

EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) – Erste Ergebnisse

Mathieu Riegger

Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme

Keywords: Erdwärmesonde, Qualitätssicherung, Thermal Response Test, Bohrlochwiderstand, Verfüllmaterial

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts EWSplus wurden grundlegende Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden (EWS) an unter Realbedingungen eingebauten EWS mit praxisrelevanten Tiefen durchgeführt. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der den zerstörungsfreien Rückbau von Erdwärmesonden erlaubt, so dass Kenntnisse über den tatsächlichen Zustand im Bohrloch gewonnen werden konnten. Dadurch konnte der Einfluss des Einsatzes von Abstandshaltern und Zentrierhilfen auf die Position der Sondenrohre im Bohrloch aufgezeigt werden.

Daneben wurde ein Mess- und Auswerteverfahren zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands der in dem Versuchsaufbau eingebauten EWS entwickelt und zur Bestimmung der effektiven thermischen Bohrlochwiderstände zahlreicher verschiedener EWS eingesetzt.

1. Ausgangssituation

Dem überaus wichtigen Thema Qualitätssicherung im Bereich der oberflächennahen Geothermie [1] wurde bislang nicht immer die ihm gebührende Aufmerksamkeit zuteil. Trotz der großen Anzahl an realisierten Geothermie-Anlagen sind einige Fragestellungen hinsichtlich der Qualität und Effizienz von Erdwärmesonden bislang ungeklärt.

Dies betrifft zum einen den Einfluss verschiedener Faktoren auf die thermische Leistungsfähigkeit, die für den dauerhaft effizienten und wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage entscheidend ist, sowie zum anderen die Dichtwirkung von Bohrlochverfüllungen.

Diese Aspekte wurden bisher hauptsächlich theoretisch oder im Labormaßstab betrachtet. Einen Auszug aus den wichtigsten Studien zeigen die Literaturstellen [2]-[7].

2. Ziele

Mit dem Forschungsprojekt EWSplus will Solites in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern GTC Kappelmeyer GmbH, Rehau AG & Co, Systherma GmbH und Frau Prof. Dr. Stober (Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung Umwelt) sowie den Firmen und Institutionen TU Darmstadt (Institut für Massivbau), André Voutta Grundwasserhydraulik, Terratec Geophysical Services und Müller VHF zur Klärung bislang ungelöster Fragestellungen hinsichtlich der Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden beitragen.

Es soll sowohl die thermische Leistungsfähigkeit als auch die hydraulische Abdichtung von Erdwärmesonden in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren bei unter Realbedingungen eingebauten Erdwärmesonden bestimmt werden.

Weiterhin werden verschiedene Messverfahren auf ihre Aussagekraft hinsichtlich der Qualität der Bohrlochverfüllung getestet, mit dem Ziel, geeignete Messverfahren herauszuarbeiten. Zu diesem Zweck werden bewusst Fehlstellen in der Verfüllung von Erdwärmesonden eingebaut.

Um die Aussagekraft der Messverfahren beurteilen zu können, werden die Erdwärmesonden nach Durchführung der Messungen wieder aus dem Untergrund ausgebaut, so dass der tatsächliche Zustand der Erdwärmesonden, also zum Beispiel die Lage und Größe von Fehlstellen in der Verfüllung, mit den aus den Messungen gezogenen Rückschlüssen verglichen werden können. Der

Ausbau der Erdwärmesonden ermöglicht es, neben der Betrachtung der Verfüllqualität auch den Einfluss von Abstandshaltern und Zentrierhilfen auf die Position der Sondenrohre im Bohrloch zu untersuchen.

3. Umsetzung

Vor Durchführung der Außenlaborversuche wurde der Einfluss verschiedener Faktoren auf die thermische Leistungsfähigkeit (Lage der Sondenrohre im Bohrloch, verschiedene Verfüllmaterialien, u.a.) in Simulationsmodellen abgebildet, um die Sensitivitäten und die maximal zu erwartenden Einflüsse der einzelnen Parameter auf die thermische Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden zu erarbeiten [8]. Diese theoretischen Vorbetrachtungen dienen den Außenlaborversuchen als Grundlage.

3.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Außenlaborversuche an Erdwärmesonden mit praxisrelevanten Tiefen wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der den zerstörungsfreien Rückbau der untersuchten Erdwärmesonden und die mehrfache Nutzung der Bohrlöcher ermöglicht. In Abbildung 1 ist das obere Ende dieses Versuchsaufbaus dargestellt, während in Abbildung 2 der vollständige Versuchsaufbau mit der angeschlossenen Versuchsanlage zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands zu sehen ist.



Abbildung 1: Oberes Ende des Versuchsaufbaus

Die PE-Innenrohrstränge, die die Bohrlochwand emulieren, werden unter Verwendung von Zentrierhilfen und einer Abfangschelle hängend und zentriert in die PVC-Außenrohrstränge eingebaut. Damit ergibt sich ein gleichmäßiger Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr, in dem Rohre zur Umwälzung des darin befindlichen Wassers eingebaut sind.

In die PE-Innenrohre werden Erdwärmesonden bis ca. 30 m unter Geländeoberkante (GOK) eingebaut und im Kontraktorverfahren mit Verfüllmaterial verpresst. Die eingebauten Erdwärmesonden sind eine Sonderanfertigung der Firma Rehau AG & Co mit vier unterschiedlich

eingefärbten Sondenrohrschenkeln. Damit wird nach dem Rückbau der Erdwärmesonden die Positionsbestimmung der Sondenrohre im Bohrloch und deren Zuordnung vereinfacht.

Auf dem Versuchsgelände in Crailsheim wurden insgesamt vier verrohrte Bohrungen bis in eine Tiefe von 32 m unter Geländeoberkante erstellt. In drei dieser vier Bohrungen wurden PVC-Außenrohre mit einem Innendurchmesser von 255 mm eingebaut. In die vierte Bohrung wurden PVC-Außenrohre mit einem Innendurchmesser von 301 mm eingebaut, um darin den Einbau von Innenrohren zu ermöglichen, deren Innendurchmesser ca. dem sogenannten Stuttgarter Durchmesser von rund 200 mm entspricht.

