

Praxiserfahrungen mit der Auswertung des Geothermal Response Tests

Marc Sauer

UBeG Dr. Mands & Sauer GbR

Keywords: Geothermal Response Test, Temperaturprofile, sequentielle Auswertung, Parameteranpassung

1. Einleitung

Die Ausführung von Geothermal-Response-Tests ist bei der Planung von mittleren und großen Erdwärmesonden mittlerweile eine Standardmethode zur Untergrunderkundung geworden. Dabei wird eine definierte Wärmelast an eine Erdwärmesonde angelegt und die Temperaturentwicklung des Wärmeträgermediums bei Sondenein- und -austritt über die Zeit aufgezeichnet. Diese Temperaturänderung erlaubt die Ermittlung der zur Bemessung eines Erdwärmesondenfeldes erforderlichen thermischen Untergrundparameter Wärmeleitfähigkeit, Thermischer Bohrlochwiderstand und die ungestörte Erdreichtemperatur.

Die Interpretation der aufgezeichneten Daten lässt häufig Rückschlüsse auf weitere Faktoren zu. Die qualitative Prüfung der Temperaturkurven sowie die stufenweise (sequentielle) Testauswertung lassen Rückschlüsse zu auf das Vorhandensein einer Beeinflussung des Testverlaufs durch fließendes Grundwasser.

Der thermische Bohrlochwiderstand sowie die qualitative Auswertung von Temperaturprofilen die in der Testsonde vor und nach dem eigentlichen Response-Test ausgeführt werden, erlauben die Beurteilung der Qualität der Bohrlochhinterfüllung.

Über die Aufnahme der Temperaturprofile kann darüber hinaus auch die Sondentiefe sowie (unter günstigen Bedingungen) auch die Tiefe der eingebrachten Schutzverrohrung, bzw. größere Unterschiede im Durchmesser der Bohrung ermittelt werden.

Im Folgenden werden einige Praxiserfahrungen mit der Auswertung von Geothermal Response Test anhand von Beispielen aufgezeigt.

2. Temperaturmessungen

Für die Messung der Temperaturen in einer Erdwärmesonde können handelsübliche Temperaturlichtlote, Kabeltemperaturfühler (z.B. pt1000) und Druck-Temperatur-Datenlogger eingesetzt werden.

Kabeltemperaturfühler und auch Lichtlot haben den Vorteil, dass die Messwerte direkt am Sondenkopf abgelesen und die Messung aufgrund der geringeren Eigenkapazität der Messgeräte deutlich schneller ausgeführt werden können. Demgegenüber besteht der Nachteil, dass die Fühler häufig sehr leicht in die Sonde eingebracht werden können aber gelegentlich, insbesondere wenn die Sonde stark verdrillt ist, aufgrund des Reibungswiderstandes nur sehr schwer wieder zu ziehen sind.



Abb. 1: Temperaturmessgeräte

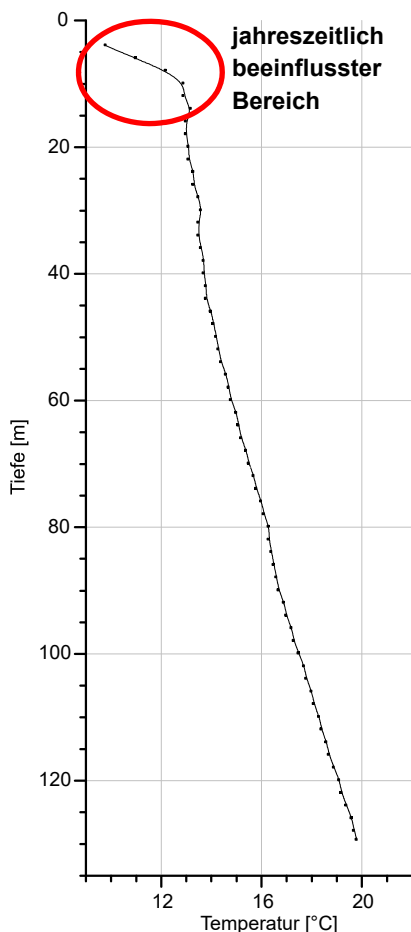
Die Druck-/Temperatursonden (bzw. -logger) können an sehr dünner aber reißfester Schnur in die Erdwärmesonde eingebracht und meist problemlos geborgen werden (oder im Falle von z.B. Querschnittsverengungen in Folge von Quetschungen gar nicht erst eingebracht werden). Aufgrund der hohen thermischen Eigenkapazität und der fehlenden Kontrollmöglichkeit, ob sich ein stabiles Messergebnis in einer bestimmten Tiefe eingestellt hat, ist der Zeitaufwand deutlich größer.

Gegenüber den Messungen mit Lichtlot und Temperaturfühler bieten die Druck-/Temperatursonden aufgrund der automatischen Messung und Aufzeichnung von Druck (also Tiefe), Temperatur und Zeit einen höheren „Messkomfort“ und lassen sich weiterhin auch für größere Tiefen bis 300m und mehr einsetzen.

2.1 Bestimmung der ungestörten Erdreichtemperatur

Für die Bemessung der erforderlichen Erdwärmesondenfeldkonfiguration (Auslegungsberechnung) ist die ungestörte Erdreichtemperatur häufig genau so wichtig, wie die Untergrundwärmeleitfähigkeit. Es ist zu empfehlen, diese Größe aus einem vor dem eigentlichen Response-Test aufgenommenen Temperaturprofil abzuleiten. Dabei kann der jahreszeitlich beeinflusste Bereich ausgeblendet werden. Zudem ist die Messung genauer als die Ableitung aus der Temperaturkurve eines GeRTs vor der eigentlichen Aufheizphase, da die Zirkulation des Mediums in der EWS bereits eine deutlich größere Störung der natürlichen Verhältnisse darstellt, als das Einbringen der Messsonde. Zudem verändert das Response-Testgerät durch seine Eigenwärme (oder auch -kälte, je nach Jahreszeit) die Temperatur noch vor bzw. während der Messung und es findet ein Wärmeeintrag durch die Reibungsverluste der Umwälzpumpe (in der Größenordnung 100 – 200 W) statt.

