

# **EWS-tech: Projekt-Übersicht und erste Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden**

Dipl.-Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker

Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische  
Energiesysteme

Meitnerstr. 8, 70563 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711-673200050, Fax: +49 (0)711-673200099

riegger@solites.de

www.solites.de

## **1. Abstract**

The joint research project EWS-tech whose project partners are

- Solites (Coordinator),
- KIT - Institut für Angewandte Geowissenschaften,
- KIT – Materialprüfungs- und Forschungsanstalt and
- EIFER (European Institute for Energy Research)

aims at the solution of basic questions concerning the grouting quality of borehole heat exchangers. For this, a three-stage approach of laboratory, small-scale and real-scale experiments is chosen.

On the laboratory scale, detailed characterizations of borehole grouting materials regarding their rheological behavior and their mechanical properties will be done. These characterizations serve as a basis for further studies.

Furthermore studies will be done in laboratory scale to determine the material and system permeability of grouting materials and borehole heat exchanger systems in the presence of sulfate aggressive or CO<sub>2</sub> containing groundwater.

Based on the laboratory characterization small-scale experiments will be performed to visualize the grouting process of borehole heat exchangers. The goal is to understand the grouting process and the origin of discontinuities within the grouting. Grouting parameters (e.g. different fractions of water, different mixing time and

intensity, different grouting pump speed etc.) that ensure a good grouting quality should be determined.

With the help of real scale experiments the results that have been determined in the laboratory and small-scale experiments should be verified.

By correlating the results and findings from the laboratory, small-scale and real-scale tests accepted laboratory test criteria and test criteria for on-site use will be developed. Furthermore recommendations for a high-quality grouting of borehole heat exchangers will be given.

The insights gained on the long-term stability of grouting material can serve as a basis for an assessment of the damage potential of potentially hazardous borehole heat exchangers.

In summary, the research project EWS-tech contributes to a significant improvement in borehole heat exchanger quality.

## **2. Problemstellung**

In den letzten Jahren wurde an Hand zahlreicher schwerwiegender Schadensfälle in Baden-Württemberg (z.B. in Staufen, Schorndorf, Leonberg-Eltingen, Rudersberg-Zumhof) im Zusammenhang mit der Erstellung von Erdwärmesonden deutlich, dass zahlreiche Fragestellungen zur hydraulischen Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrlöchern bislang nicht geklärt sind. Die Lösung dieses Umstandes ist - insbesondere vor dem Hintergrund der großen Anzahl der jährlich in Baden-Württemberg erstellten Erdwärmesondenanlagen (von 2006 bis 2009 jährlich ca. 3500 – 4000 Anlagen) - sehr dringlich.

Die Problematik der durch unvollständige Erdwärmesondenverfüllungen ausgelösten Schadensfälle ist – wie die signifikante Häufung der durch Erdwärmesonden ausgelösten Schadensfälle in Baden-Württemberg zeigt – ein Problem, das im Besonderen das Land Baden-Württemberg betrifft. Hierzu tragen die speziellen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen in Verbindung mit der Zulässigkeit, bei Erdwärmesondenbohrungen mehrere Grundwasserleiter zu durchteufen, entscheidend bei. Eine Beschränkung von Erdwärmesondenbohrungen auf den oberen Grundwasserleiter würde zu einer deutlichen Reduktion der zulässigen Bohrtiefen in Baden-Württemberg führen und damit auch

Erdwärmesondenanlagen unter Effizienzaspekten und insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen unrentabler machen.

Daher ist es von großer Bedeutung, Maßnahmen zur Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden zu ergreifen und offene Fragestellungen diesbezüglich zeitnah zu beantworten.

Hierzu hat das Land Baden-Württemberg nicht zuletzt durch die Einführung der „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)“ am 07.10.2011 und die Einrichtung des „Arbeitskreises Baustoffe für Erdwärmesonden“ bereits erste wichtige Maßnahmen ergriffen.

Die Verfüllqualität von Erdwärmesonden wird unter anderem durch die eingesetzten Materialien, die eingesetzten Misch- und Verpressanlagen, die angewandte Verpressmethode und die Arbeitsqualität der ausführenden Personen beeinflusst. Erste Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen konnten bereits in dem Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) (Riegger, 2013) gewonnen werden. Allerdings wurden mit Hilfe der durchgeführten Realmaßstabsversuche weitere grundlegende Fragestellungen aufgeworfen, deren Beantwortung Voraussetzung für eine Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden ist.