3.2 Versuchsanlage zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

Ein zentraler Aspekt des Forschungsprojekts EWSplus sind thermische Untersuchungen verschiedener Erdwärmesonden. Als Maß für die thermische Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden wird üblicherweise der effektive thermische Bohrlochwiderstand verwendet, der mit Hilfe von Thermal Response Tests (TRT) bestimmt werden kann. Auf Grund des für den zerstörungsfreien Rückbau erforderlichen Versuchsaufbaus mit einem Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr ist die Ermittlung des thermischen Bohrlochwiderstands mit der üblichen Mess- und Auswertemethodik von TRTs nicht möglich. Daher wurde ein neuartiges Mess- und Auswerteverfahren entwickelt, das auf dem TRT basiert. Ein Schnitt durch den erforderlichen Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

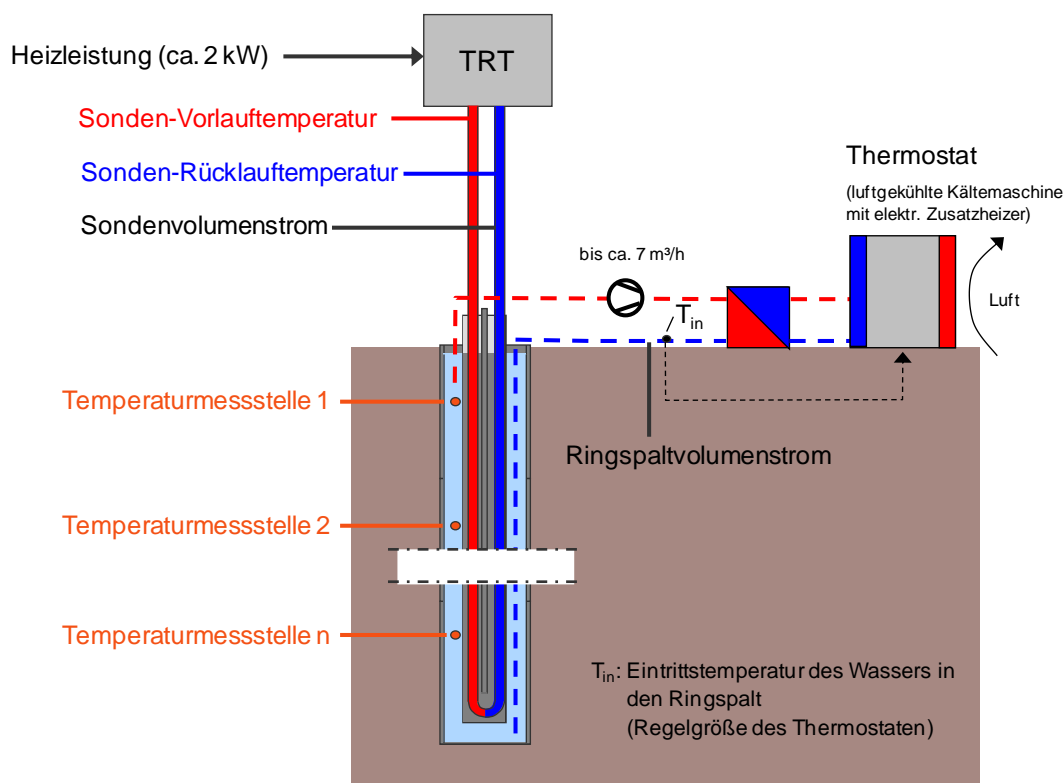
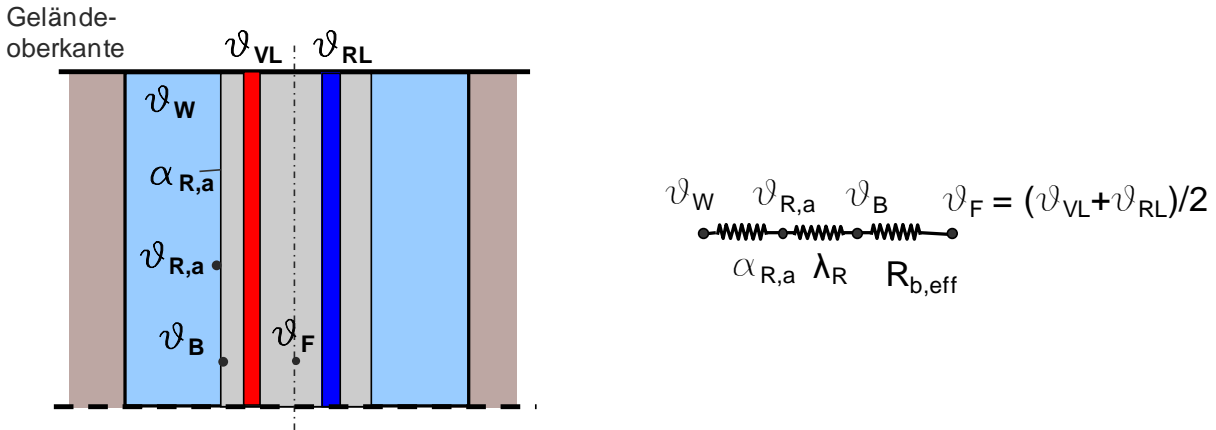


Abbildung 2: Querschnitt durch den Versuchsaufbau zur Ermittlung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands

Während der ca. 3 Tage dauernden Versuche wird die im Innenrohr eingebaute Erdwärmesonde mit einer konstanten Heizleistung durch eine leistungsgeregelte TRT-Apparatur betrieben. Das im Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr befindliche Wasser wird mit einem hohen Volumenstrom umgewälzt und mit Hilfe eines Thermostaten bei konstanter Temperatur gehalten.