Diese Nachteile können umgangen werden, wenn die Messung ausschließlich im Rücklauf (aus der EWS) für den ersten Wasseraustausch betrachtet werden. Hierfür ist jedoch ein relativ hoher Messaufwand zu betreiben. Die Messung muss in hoher zeitlicher Auflösung und mit sehr präzisen Temperatursensoren erfolgen. Meist hat sich im ersten Durchlauf noch kein stabiler Durchfluss und keine vollständige Entlüftung in System eingestellt, so dass diese Messungen nicht mit der ausreichenden Messsicherheit ausgeführt werden können.



In der Praxis wird diese Methode daher kaum Anwendung. Zudem kann nicht verhindert werden, dass ein Temperatureaustausch zwischen dem aus größeren Tiefen der EWS stammenden Wassers mit den oberflächennahen Bereichen stattfindet.

Aus dem ungestörten Temperaturprofil bzw. dem daraus abgeleiteten geothermischen Gradienten kann nach der Gleichung [Wärmefluss = geotherm. Gradient x Wärmeleitf.] eine Abschätzung der Untergrundwärmeleitfähigkeit erfolgen, wenn der geothermische Wärmefluss bekannt ist. Leider ist das zur Verfügung stehende Kartenmaterial zum geothermischen Wärmefluss häufig nicht sehr exakt bzw. beruht auf Berechnungen die auf geschätzten Wärmeleitfähigkeitswerten basieren, was dann selbstverständlich nicht zu einem echten Messergebnis führen kann.

Abb. 2: Tiefen-Temperaturprofil vor GeRT-Ausführung

2.2 Abkühlverhalten

Werden in bestimmten Zeitintervallen nach Beendigung der Aufheizphase Tiefen-Temperaturprofile in der Erdwärmesonde aufgenommen, kann das Abkühlverhalten über die Sondentiefe charakterisiert werden. Damit lassen sich Rückschlüsse ziehen auf

- GW-Einflüsse
- Wechsel der Leitf. (Schichtwechsel)
- Rückschlüsse zur Verfüllung
- Bohrlochdurchmesser (qualitativ)
- Sondentiefe

In Abbildung 3 sind vier Temperaturprofile dargestellt, die in einem zeitlichen Abstand von 1, 2, 3 und 4 Stunden nach Beendigung der Aufheizphase in der Erdwärmesonde aufgenommen wurden. Die qualitative Interpretation zeigt eine deutlich schnellere Abkühlung in dem Tiefenbereich um ca. 55m und ca. 75m. Hier erfolgt eine schnellere Abfuhr von Wärme durch den Einfluss von fließendem Grundwasser.

In Abbildung 4 zeigen die Temperaturprofile im unteren Bereich eine deutlich langsamere Abkühlung. Diese Beobachtung korreliert mit dem Auftreten einer Braunkohleschicht mit geringer Wärmeleitfähigkeit.