So existieren zu den nachfolgenden Fragestellungen bislang keine Antworten:

- Durch welche Mechanismen entstehen während oder nach dem Verpressen einer Erdwärmesonde unverfüllte Bereiche im Bohrloch?
- Können die auftretenden Probleme durch Abstimmung der Verfüllbaustoffe mit den Misch- und Verpressanlagen und deren Betriebsweise und durch die Art und Weise, wie die Suspension ins Bohrloch eingebracht wird, behoben/minimiert werden?
- Ist es möglich, Labor-Prüfbedingungen und Grenzwerte für Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe abzuleiten, die deren Eignung zur Sicherstellung einer geforderten Verfüllqualität nachweisen?
- Ist es möglich, Baustellenprüfverfahren und Grenzwerte für Verfüllsuspensionen abzuleiten, die eine einfache und zuverlässige

Überprüfung der Verfüllsuspension auf die gewünschten Eigenschaften vor dem Einbau in das Bohrloch ermöglichen?

### **3. Stand von Wissenschaft und Technik**

In den bislang national und international durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die Themen thermische Effizienz und Verfüllqualität von Erdwärmesonden vor allem in Laborversuchen untersucht. Während in früheren Jahren hauptsächlich Untersuchungen zur thermischen Effizienz von Erdwärmesonden durchgeführt und darauf basierend thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe entwickelt wurden (Ebert et al. 2000), lagen die Hauptschwerpunkte der Laboruntersuchungen in den letzten Jahren auf der Analyse der hydraulischen Durchlässigkeit von Verfüllbaustoffen und von verfüllten Erdwärmesondenabschnitten insbesondere nach Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung des Verfüllmaterials (Frank et al. 2011), (Herrmann 2008), (Müller 2009), (Niederbrucker/Steinbacher 2007), (Reuß/Kuckelkorn 2011).

Die am ZAE Bayern entwickelte und erprobte Versuchsanlage (Reuß/Kuckelkorn 2011) berücksichtigt die tatsächliche Einbausituation einer Erdwärmesonde am genauesten, unter anderem durch eine Besandung der Rohre, in die die Erdwärmesonden eingebaut werden. Mit dieser Anlage konnte gezeigt werden, dass eine verpresste Erdwärmesonde bestehend aus den Sondenrohren und dem Verfüllbaustoff deutlich höhere hydraulische Durchlässigkeiten aufweist als der reine Verfüllbaustoff. Damit wird deutlich, dass zur sicheren Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit sogenannte Systemdurchlässigkeitsversuche erforderlich sind. Untersuchungen an reinen Baustoffproben können lediglich für Voruntersuchungen herangezogen werden.

Bei den bisher durchgeführten Laboruntersuchungen wurde überwiegend mit ideal hergestellten Prüfkörpern gearbeitet, die eine Länge von 2 m oder weniger aufweisen.

Demgegenüber wurden in dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg finanzierten und von Solites bearbeiteten Forschungsvorhaben EWSplus (Riegger, 2013) erstmals in großem Stil Realmaßstabsversuche an rückbaubaren Erdwärmesonden durchgeführt. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der

den Einbau und den zerstörungsfreien Rückbau von Erdwärmesonden mit einer Länge von 30 m ermöglicht (s. Abbildung 1).



**Abbildung 1: Versuchsfeld des Forschungsvorhabens EWSplus (links) und oberes Ende des Versuchsaufbaus (rechts)**

Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die Analyse des tatsächlichen Zustands innerhalb des Bohrlochs von Erdwärmesonden. Es konnte gezeigt werden, dass die Verfüllung von Erdwärmesonden häufig nicht fehlerfrei ist und dass selbst bei den idealen Bedingungen in dem Versuchsaufbau (keine Klüfte, glatte Bohrlochwand) bei zahlreichen der erstellten Erdwärmesonden unverfüllte Bereiche – sogenannte Fehlstellen – von bis zu einem Meter Länge vorliegen (s. Abbildung 2).



**Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der in dem Forschungsvorhaben EWSplus beobachteten Verfüllqualität (Riegger, 2013)**

Auf Basis der bisherigen Versuche ist es weder möglich, die Entstehung der Fehlstellen mit den Randbedingungen des Verfüllvorgangs (verwendetes Verfüllmaterial, verwendete Misch- und Verpressanlage, angewandte

Verpresstechnik, etc.) zu korrelieren, noch ist es möglich, die zur Entstehung der Fehlstellen führenden Vorgänge zu identifizieren und zu erklären. Untersuchungen zum Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenentstehung – insbesondere in einem transparenten Versuchsaufbau – gibt es bislang nicht.