Durch den hohen Volumenstrom im Ringspalt werden ein für die Auswertung erforderlicher sehr guter Wärmeübergang an der Außenseite des Innenrohrs sowie eine nahezu einheitliche Temperatur im Ringspalt erreicht.



| | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------------|--------------|
| Erläuterung der Formelzeichen: | | Erläuterung der Indizes: | |
| α : Wärmeübergangszahl | λ : Wärmeleitfähigkeit | W: Wasser im Ringspalt | B: Bohrwand |
| ϑ : Temperatur | r: Radius | F: Sondenfluid | a: außen |
| | | R: Innenrohr | i: innen |
| $R_{b,eff}$: effektiver thermischer Bohrlochwiderstand | | VL: Vorlauf | RL: Rücklauf |

Abbildung 3: Schaubild der thermischen Widerstände als Grundlage der Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands $R_{b,eff}$

Mit Hilfe des Widerstandsschaubilds aus Abbildung 3 lässt sich die folgende Wärmetransportgleichung für eine mit dem Gesamtvolumenstrom \dot{m}_{EWS} betriebene EWS der Tiefe L herleiten zu

$$\dot{Q} = \dot{m}_{EWS} \cdot c_{p,F} \cdot (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) = \left[R_{b,eff} + \underbrace{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_R} \cdot \ln \left(\frac{r_{R,a}}{r_{R,i}} \right)}_{R_{ges}} + \frac{1}{\alpha_{R,a} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{R,a}} \right]^{-1} \cdot L \cdot (\vartheta_F - \vartheta_W) \quad (1)$$

wobei \dot{Q} die in die EWS eingebrachte Heizleistung und $c_{p,F}$ die spezifische Wärmekapazität des Sondenfluids (hier: Wasser) ist. Die hier nicht genannten Formelzeichen aus Gleichung 1 sind in Abbildung 3 erläutert.

Mit Gleichung 1 kann aus einer Messung des Sondenmassenstroms, der Sondenvor- und -rücklauf-temperaturen sowie der Wassertemperatur und des Volumenstroms im Ringspalt der effektive thermische Bohrlochwiderstand $R_{b,eff}$ der im Innenrohr eingebauten Erdwärmesonde ermittelt werden.

3.3 Versuchsprogramm

In Abbildung 4 ist das Versuchsprogramm der ersten beiden von insgesamt fünf Versuchschargen dargestellt. Diese beiden Chargen dienten dazu, den Einfluss des Bohrwachdurehmessers und des Einsatzes von Abstandshaltern und Zentrierhilfen auf die Position der Sondenrohre im Bohrloch und die Verfüllqualität zu untersuchen.

| | Bohrung 1 DN 250 Außenrohr | Bohrung 2 DN 250 Außenrohr | Bohrung 3 DN 250 Außenrohr | Bohrung 4 DN 300 Außenrohr |
|--|---|---|--|--|
| Charge 1 Innenrohr-Innendurchmesser Sondenart Verfüllmaterial Einsatz von AH/ZH Verpressschlauch Besonderheiten | EWS 1-1 121 mm 2-U DN 32 thermisch verbessertes VM ohne AH/ZH DN 32 | EWS 1-2 139 mm 2-U DN 32 Standard VM (Dämmer) AH variabel DN 32 | EWS 1-3 156 mm 2-U DN 32 Standard VM (Dämmer) AH variabel DN 32 | EWS 1-4 194 mm 2-U DN 32 Standard VM (Dämmer) AH variabel DN 25 & 32 künstliche Fehlstellen |
| Charge 2 Innenrohr-Innendurchmesser Sondenart Verfüllmaterial Einsatz von AH/ZH Verpressschlauch Besonderheiten | EWS 2-1 121 mm 1-U DN 32 thermisch verbessertes VM ohne AH/ZH DN 32 | EWS 2-2 139 mm 2-U DN 32 thermisch verbessertes VM ZH variabel (da = 136 mm) DN 25 & 32 künstliche Fehlstellen | EWS 2-3 156 mm 2-U DN 32 thermisch verbessertes VM ZH variabel (da = 156 mm) DN 32 | EWS 2-4 194 mm 2-U DN 32 thermisch verbessertes VM ZH variabel (da = 186 mm) DN 32 |

Abbildung 4: Versuchsprogramm von Charge 1 und 2 (VM: Verfüllmaterial, AH: Abstandshalter, ZH: Zentrierhilfe)

Der Einbau der Abstandshalter und Zentrierhilfen erfolgte dabei in Abständen zwischen 1 und 5 m entsprechend Abbildung 5.

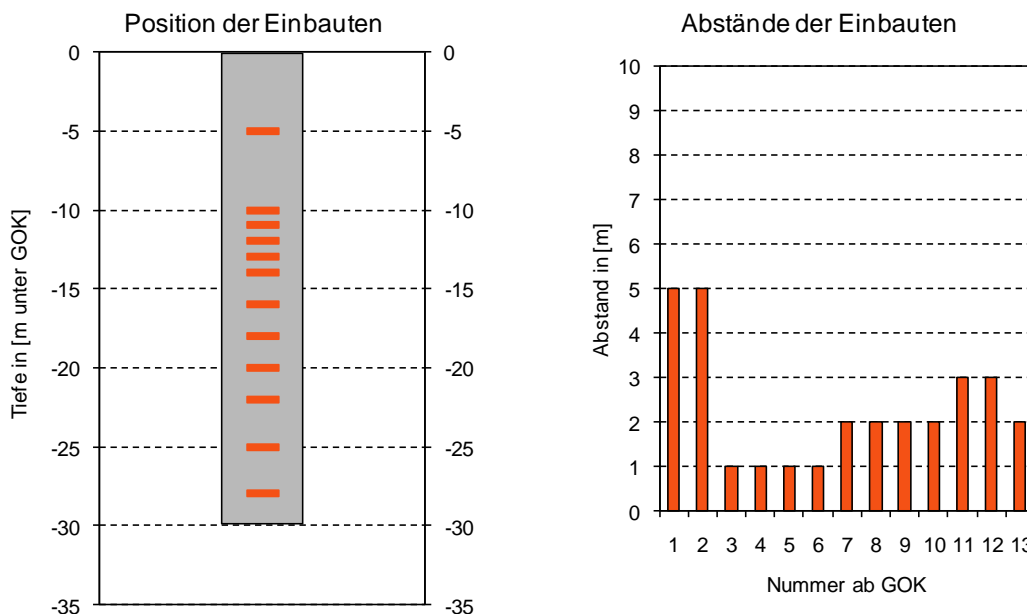


Abbildung 5: Einbautiefen und Abstände der Abstandshalter und Zentrierhilfen

Abbildung 6 veranschaulicht die Unterschiede der verwendeten Abstandshalter und Zentrierhilfen. Abstandshalter werden zur Beabstandung der Sondenrohre untereinander und damit zur Verhinderung eines thermischen Kurzschlusses zwischen Erdwärmesondenvor- und -rücklauf eingesetzt. Eine Zentrierung des gesamten Sondenbündels im Bohrloch kann damit konstruktionsbedingt nicht sichergestellt werden.