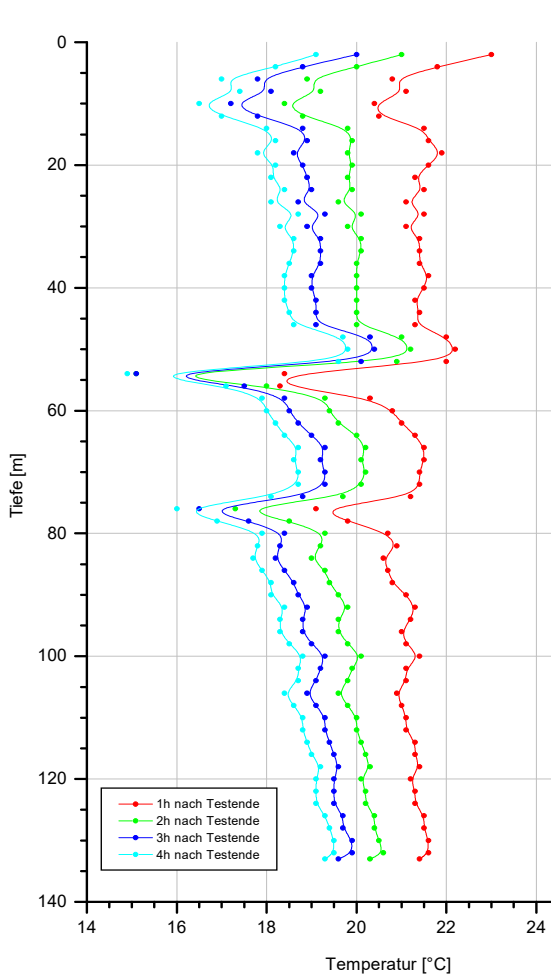


Abb. 3: Temperaturprofile mit GW-Einfluss

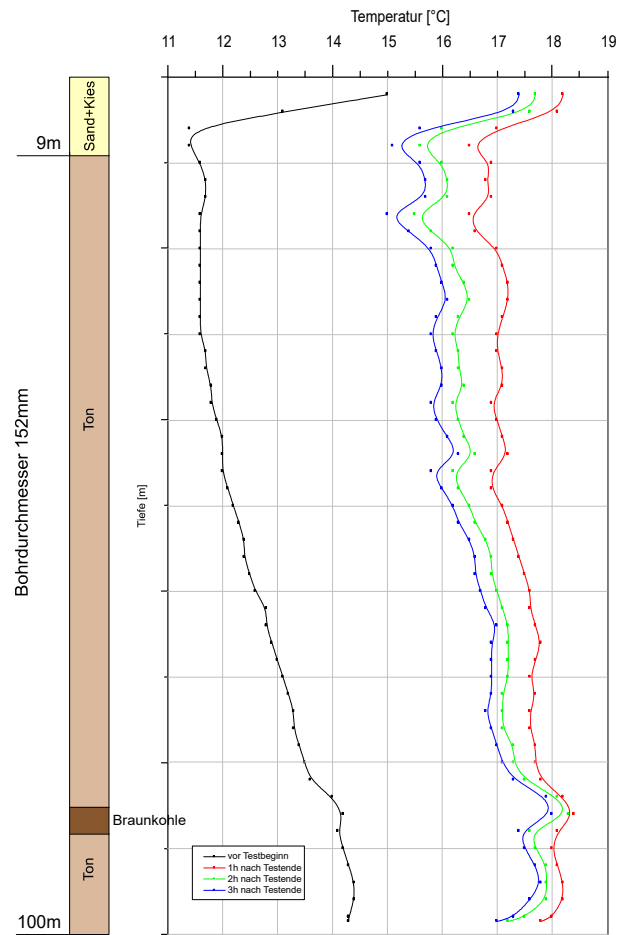


Abb. 4: Temperaturprofile mit Schichtwechsel

Die in Abbildung 5 dargestellten Temperaturprofile nach Beendigung der Aufheizphase zeigen über den Tiefenbereich ca. 20m bis 90m eine fast sofortige Abkühlung der Sonde auf die Ausgangstemperatur. Diese schnelle Wärmeabfuhr ist nur möglich, wenn das fließende Grundwasser direkten Kontakt mit der Erdwärmesonde hat. Anhand der Profile kann also abgeleitet werden, dass zumindest in diesem Tiefenbereich die Bohrlochhinterfüllung nicht ordnungsgemäß ausgeführt wurde.

Die in Abbildung 6 dargestellten Temperaturprofile zeigen in der Tiefe ca. 46m einen deutlichen Temperatursprung. Oberhalb dieser Tiefe zeigt eine relativ geringe Temperaturdifferenz zwischen den Messungen 1, 2 und 3h nach Testende eine deutlich langsamere Abkühlung als der Bereich unterhalb des Temperatursprungs. Dies korreliert mit der Endtiefe der Schutzverrohrung (46m) und dem Ergebnis des GeRT, wonach das Gebirge eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,4 W/(m,K) aufweist. Als Verpressmaterial wurde ein thermisch verbessertes Produkt mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,0 W/(m,K) eingesetzt, die höhere Wärmeleitfähigkeit des Gebirges zeigt sich deutlich durch die schnellere Abkühlung in dem unteren Bereich der EWS mit dem kleineren Bohrdurchmesser.

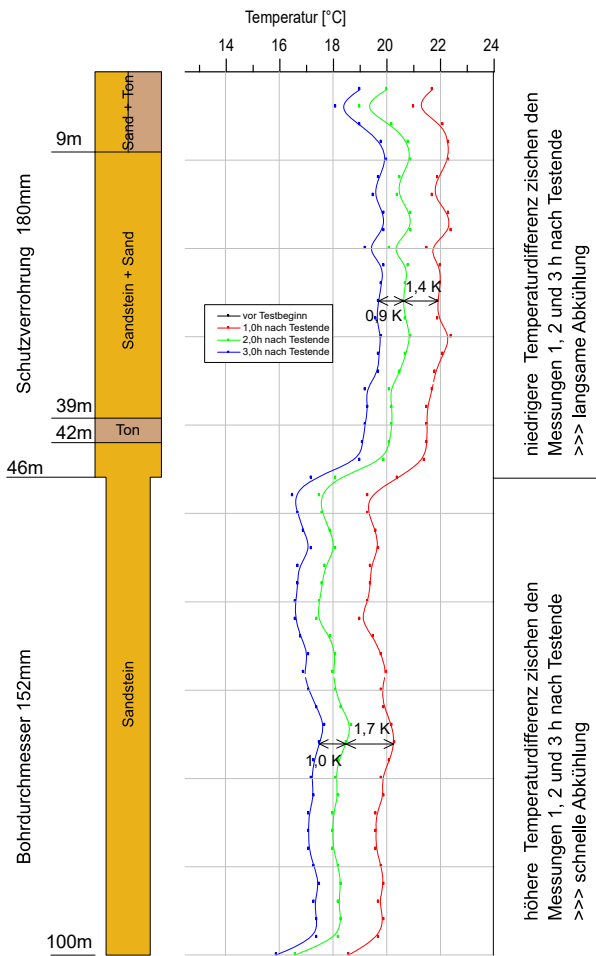
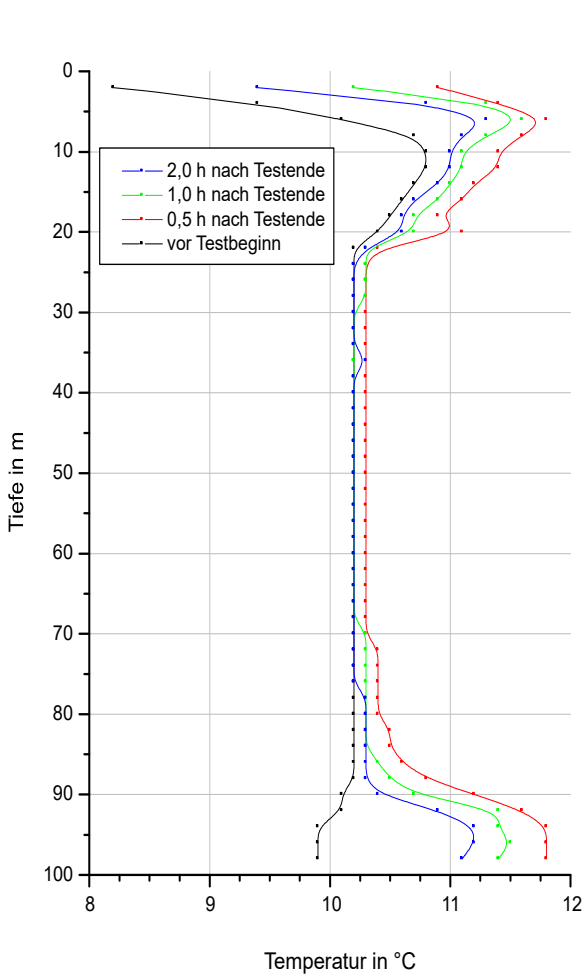