#### **4. Ziele des Forschungsvorhabens EWS-tech**

Die Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden mit Hilfe von Technikumsversuchen (s. Abschnitt 6) soll zur Erreichung der nachfolgenden Ziele des Forschungsvorhabens EWS-tech beitragen:

- Erweiterung des Wissens zum Verfüllvorgang und der Fehlstellenentstehung im Ringraum von Erdwärmesonden (auch unter Berücksichtigung der Rauigkeit der Bohrlochwand)
- Vergleich der Verfüllqualität und der thermischen Effizienz von 2-U-Erdwärmesonden und Koaxial-Erdwärmesonden
- Mögliche Weiterentwicklungen der eingesetzten Verfüllmaterialien und der eingesetzten Misch- und Verpresstechnik zur Erreichung einer verbesserten Verfüllqualität basierend auf dem gewonnenen Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenentstehung
- Handlungsempfehlungen zur qualitätsgesicherten Ausführung der Verfüllung von EWS
- Erarbeitung anerkannter Labor-Prüfkriterien und baustellentauglicher Prüfkriterien für Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe
- Vorschlag zur Festlegung der grundlegenden Informationen, die in allen Datenblättern der Verfüllmaterialhersteller enthalten sein müssen
- Wissenstransfer in die Praxis

Weitere Ziele des Forschungsvorhabens EWS-tech, auf die in den Beiträgen der Projektpartner (Zorn et al., 2014), (Haist et al., 2014) eingegangen wird, sind:

- Ausarbeitung eines Systemdichtigkeitstests, der auch von Baustoffherstellern und anderen Prüflaboren durchgeführt werden kann

- Grundlegende Erkenntnisse zur Langzeitstabilität von Verfüllbaustoffen unter dem Einfluss sulfataggressiver oder CO<sub>2</sub>-haltiger Grundwässer

## **5. Vorgehen in dem Forschungsvorhaben EWS-tech**

Mit dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech sollen grundlegende Fragestellungen zur Verfüllqualität von Erdwärmesonden gelöst werden. Hierzu wird ein dreistufiges Vorgehen aus Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen gewählt. Im Labormaßstab sollen detaillierte Charakterisierungen von Erdwärmesonden-Verfüllmaterialien und Untersuchungen zur Verfüllbaustoff- und Systemdurchlässigkeit sowie der Langlebigkeit von Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffen in der Gegenwart sulfataggressiver oder CO<sub>2</sub>-haltiger Grundwässer durchgeführt werden. Aufbauend auf den Charakterisierungsversuchen im Labor werden Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs durchgeführt, die ein Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenbildung zum Ziel haben. Für die verschiedenen getesteten Verfüllbaustoffe sollen Parameter (z.B. W/F-Wert, Anmischdauer und -intensität, Verpressgeschwindigkeit etc.) ermittelt werden, mit denen eine gute Verfüllqualität erreicht wird. Neben den üblichen 2-U-Erdwärmesonden sollen bei den Versuchen auch Koaxial-Erdwärmesonden eingesetzt werden. Mit Hilfe von Realmaßstabsversuchen sollen die in den Labor- und Technikumsversuchen ermittelten Erkenntnisse verifiziert werden. Durch die Korrelation der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Labor-, Technikums-, und Realmaßstabsversuchen sollen anerkannte Labor-Prüfkriterien und baustellentaugliche Prüfkriterien für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe sowie Handlungsempfehlungen zur qualitätsgesicherten Verfüllung von Erdwärmesonden erarbeitet werden.

Diese können in behördliche Leitlinien oder Vorschriften etc. aufgenommen werden. Die ermittelten Prüfkriterien können darüber hinaus als Grundlage einer Eigen- und Fremdüberwachung der Baustoffhersteller sowie einer Baustoffzulassung dienen. Durch den Einbezug des vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württembergs geleiteten „Arbeitskreis Baustoffe für Erdwärmesonden“ ist eine hohe Akzeptanz im Bereich der direkt betroffenen Unternehmen (Hersteller von

Verfüllbaustoffen, Misch- und Verpressanlagen, Erdwärmesondenrohren sowie Bohrunternehmen) sichergestellt.

## **6. Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWS-tech sind ca. 36 Verfüllvorgänge von Erdwärmesonden in einem transparenten Kunststoffrohr vorgesehen, um das Wissen zum Ablauf des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenentstehung im Ringraum von Erdwärmesonden zu erweitern.