Die im Rahmen des Forschungsprojekts EWSplus eingesetzten Zentrierhilfen hingegen sollen das gesamte Rohrbündel mit Hilfe von Gleitkufen im Bohrloch zentrieren. Konstruktionsbedingt ist der Abstand der Sondenrohre zueinander geringer als bei den in der Praxis deutlich häufiger eingesetzten Abstandshaltern.



Abbildung 6: Abstandshalter (links) und Zentrierhilfe (rechts; Quelle: Müller VHF)

Auf Basis der Ergebnisse aus den detaillierten Analysen der Chargen 1 und 2 wurde eine Referenz-EWS (festgelegter Bohrlochdurchmesser und festgelegter Einsatz von Abstandshaltern oder Zentrierhilfen) definiert.

In den Chargen 3 und 4 wurde die Referenz-EWS mit verschiedenen Verfüllmaterialfertigmischungen ausgeführt, um deren Einfluss auf die Verfüllqualität und die thermische Leistungsfähigkeit der EWS untersuchen zu können. Verfüllmaterialfertigmischungen sind Baustoffe zur Verfüllung von Erdwärmesonden, die auf der Baustelle lediglich mit einer vom Hersteller definierten Wassermenge angemischt werden müssen. Baustellenmischungen, die vor Ort aus Zement, Bentonit, ggf. Quarzsand und Wasser angemischt werden, werden nicht untersucht.

In den Chargen 1 bis 3 wurden jeweils künstliche Wasser- oder Luftfehlstellen in die Verfüllung einer Erdwärmesonde eingebaut.

Zur Detektion dieser Fehlstellen wurden die folgenden Messverfahren eingesetzt:

- Faseroptische Temperaturmessungen mit Glasfaserkabeln (GTC Kappelmeyer GmbH) [9]
- Drahtgebundenes Ultraschallmessverfahren (TU Darmstadt)
- Drahtlose teufenorientierte Temperaturmessungen mit dem Minidatenlogger Nimo-T [10]
- Gamma-Ray-Log (Terratec Geophysical Services) [11]
- Gamma-Gamma-Sonde (André Voutta Grundwasserhydraulik)
- „Kurz-Thermal-Response-Test“ (André Voutta Grundwasserhydraulik) [12]

Charge 5 soll zur Untersuchung der Auswirkung verschiedener Wasser-Feststoffverhältnisse der Verfüllmaterialfertigmischungen auf die Verfüllqualität dienen. Bei diesen Untersuchungen wird bewusst von den Herstellerangaben für die Verfüllmaterialfertigmischungen abgewichen.

4. Erste Ergebnisse

Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts die im Rahmen des Forschungsprojekts EWSplus durchgeführten Untersuchungen noch nicht vollständig abgeschlossen sind, werden im Folgenden lediglich erste Ergebnisse vorgestellt.

Insbesondere wird auf eine Darstellung von Ergebnissen der Messungen zur Fehlstellendetektion verzichtet, da zum einen die vergleichende Analyse der Messergebnisse noch nicht abgeschlossen ist, und zum anderen einige der eingesetzten Messverfahren basierend auf den Erkenntnissen der ersten Messungen weiterentwickelt werden.

4.1 Effektiver thermischer Bohrlochwiderstand

Zur Ermittlung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands nach Gleichung 1 wird die Wärmeübergangszahl an der Außenseite des Innenrohrs, das heißt an der Innenseite des Ringspalts benötigt. Diese kann aufgrund der Randbedingungen (von innen beheizter Ringspalt,

ungedämmte Außenseite des Ringspalts) und der Einbauten (Temperaturfühler, Zentrierungen, Strömungsröhre), die für eine Erhöhung der Turbulenz sorgen, nicht analytisch ermittelt werden. Daher wird das in Abschnitt 3.2 beschriebene Messverfahren an jeder Erdwärmesonde mit zwei bis drei unterschiedlichen Volumenströmen im Ringspalt durchgeführt, um neben dem effektiven thermischen Bohrlochwiderstand die Wärmeübergangszahl an der Außenseite des Innenrohrs bestimmen zu können.

Das angepasste Auswerteverfahren bei Verwendung unterschiedlicher Volumenströme im Ringspalt ist in Abbildung 7 für eine Messung mit 2 Volumenströmen schematisch dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