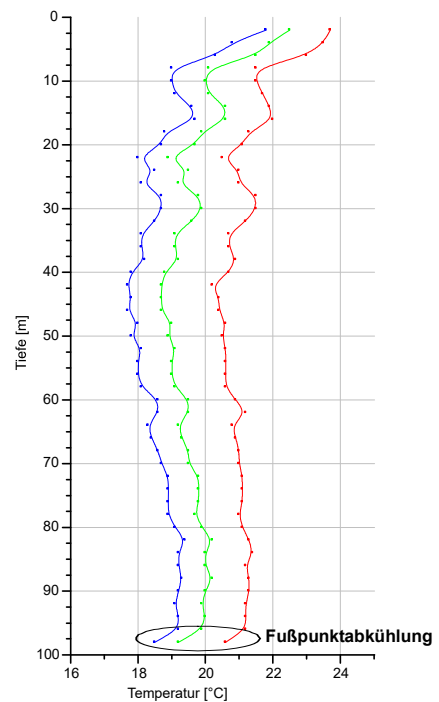
Abb. 5: Unmittelbarer Kontakt d. fließenden GW mit d. EWS

Abb. 6: Unterschiedliche Bohrlochdurchmesser

Ein häufiges Problem bei der Erstellung von Erdwärmesonden ist, dass die Sondentiefe im Nachhinein nicht ohne weiteres feststellbar ist. Üblicherweise kann die Sondentiefe durch Lotung mittels Lichtlot ermittelt werden. Bei einer Diskrepanz zwischen erwarteter Sondentiefe und geloteter Sondentiefe kann nicht sicher beurteilt werden, ob die EWS tatsächlich kürzer ist als erwartet oder ob nicht eine Querschnittsverengung durch z.B. Quetschung das weitere Einbringen des Lichtlotes verhindert.

Mit der Aufnahme von Temperaturprofilen nach der GeRT Ausführung kann zumindest beurteilt werden, ob mit der Temperatursonde der Erdwärmesondenfuß erreicht wurde. Am Sondentiefsten zeigt sich üblicherweise eine „Fußpunkt-Abkühlung“. Dabei ist zwischen dem letzten (tiefsten) Messpunkt und dem oder den Vorletzten ein signifikanter Temperatursprung erkennbar, da am Sondenfuß die Wärme nicht nur in radialer Richtung abfließen kann, sondern auch in vertikaler Richtung, nach unten.

Abb. 7: Fußpunkt-Abkühlung



3. Beispiel „Wassereintritte in den Sondenringraum“

An einer Erdwärmesonde eines Sondefeldes wurden Wasseraustritte am Sondenkopf beobachtet. Gespanntes Wasser drang in den Sondenringraum ein und stieg nach oben. Zur Erkundung der Situation wurde ein „zweckentfremdeter“ Response-Test durchgeführt. Ziel war nicht die Ermittlung der Untergrundwärmeleitfähigkeit, sondern die Erdwärmesonde aufzuheizen, damit im Anschluss das Abkühlungsverhalten bestimmt werden konnte.

In Abbildung 8 (links) sind die entsprechenden Temperaturprofile dargestellt. Deutlich erkennbar ist die schnelle Abkühlung in dem Bereich um 15m Tiefe. Nachdem der Bereich des Wassereintritts auf diese Weise lokalisiert werden konnte, wurden in einem geringen Abstand (0,5 – 1,0m) um die Sonde herum insgesamt 4 Injektionsbohrungen bis unterhalb dieser Tiefe abgeteuft und eine dünnflüssige abdichtende Suspension eingepresst um den Wassereintritt zu unterbinden.

Im Anschluss wurde der GeRT mit Aufnahme der Temperaturprofile wiederholt. Aus Abbildung 8 (rechts) ist ersichtlich, dass nach der Verpressung die Abkühlung über die Sondentiefe annähernd gleichmäßig erfolgt und kein Wasser mehr in dem Tiefenbereich um 15m mehr in den Sondenringraum eintritt.