Die Höhe des transparenten Versuchsaufbaus für diese sogenannten Technikumsversuche beträgt 6 m. Bis zu dieser Höhe ist der Versuchsaufbau in der Versuchshalle des KIT möglich. Der Innendurchmesser der transparenten Kunststoffrohre soll analog zu dem bei Erdwärmesonden üblichen Bohrlochdurchmesser ca. 150 mm betragen. Dies ergibt sich durch die Vorgabe eines Mindest-Bohrlochdurchmessers von ca. 150 mm in den Erdwärmesonden-Leitfäden zahlreicher Bundesländer.

Als Grundlage für die Auswahl der transparenten Rohre wurden Vorversuche mit ca. 4 m langen Musterrohren bei Firma Gertec Maschinen- und Anlagenbau GmbH mit deren Unterstützung durchgeführt (s. Abbildung 3).

Die Vorversuche verliefen sehr gut und zeigten, dass prinzipiell alle drei untersuchten Rohrmaterialien (PMMA, PC und PVC) für die Technikumsversuche und zur Visualisierung des Verfüll- und Aushärtevorgangs geeignet sind.

Die auf Basis der Vorversuche für die zahlreichen folgenden Versuche ausgewählten PMMA-Rohre weisen die besten optischen Eigenschaften der drei untersuchten Rohre auf und haben eine Wandstärke von 5 mm und einen Innendurchmesser von 150 mm. Um den Einfluss der Bohrlochwandrauigkeit auf die Verfüllqualität untersuchen zu können, werden einige der ausgewählten transparenten Rohre innen besandet.

Bereits während der Vorversuche wurde deutlich, dass sich während des Verfüllvorgangs abhängig von der Verfüllgeschwindigkeit eine große Durchmischungszone der Verfüllsuspension mit dem zu Beginn des Verfüllvorgangs im Bohrloch befindlichen Wasser ausbilden kann.

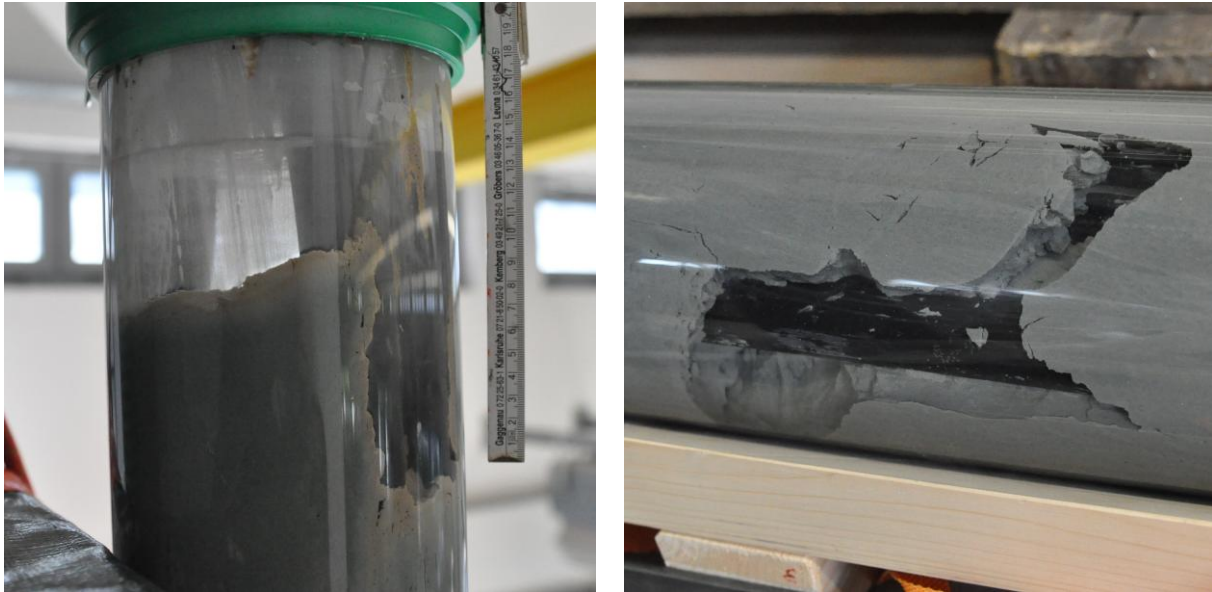




**Abbildung 3: Verfüllvorgang des PVC-Rohrs während der Vorversuche (linkes Rohr im linken Bild) und Ansicht der drei in den Vorversuchen verfüllten PMMA-, PVC- und PC-Rohre (von links nach rechts im rechten Bild)**