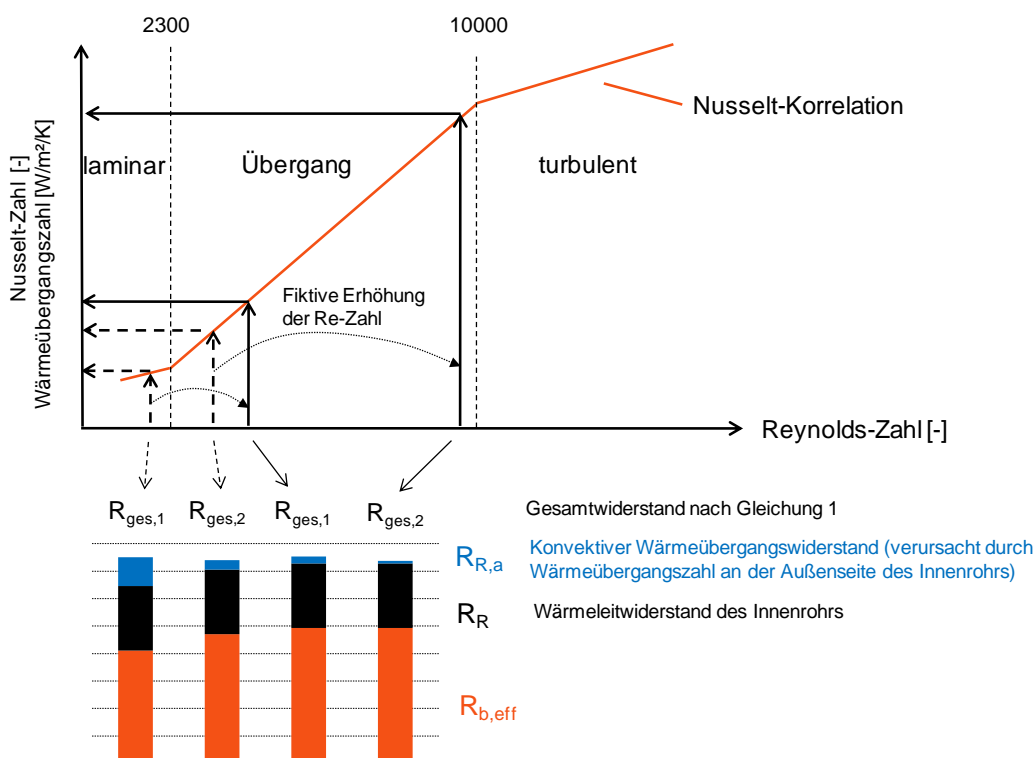


Abbildung 7: Schema zur Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands $R_{b,eff}$ und der Wärmeübergangszahl an der Innenseite des Ringspalts (Formelzeichen und Indizes entsprechend Abbildung 3)

Es werden zunächst die Reynolds-Zahlen (Re-Zahl) für die tatsächlichen Volumenströme und damit die Wärmeübergangszahlen an der Innenseite des Ringspalts unter der Annahme eines von innen beheizten und außen wärmeisolierten Ringspalts berechnet [13]. Da die tatsächliche Wärmeübergangszahl auf Grund der erhöhten Turbulenz im Ringspalt höher als der zunächst berechnete Wert ist, werden die zu den Volumenströmen gehörigen Reynolds-Zahlen fiktiv erhöht. Diese fiktive Erhöhung erfolgt sukzessive innerhalb eines für einen der Volumenströme definierten Reynolds-Zahlen-Bereichs. Das Verhältnis der Reynolds-Zahlen innerhalb eines Erhöhungsschritts wird jeweils konstant gehalten. Nach jedem Erhöhungsschritt werden mit den neuen Reynolds-Zahlen und der Nusselt-Korrelation neue Wärmeübergangszahlen für die Innenseite des Ringspalts und mit Gleichung 1 die resultierenden effektiven thermischen Bohrlochwiderstände berechnet.

Als Ergebnis des Berechnungsvorgangs wird der Mittelwert der effektiven thermischen Bohrlochwiderstände jenes Erhöhungsschritts ausgegeben, in dem die aufsummierte Abweichung dieses Mittelwerts von den einzelnen effektiven thermischen Bohrlochwiderständen des betreffenden Erhöhungsschritts minimal ist. Dieses Vorgehen ist beispielhaft für EWS 2-3 in Abbildung 10 veranschaulicht.