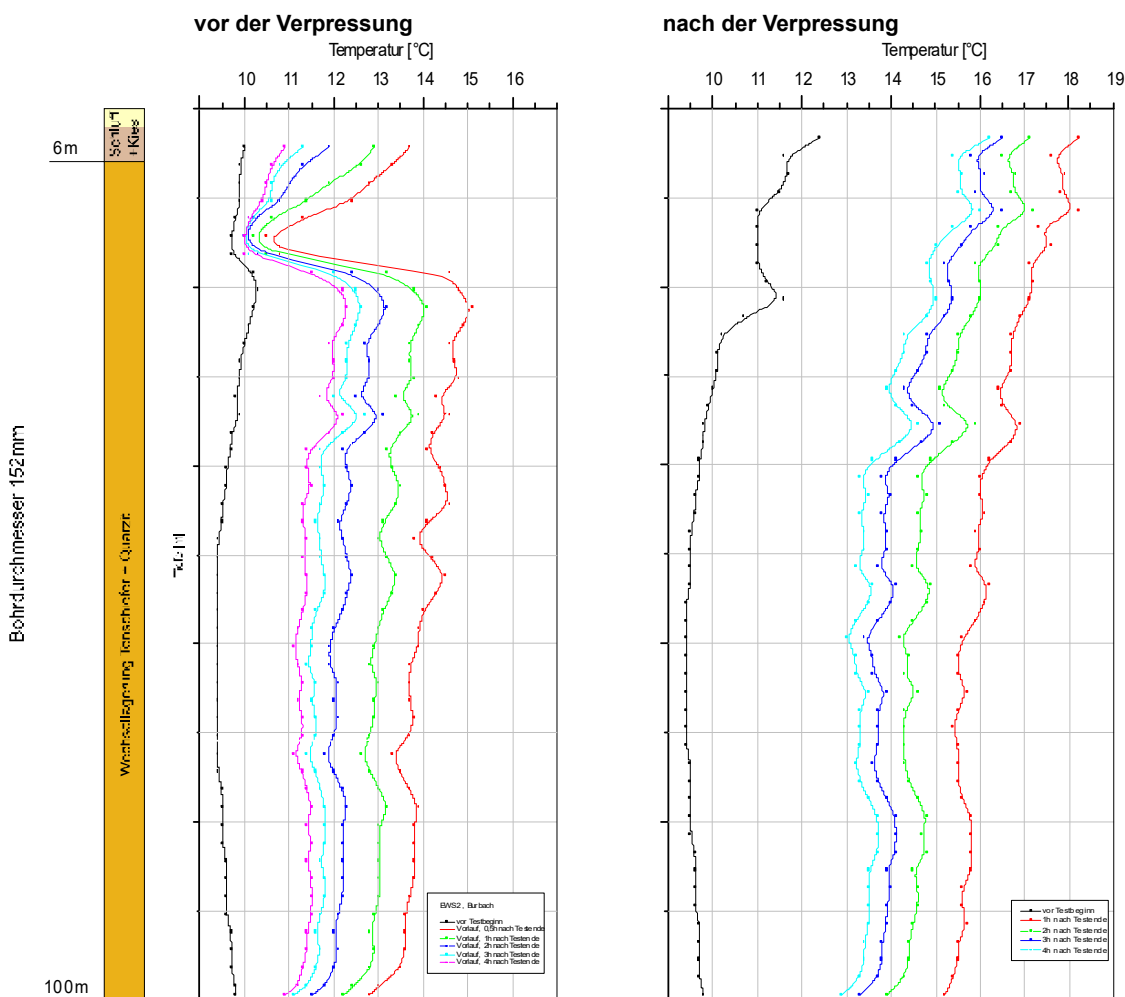


Abb. 8: Beispiel Nachverpressung einer Erdwärmesonde

4. Beispiel "GeRT mit GW-Einfluss"

In Abbildung 9 sind die Temperaturkurven, Verlauf der Heizleistung und Umwälzrate eines Geothermal-Response-Tests dargestellt. Die optische Prüfung dieser Kurven zeigt zunächst keine Auffälligkeiten.

Nach den entsprechend der angetroffenen Lithologie anzusetzenden Erfahrungswerten ist mit einer Wärmeleitfähigkeit in der Größenordnung ca. 2,5 W/(m,K) zu rechnen. Nach dem Ergebnis der Standardlinienquellenauswertung beträgt die Wärmeleitfähigkeit jedoch 3,6 W/(m,K). Die Ausführung einer stufenweisen (sequentiellen) Testauswertung (Abb. 9, links unten) zeigt, dass sich das Testergebnis nicht auf einen Wert stabilisiert, sondern mit dem Testverlauf immer weiter ansteigt. Dies wird dadurch verursacht, dass zusätzlich zur konduktiven radialen Ausbreitung des thermisch beeinflussten Bereichs ein konvektiver Wärmetransportmechanismus durch fließendes Grundwasser hinzutritt. Da sich dabei das Volumen, über welches das fließende Grundwasser Wärme abführen kann, stetig vergrößert, nimmt die scheinbare Wärmeleitfähigkeit immer weiter zu.

Bei der Auswertung nach der Standardlinienquellenmethode wird das Endergebnis letztlich von der Laufzeit bestimmt. Je länger der Test andauert, umso größer ist der berechnete Wärmeleitfähigkeitswert.

Der Grundwassereinfluss zeigt sich weiterhin in den nach Beendigung der Aufheizphase ausgeführten Temperaturprofilen. Hier ist in dem Tiefenbereich um ca. 55m eine deutlich schnellere Abkühlung zu erkennen.