Basierend auf den Erfahrungen der Vorversuche bei Firma Gertec Maschinen- und Anlagenbau GmbH wurde der Technikumsprüfstand in der Halle des KIT entwickelt und aufgebaut. Nach Fertigstellung des Technikumsprüfstands wurde dort ein weiterer Vorversuch mit einer Erdwärmesonde durchgeführt. Dieser Vorversuch diente dazu, den Versuchsablauf zu testen und die Dichtigkeit der oberen und unteren Anschlüsse der transparenten Rohre nachzuweisen. Wie die beiden Fotografien in Abbildung 4 zeigen, ermöglicht der Versuchsaufbau eine gute Visualisierung der ausgehärteten Verfüllsuspensionen und möglicher Fehlstellen. Neben einer Foto- und Videodokumentation des Verpressvorgangs werden bei den 36 geplanten Technikumsversuchen die zur Charakterisierung des Verfüllvorgangs relevanten Daten (Verfüllsuspensionsdichte, Verpressvolumenstrom, Verpressdruck und Temperatur der Verfüllsuspension) kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Hierzu wird unter anderem ein Coriolis-Messgerät verwendet. Ergänzend werden baustellentaugliche Messverfahren zur Bestimmung der Suspensionsdichte, der Marsh-Zeit und des Wasserabsetzmaßes eingesetzt.

Es wird analysiert, ob Zusammenhänge zwischen den Versuchsbedingungen (z.B. Art und W/F-Wert der Verfüllsuspension, Anmischdauer und –intensität, ...), den versuchsbegleitend erfassten Messwerten und der tatsächlich resultierenden Verfüllqualität vorliegen. Als Maßstab für die tatsächliche Verfüllqualität dient eine visuelle Begutachtung der in den PMMA-Rohren eingebauten, ausgehärteten Erdwärmesonden, die hierzu zersägt und detailliert betrachtet werden.



**Abbildung 4:** : Visualisierung der ausgehärteten Verfüllsuspension nach Durchführung des Vorversuchs in dem Technikumsprüfstand am KIT (linkes Bild: Wasserabsetzen; rechtes Bild: Fehlstelle mit einer Ausdehnung von ca. 20 cm in Längsrichtung der Erdwärmesonde)

## 7. Ausblick

Es ist vorgesehen, die erste Technikumsversuchsreihe mit vier Erdwärmesonden vor dem OTTI Anwenderforum durchzuführen, so dass in der Präsentation erste Erfahrungen und Ergebnisse gezeigt werden können.

Parallel zu den Technikumsversuchen finden in dem Forschungsvorhaben EWS-tech Laborversuche mit zahlreichen verschiedenen Verfüllbaustoffen und Realmaßstabsversuche an ca. 30 m tiefen, zerstörungsfrei rückbaubaren Erdwärmesonden statt. Zur Erreichung der Ziele des Forschungsvorhabens (s. Abschnitt 4) werden die Ergebnisse der Labor- und Realmaßstabsversuche mit denen der Technikumsversuche korreliert.

Das Forschungsprojekt EWS-tech wird durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

## 8. Literatur

- Ebert, H.-P. et al.: Optimierung von Erdwärmesonden; Abschlussbericht zum DBU-Vorhaben AZ 17013; München; 2000
- Frank, J. et al.: Prüfwelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterialien für EWS; in: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe 10/2011; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn; 2011
- Haist, M. et al.: Baustofftechnologische Bewertung der Verfüllqualität von Hinterfüllbaustoffen für die Sicherstellung systemdichter Erdwärmesonden; 13. Internationales OTTI-Anwenderforum; Neumarkt; 2014
- Herrmann, V.: Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden; Dissertation; Karlsruhe; 2008
- Müller, L.: Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden; in: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe 07-08/2009; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn; 2009
- Niederbrucker, R.; Steinbacher, N.: Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden; Amt der oberösterreichischen Landesregierung; Linz; 2007
- Reuß, M.; Kuckelkorn, J.: Systemdichtheit von Erdwärmesonden; Otti-Symposium Oberflächennahe Geothermie; Regensburg; 2011
- Riegger, M.: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik); Stuttgart; 2013
- Zorn, R.; Köhler, A.; Huttenloch, P.; Steger, H.; Stober, I.: Systemdichtigkeit und Sulfatbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden; 13. Internationales OTTI-Anwenderforum; Neumarkt; 2014