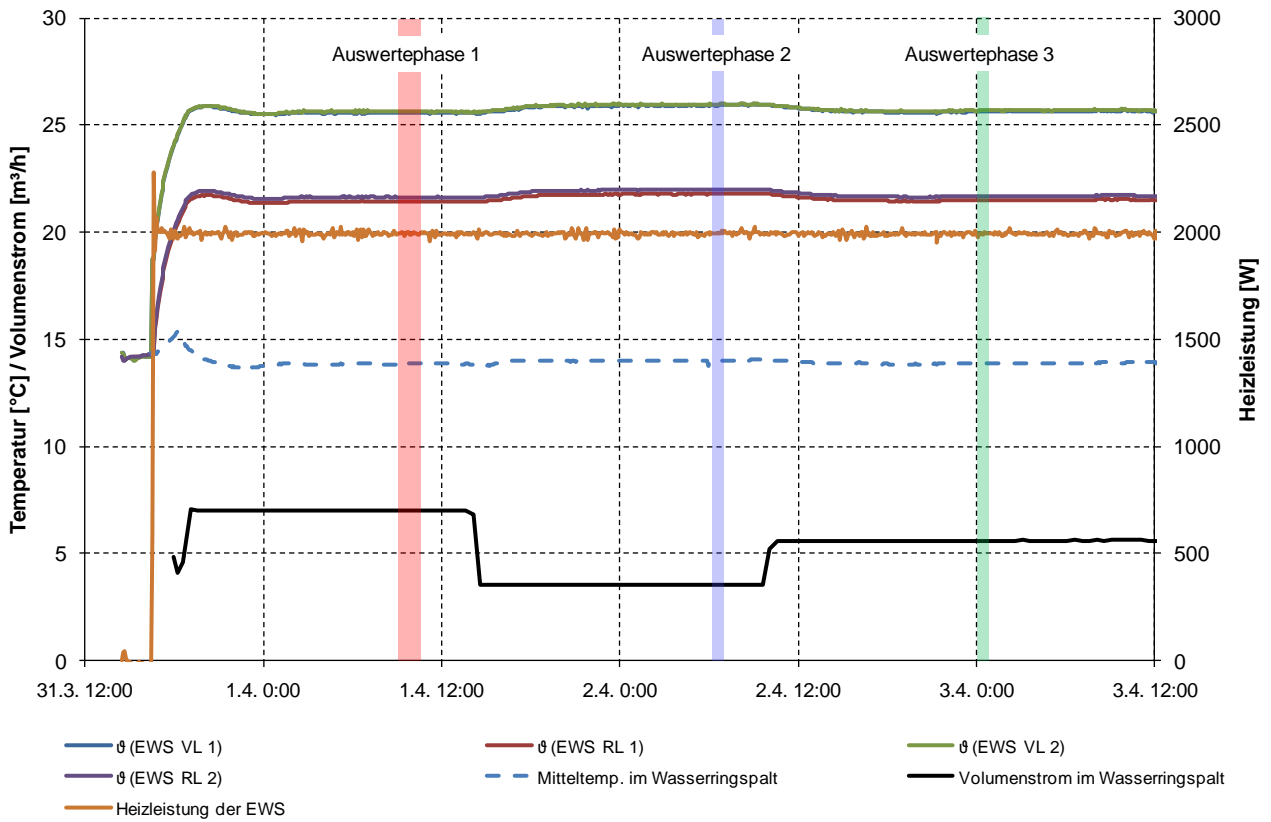


Abbildung 8: Messergebnisse von EWS 2-3

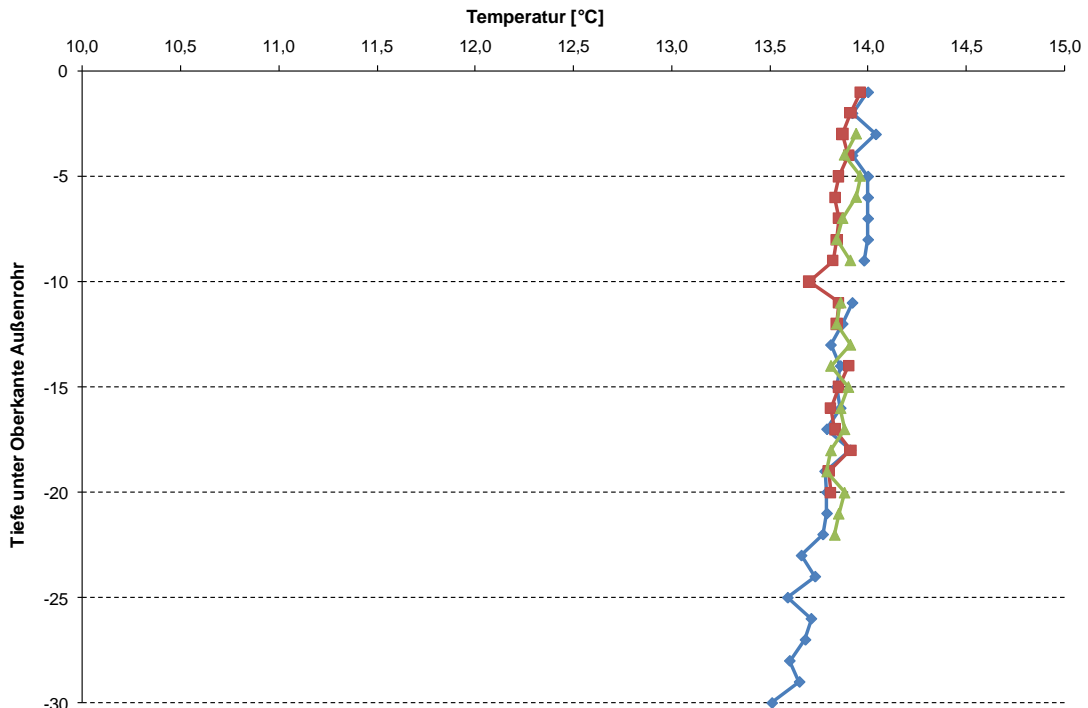


Abbildung 9: Temperaturtiefenprofil im Ringspalt von Erdwärmesonde 2-3 während der stationären Auswertephase 1 am 01.04.10 um 09:00 Uhr

Abbildung 8 zeigt exemplarisch für die Erdwärmesonde 3 der Charge 2 (EWS 2-3) den Verlauf der für die Auswertung relevanten Messwerte. Die Beeinflussung der gemessenen Temperaturen durch die drei verschiedenen Volumenströme im Ringspalt ist deutlich erkennbar.

Die für die Berechnung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands verwendeten Werte ergeben sich durch Mittelung der Messwerte in den stationären Betriebszuständen (dargestellt als Auswertephase 1,2 und 3).

Die gemittelte Temperatur im Wasserringspalt wird durch eine gewichtete Mittelung aus bis zu drei Tiefentemperaturprofilen im Ringspalt gewonnen. In Abbildung 9 sind für einen Zeitpunkt aus der stationären Auswertephase der Messung an EWS 2-3 beispielhaft die drei Tiefentemperaturprofile des Wassers im Ringspalt dargestellt. Es ist erkennbar, dass die gemessenen Temperaturen in einer bestimmten Tiefe um maximal 0,2 K voneinander abweichen. Diese geringen Schwankungen können durch Messungenauigkeiten oder durch das Anliegen einzelner Fühler am Innen- oder Außenrohr verursacht sein.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Versuchsauswertung von EWS 2-3. Dabei wurden entsprechend des oben beschriebenen Verfahrens für jeden Ringspaltvolumenstrom aus fiktiven Re-Zahlen Wärmeübergangszahlen und die daraus resultierenden effektiven thermischen Bohrlochwiderstände berechnet. Die genaueste Übereinstimmung der effektiven thermischen Bohrlochwiderstände für die drei untersuchten Ringspaltvolumenströme ergibt sich für $R_{b,eff} = 0,098 \text{ m}^3\text{K/W}$.

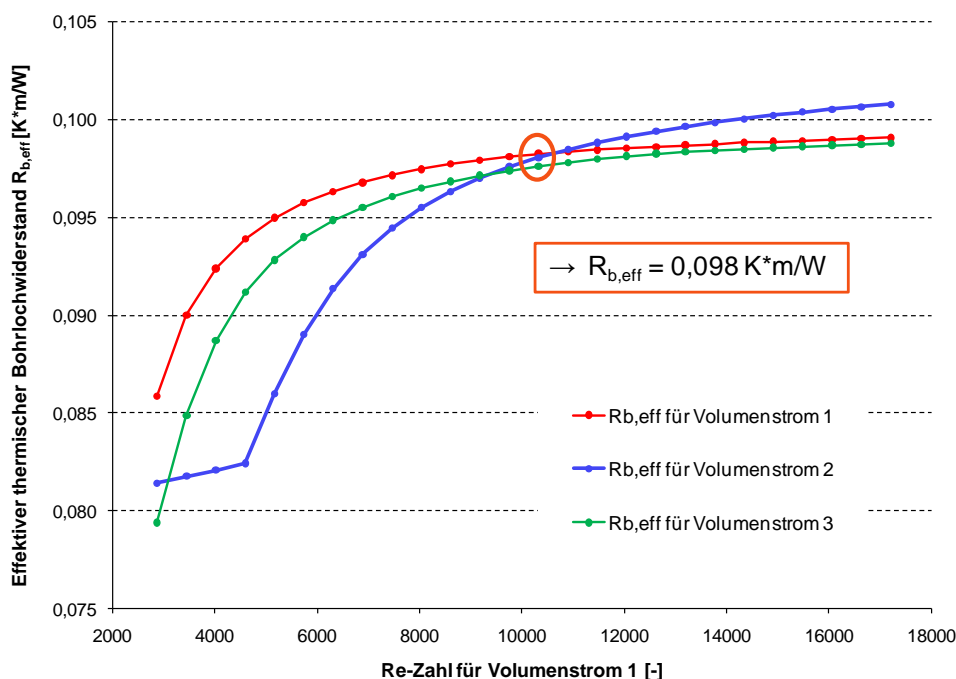


Abbildung 10: Bestimmung des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands durch fiktive Erhöhung der ermittelten Re-Zahlen für EWS 2-3

Die aus den Messungen ermittelten effektiven thermischen Bohrlochwiderstände der Chargen 1 und 2 sind in Abbildung 11 dargestellt.

