten ist.

Für eine zuverlässige Beurteilung der Frostbeständigkeit ist daher zu empfehlen, neben der Frost – Tau – Untersuchung (z. B. nach DIN 52104 oder DIN EN 12371) zusätzlich die Wasserdurchlässigkeit in Triaxialzellen nach DIN 18130 (s. Abb. 11) und die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136 an befestigten und unbefestigten Prüfkörpern des Hinterfüllbaustoffs zu bestimmen. Mit dieser Kombination von Standardverfahren ist nach den bisher gemachten Erfahrungen eine zuverlässige Beurteilung der Frostbeständigkeit für den Anwendungsfall Erdwärmesonden möglich.

Die in letzter Zeit geprüften Hinterfüllbaustoffe zeigen, dass einige Hersteller ihre Produkte speziell im Hinblick auf die Frost – Tau – Beständigkeit weiterentwickelt haben. Derzeit sind mehrere Produkte am Markt verfügbar, bei denen mit der beschriebenen Versuchsmethodik eine ausreichende Frostbeständigkeit festgestellt werden konnte. Die Prüfkörper dieser Produkte zeigen nach der Befrostung weder hydraulisch wirksame Rissbildungen noch Abplatzungen, die zu Massenverlust führen. Die Überprüfung der Druckfestigkeit und der Durchlässigkeit nach der Befrostung ergab keine nachteiligen Veränderungen gegenüber den an unbefestigten Proben ermittelten Kenngrößen.



Abb. 11: Prüfstand für Durchlässigkeitsuntersuchungen mit Triaxialzellen

7. Fazit

Bei der Herstellung und durch den Betrieb von Erdwärmesonden dürfen keine nachteiligen Veränderungen des Grundwassers entstehen. Aus Sicht des vorsorgenden Grundwasserschutzes ist es daher gerechtfertigt, Anforderungen zu stellen, die das Risiko nachteiliger Grundwassereinwirkungen reduzieren.

In letzter Zeit vereinzelt erhobene Forderungen, Erdwärmesonden generell nur mit Wasser zu betreiben, weil es keine frostsicheren Hinterfüllbaustoffe gäbe, sind nach den vorliegenden Ergebnissen nicht gerechtfertigt. Am Markt sind inzwischen ausreichend frostsichere Baustoffe verfügbar und es gibt Prüfmethode, um die Frostbeständigkeit nachzuweisen.

Die berechtigten Interessen des Grundwasserschutzes und der Erdwärmennutzung müssen und können in Einklang gebracht werden. Zu fordern ist eine Verbesserung der Qualitätssicherung bei der Errichtung der Erdwärmegewinnungsanlagen und die Verwendung qualitätsgeprüfter Baustoffe und Einbaumaterialien. Notwendig sind dazu einheitliche Anforderungskriterien und einheitliche Prüfmethode. Diesbezüglich besteht noch Forschungs- und Regelungsbedarf.

Literatur:

ANNELIESE BUT (1999): Merkblatt zur Verfüllung von Hohlräumen mit hydraulischen Bindemitteln im Tiefbau. Anneliese Zement AG, Ennigerloh.

HELLENTHAL, N. und WOLFF, G. (2005): Nutzung der Geothermie in Stuttgart. Schriftenreihe Amt für Umweltschutz, Heft 1/2005, Stadt Stuttgart.

HERRMANN; V: J: CZURDA, K. (2007): Frost – Tau beständige Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden. - In: OTTO, F. Veröff. 16. Tagung f. Ingenieurgeologie S. 11 – 14, Bochum.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (HLUG) (2005): Erdwärmennutzung in Hessen, Leitfaden für Erdwärmepumpen. - 32 S. HLUG, Wiesbaden

MÜLLER, L. (2004): Geotechnische Untersuchungen zur Optimierung der geotechnischen Energiegewinnung mit Erdwärmesonden. – In: Mitt. Ingenieur- und Hydrogeologie, H. 89, 49 – 58, RWTH Aachen

MÜLLER, L. (2007): Geotechnische Anforderungen an die Qualität und Ausführung von Erdwärmesonden. In: OTTO, F. Veröff. 16. Tagung f. Ingenieurgeologie, S. 359 – 366, Bochum

MÜLLER, L. (2009): Frost-Tauwechsel-Beständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. – S. 30 – 36, bbr 07-08/2009

NIEDERBRUCKER, R., STEINBACHER, N. (2008): Eignung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden, Teil 1: Laboruntersuchungen. – S. 48 – 56, bbr 2/08

VDI RICHTLINIE 4640,Blatt2 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes- Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.-32 S., Verein Deutscher Ingenieure; Beuth Verlag, Berlin

Kontakt: Prof. Dr. Lutz Müller, Hochschule Ostwestfalen–Lippe, Fachgebiet Geotechnik, An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter, E-Mail: lutz.mueller@hs-owl.de