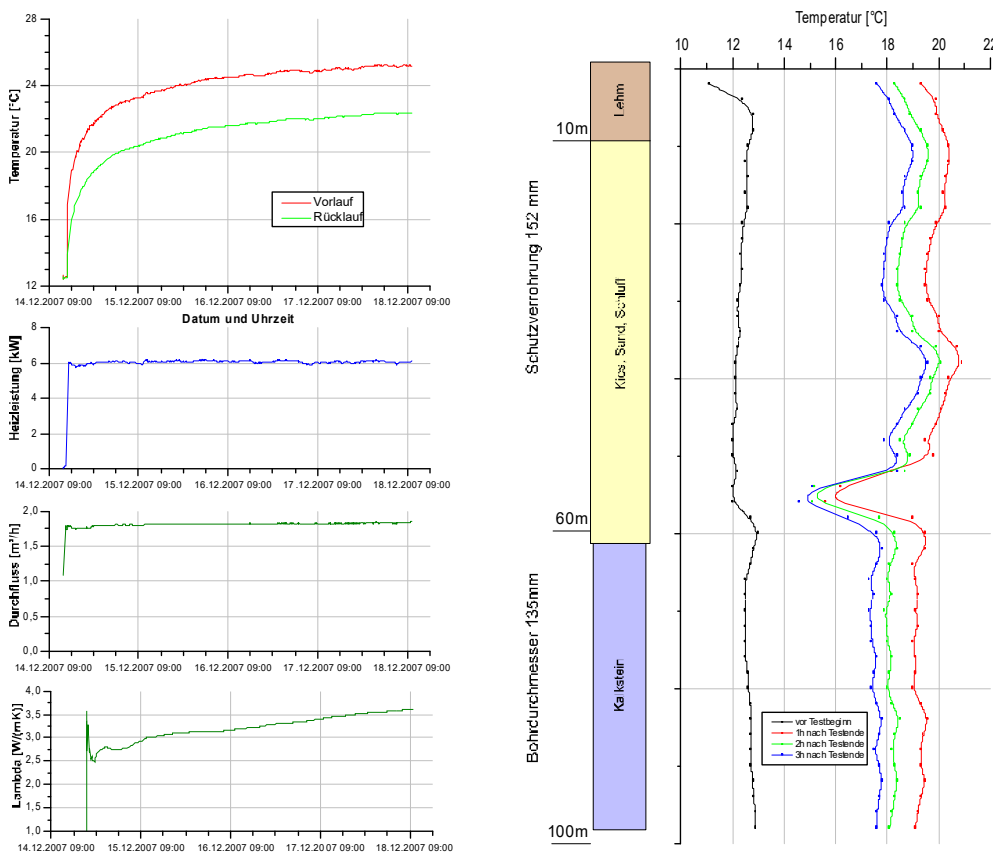


Abb. 9: Beispiel GeRT mit GW-Einfluss

Die Linienquellentheorie geht von einem rein konduktiven Wärmetransport aus. Konvektiver Transport kann hierbei nicht berücksichtigt werden.

Bei einem moderaten Grundwassereinfluss kann ggf. der vordere Abschnitt der Temperaturkurven zur Auswertung genutzt werden, da hier noch keine oder nur geringe Beeinflussung vorliegt.

Da die stufenweise Auswertung kein stabiles Ergebnis zeigt, kann hilfsweise eine Parametervariation durchgeführt werden. Dabei werden unter Variation von λ und R_b (und Auswertzeitraum) mögliche Temperaturverläufe berechnet und den Messwerten gegenübergestellt. Um den Grad der Übereinstimmung zu quantifizieren, wird die Standardabweichung zwischen den berechneten Temperaturen und den gemessenen Temperaturen ermittelt.

Es wird das Wertepaar (λ / R_b) gesucht, mit dem die Abweichung (Standardabweichung) berechnete Kurve zu gemessener Kurve möglichst gering ist.