Wie dem Versuchsprogramm aus Abbildung 3 entnommen werden kann, handelt es sich in einem Fall um 1-U-EWS und in allen anderen Fällen um 2-U-EWS. Die EWS wurden jeweils mit einem Volumenstrom von 213 l/h je Sondenstrang und einer Heizleistung von im Mittel 1000 Watt je Sondenstrang betrieben. Damit ergibt sich in allen Fällen eine Temperaturdifferenz zwischen Sondenvor- und -rücklauf von 4 K.

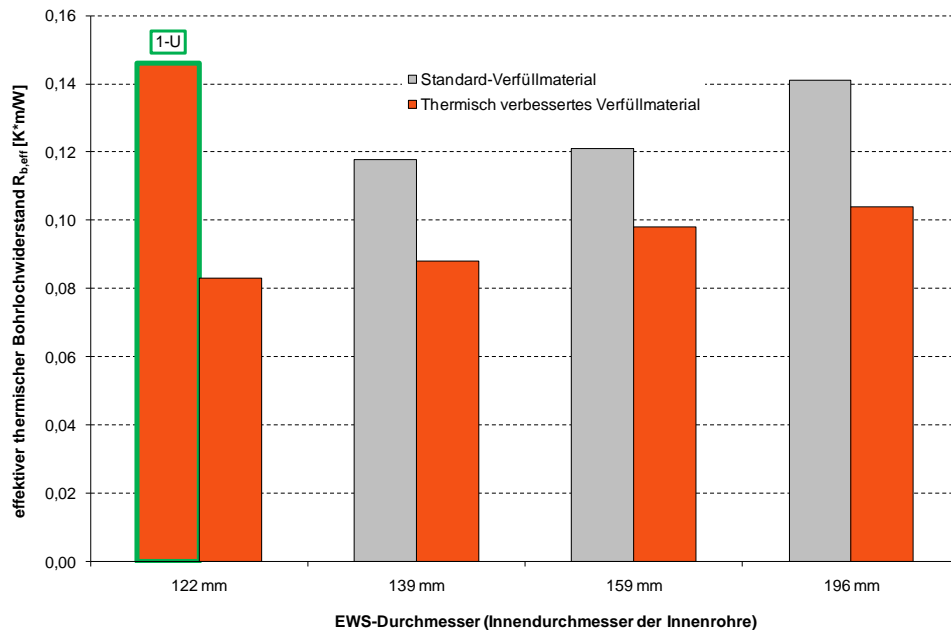


Abbildung 11: Gemessene effektive thermische Bohrlochwiderstände der EWS von Charge 1 und 2

Es wird deutlich, dass eine 1-U-EWS bei identischem Aufbau wie eine 2-U-EWS deutlich höhere effektive thermische Bohrlochwiderstände aufweist. Daneben veranschaulichen die Ergebnisse in Abbildung 11 die signifikante Reduktion des effektiven thermischen Bohrlochwiderstands durch ein thermisch verbessertes Verfüllmaterial (im Labor gemessene Wärmeleitfähigkeit: 2,32 W/m/K) gegenüber einem Standard-Verfüllmaterial (im Labor gemessene Wärmeleitfähigkeit: 0,96 W/m/K). Bei diesem Vergleich gilt es zu bedenken, dass die EWS mit dem Standard-Verfüllmaterial mit Abstandshaltern ausgestattet sind, während in den EWS mit thermisch verbessertem Verfüllmaterial Zentrierhilfen eingebaut sind, die die Sondenrohre nicht so weit beabstanden können wie Abstandshalter. Daher ist zu vermuten, dass bei vergleichbarem Einsatz von Abstandshaltern oder Zentrierhilfen der Unterschied zw. den EWS mit Standard-Verfüllmaterial und jenen mit thermisch verbessertem Verfüllmaterial noch größer wäre.

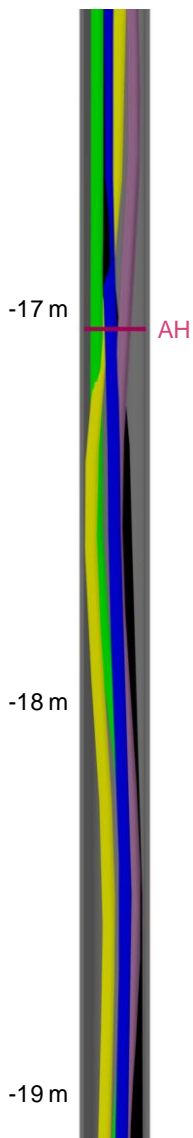
Darüber hinaus wird anhand von Abbildung 11 deutlich, dass sowohl bei Einsatz des Standard-Verfüllmaterials als auch bei Einsatz des thermisch verbesserten Verfüllmaterials der effektive thermische Bohrlochwiderstand mit zunehmendem Bohrlochdurchmesser größer wird.

4.2 Verlauf der Sondenrohre im Bohrloch



Abbildung 12: Querschnittsbilder der EWS 1-3 mit Abstandshaltern (links und Mitte) und Querschnittsbild der EWS 2-3 mit Zentrierhilfen (rechts)

Die in den PE-Rohren eingebauten EWS wurden von dem beauftragten Bohrunternehmen Keller & Hahn Brunnenbau GmbH abschnittsweise gezogen und in Stücke mit einer maximalen Länge von einem Meter gesägt. Auf jedem dieser EWS-Stücke wurden die Orientierung und eine Nummerierung zur eindeutigen Identifikation angebracht. Die EWS-Stücke wurden jeweils im Querschnitt fotografiert (siehe Abbildung 12) und anschließend längs aufgeschnitten, um die Position der eingebauten Abstandshalter und Zentrierhilfen und das Vorhandensein von Fehlstellen in der Verfüllung zu untersuchen.