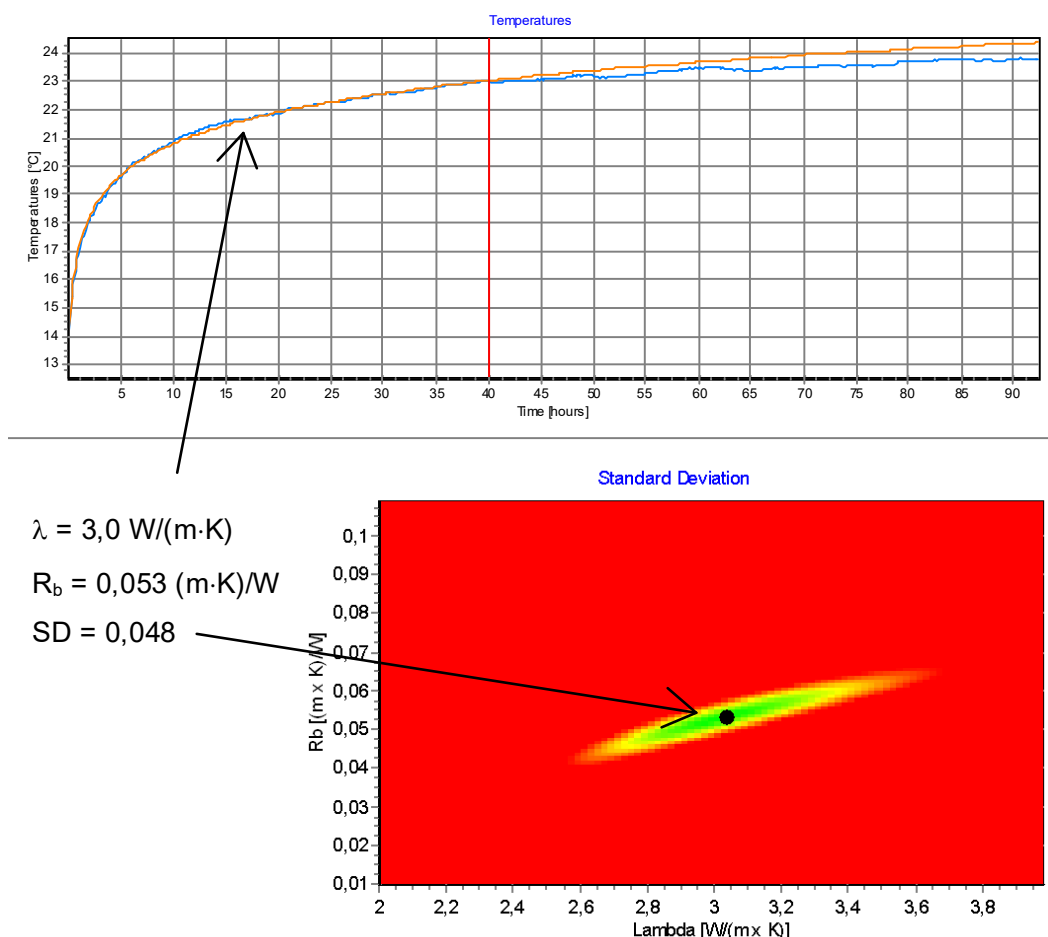


Abb. 10: Parametervariation /-anpassung und Variationsdiagramm

In Abbildung 10 sind die gemessene Temperaturen (blaue Kurve, als Mittelwert VL, RL) und die berechnete Temperaturkurve mit der geringsten Standardabweichung (orange Kurve) dargestellt. Die Berechnung der Standardabweichung erfolgte für den Zeitbereich 0 bis 40h (rote Linie). Danach

zeigt sich aufgrund des zunehmenden Grundwassereinflusses eine mit der Zeit immer größer werdende Divergenz zwischen gemessener und berechneter Kurve.

Da mit einer Parameteranpassung immer eine Kurve mit der geringsten Standardabweichung gefunden werden kann, ist eine kritische Prüfung der Ergebnisse notwendig. Diese kann zum einen durch den optischen Vergleich zwischen gemessener und berechneter Kurve erfolgen (stimmt der Kurvenverlauf gut überein?). Zum anderen kann die Erstellung eines Variationsdiagramms einen Eindruck zur Sensitivität der Parametervariation verschaffen.

Hierzu werden die Standardabweichungen für einen (vorher definierten) Suchbereich berechnet und in einem λ/R_b -Diagramm durch unterschiedliche Farben dargestellt. Wertepaare die innerhalb der zweifachen Standardabweichung liegen, sind grün und Wertepaare innerhalb der dreifachen Standardabweichung gelb dargestellt. Der rote Bereich zeigt Kombinationen mit einer Standardabweichung größer der dreifachen Standardabweichung des am besten übereinstimmenden Wertepaares an.

Mit der Methode lassen sich auch unregelmäßige Testverläufe (Spannungsschwankungen, Umwelteinflüsse, Stromausfälle etc.) bzw. Kurventeile auswerten.

5. Beispiel „Koaxialsonde“

In Abbildung 11 ist der Temperaturverlauf eines an einer Koaxialsonde ausgeführten GeRTs dargestellt. Im Testverlauf vergrößert sich die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf. Da sich gleichzeitig die Durchflussrate proportional zur Temperaturdifferenz verringert, bleibt die Heizleistung konstant. Trotz des ungewöhnlichen Temperaturverlaufes konnte der Test (unter Verwendung des Mittelwertes zwischen VL und RL) ausgewertet und mit der sequentiellen Testauswertung ein stabiles Ergebnis nachgewiesen werden.

Dennoch musste die Ursache für den ungewöhnlichen Testverlauf geklärt werden. Eine Überprüfung der Umwälzpumpe zeigte keine Defekte an. Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass das innere Sondenrohr aufgrund der vergleichsweise starken Erwärmung um 25 K eine Längenänderung in der Größenordnung 0,5m erfahren hat. Da das innere Rohr jedoch nur etwa 0,3m kürzer ist als das äußere Rohr, führte die Längenänderung zu einem Ansteigen des hydraulischen Widerstandes und damit zu einer Verringerung der Durchflussrate. Die weiteren Erdwärmesonden wurden mit entsprechend kürzeren Innenrohren ausgerüstet.

Die EWS-Anlage war (bzw. ist) für einen aktiven Kühlbetrieb mittels reversibler Wärmepumpe vorgesehen, d.h. auch im späteren Anlagenbetrieb ist mit hohen Temperaturdifferenzen zu rechnen. Wäre die Länge der Innenrohre nicht korrigiert worden, wären im späteren Kühlbetrieb aufgrund des unvorhergesehenen Druckverlustes sicher Probleme aufgetreten.

An der gleichen Sonde kann mit den Temperaturprofilen nach Testausführung die Tiefe der eingebrachten Schutzverrohrung bzw. die relative Änderung des Bohrlochdurchmessers beobachtet werden (s. Abbildung 12).

Die Wärmeleitfähigkeit des Gebirges wurde mit 1,4 W/(m,K) ermittelt. Die Verfüllung des Sondenringraumes erfolgte mit thermisch verbessertem Material mit einer deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,0 W/(m,K). Dies zeigt sich in der deutlich schnelleren Abkühlung in dem Tiefenbereich bis ca. 50m mit dem größeren Bohrlochdurchmesser. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials kann hier mehr Wärme in radialer Richtung abtransportiert werden als in dem darunterliegenden Bereich mit geringerer Umhüllung mit gut wärmeleitfähigem Material.

Mit Hilfe der Temperaturprofile nach dem Test kann also auch eine Relativabschätzung der Wärmeleitfähigkeiten von Verpressmaterial und Gebirge erfolgen. In diesem Fall ist die Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials höher als die des umgebenden Gebirges. Bei den in Abbildung 6 dargestellten Profilen zeigt sich der umgekehrte Fall.