Die beiden in Abbildung 12 dargestellten Querschnittsbilder für EWS 1-3 mit Abstandshaltern machen deutlich, wie stark sich die Positionen der Sondenrohre im Bohrloch bereits innerhalb eines Meters ändern können, obwohl in dieser Tiefe der EWS Abstandshalter in Abständen von 1 m eingebaut sind. Das rechte Bild zeigt ein Schnittbild von EWS 2-3 in dem gleichen Tiefenbereich, in dem bei dieser EWS Zentrierhilfen im Abstand von 1 m eingebaut sind.

Auf Basis der einzelnen Schnittbilder wurden für alle EWS der Chargen 1 und 2 3D-Modelle mit einem CAD-Programm erstellt, die den Sondenrohrverlauf in der Tiefe veranschaulichen. Die linksstehende Abbildung zeigt exemplarisch den Abschnitt von ca. 16 - 19 m unter GOK der EWS 1-3. Im dargestellten Bereich sind Abstandshalter in Abständen von ca. 2 m eingebaut.

Die Bereiche zwischen den Tiefen, in denen die Sondenrohrpositionen aus den Querschnittsbildern bekannt sind, werden interpoliert. Dadurch kann es in diesen Abschnitten zu Überschneidungen der Sondenrohre kommen.

Die Analysen der Querschnittsbilder und der 3D-Modelle der EWS von Charge 1 und 2 zeigen, dass sowohl Abstandshalter als auch Zentrierhilfen in sehr kurzen Abständen (maximal 1 m) eingesetzt werden müssen, um die jeweils gewünschten Effekte (siehe Erläuterung in Abschnitt 3.3) zu erreichen.

Da lediglich der Einsatz von Zentrierhilfen in kurzen Abständen (maximal 1 m) eine definierte Position der Sondenrohre zueinander und gleichzeitig des Sondenrohrbündels im Bohrloch erlaubt, wurde diese Konfiguration als Referenz-EWS definiert, anhand derer verschiedene Verfüllmaterialien untersucht werden. Der Durchmesser der Referenz-EWS beträgt 159 mm, so dass die in zahlreichen Leitfäden formulierte Anforderung an einen Mindestbohrlochdurchmesser von 150 mm erfüllt ist.

Aufgrund der Untersuchung unterschiedlicher Einbauabstände von Abstandshaltern und Zentrierhilfen jeweils innerhalb einer EWS von Charge 1 und 2 können keine aus den Einbauabständen resultierenden Einflüsse auf den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand untersucht werden, da dieser ein integraler Wert für die gesamte EWS ist.

7. Ausblick

Die Durchführung von Außenlaborversuchen auf dem Versuchsgelände in Crailsheim wird mindestens bis Jahresende 2010 fortgesetzt.

Aktuell werden auf Basis einer Referenz-EWS (159 mm Bohrlochdurchmesser, Zentrierhilfen im Abstand von einem Meter) zahlreiche verschiedene Verfüllmaterialien verglichen.

Ein zentraler Aspekt der zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen ist die Detektierbarkeit von Wasser- und Luftfehlstellen in der Verfüllung mit Hilfe verschiedener

Messverfahren. Die vergleichende Auswertung der Messergebnisse und der daraus gezogenen Rückschlüsse auf die Verfüllqualität sowie deren Vergleich mit dem tatsächlichen Zustand im Bohrloch ist Inhalt einer in Bearbeitung befindlichen Diplomarbeit.

Quellenangaben

- [1] Lorinser, B. - Qualitätsmanagement bei der Nutzung oberflächennaher Erdwärme; Fachbeitrag zur Messe Geotherm 2008; Offenburg
- [2] Baumann, K. et al. - Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätskriterien für Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau; Abschlussbericht 2003; Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.; Bonn
- [3] Niederbrucker, R.; Steinbacher, N. - Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden; Technischer Endbericht; Amt der Oberösterreichischen Landesregierung; 2007
- [4] Steger, H. et al. - Hinterfüllkonzepte unter Berücksichtigung der geologischen Rahmenbedingungen; Fachbeitrag zur Messe Geotherm 2008; Offenburg
- [5] Müller, L. - Qualitätsanforderungen an die Hinterfüllbaustoffe von Erdwärmesonden; Tagungsband Geothermiekongress 2008; Karlsruhe
- [6] Kuckelkorn, J. - Großversuchsstand zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit von Erdwärmesonden-Systemen; Tagungsband Otti Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 2010; Linz
- [7] Reuß, M. - Einfluss von Bohrloch- und Sondengeometrie auf den Wärmetransport; Tagungsband Otti Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 2009; Kloster Banz
- [8] Clausen, H. - Durchführung von Simulationsrechnungen zum Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die thermische Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden; Tagungsband Otti Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie 2008; Kloster Banz
- [9] Dornstädter, J. et al. - Erfahrungen aus der Praxis mit dem Enhanced Geothermal Response Test (EGRT); Tagungsband Geothermiekongress 2008; Karlsruhe
- [10] Rybach, L. et al. - Projekt Drahtloser Minidatenlogger für Temperaturmessungen in Erdwärmesonden; Schlussbericht; Bundesamt für Energieforschung (Schweiz); 2003
- [11] Rübel, A. et al. - Extrem dünne Bohrlochsonden zum Einsatz in oberflächennahen Erdwärmesonden; Tagungsband Geothermiekongress 2009; Bochum
- [12] Temperaturtiefenprofile stärken die Aussagekraft von Thermal-Response-Tests; bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe September 2009
- [13] Gnielinski, V. - Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt und im ebenen Spalt; In: VDI Wärmeatlas; 10. Auflage; Gb 1 - Gb 6; 2006; Heidelberg

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg gefördert. Der Autor dankt für diese Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt beim Autor.

Solites, Mathieu Riegger, Nobelstr. 15, 70569 Stuttgart
riegger@solites.de