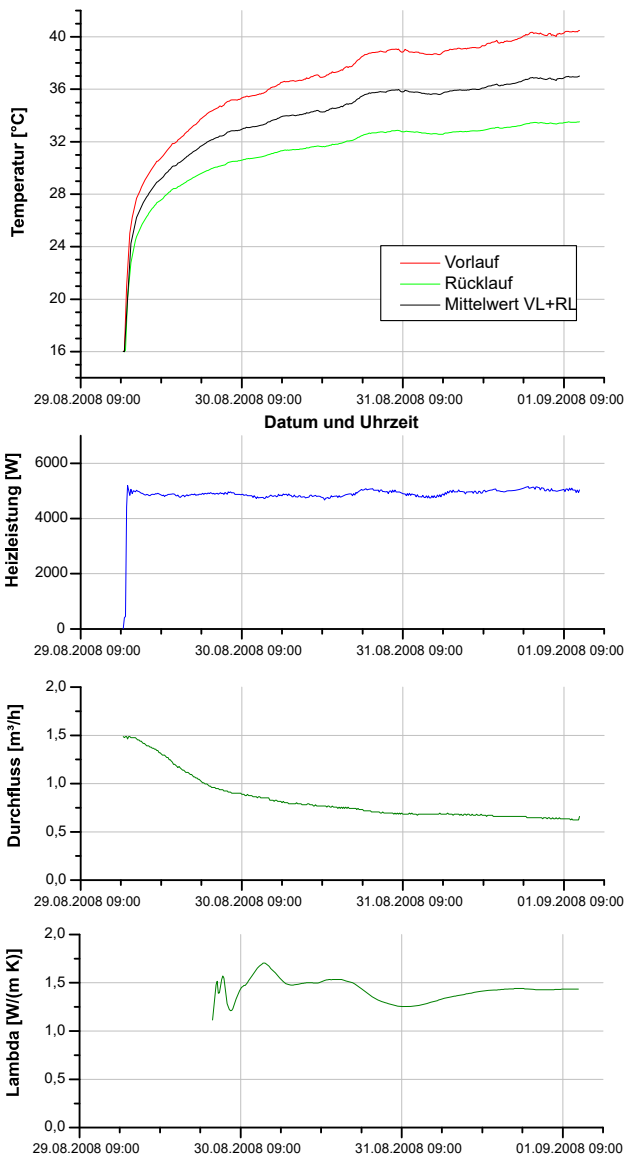


Abb. 11: GeRT an einer Koaxialsonde

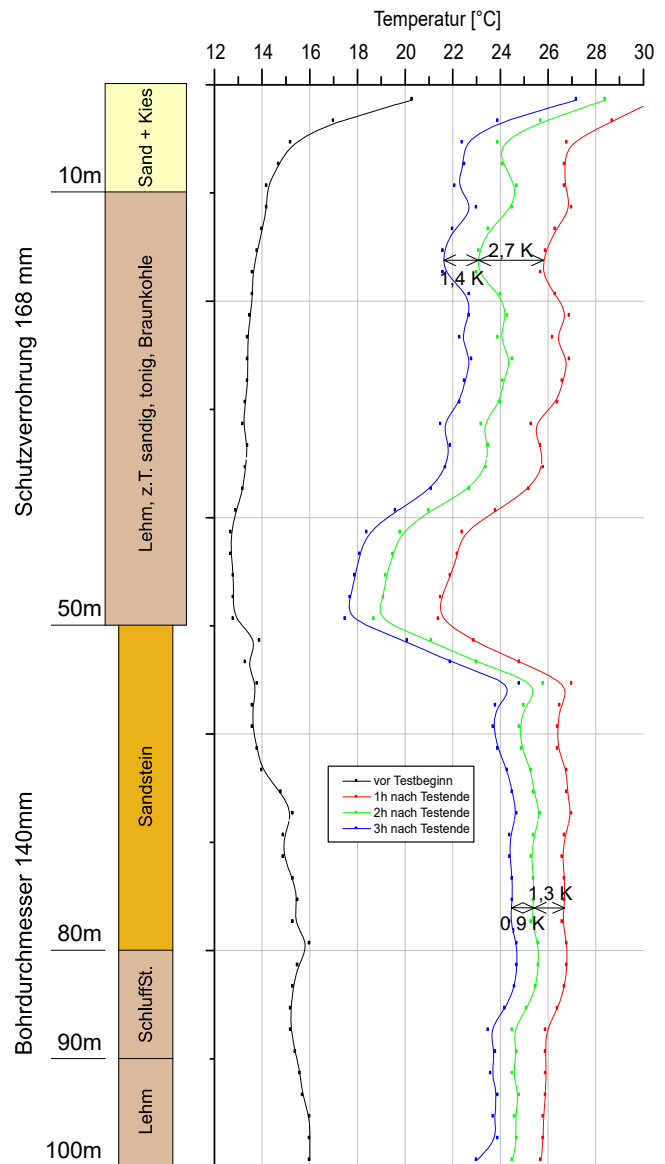


Abb. 12: Temperaturprofile in Koaxialsonde

6. Fazit

Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus über 300 Testauswertungen in den vergangenen 10 Jahren zeigt, dass unter günstigen Bedingungen mit den Messergebnissen eines Geothermal-Response-Tests und in Kombination mit der Aufnahme von Tiefen-Temperaturprofilen vor und nach der eigentlichen Testausführung eine ganze Reihe weiterer Erkenntnisse über den Untergrund und die getestete Erdwärmesonde selbst gewonnen werden können.

Die sequentielle Testauswertung erlaubt eine Abschätzung, ob ein Einfluss von fließendem Grundwasser über den Testzeitraum vorliegt und ob die Testzeit ausreichend lang bemessen war und evtl. aufgetretene Störeinflüsse (Spannungsschwankungen, Sonneneinstrahlung etc.) durch eine lange Laufzeit kompensiert werden konnten.

Bei gestörten oder grundwasserbeeinflussten Testverläufen kann über eine Parametervariation eine Auswertung erfolgen, auch wenn die Standardlinienquellenmethode kein belastbares Ergebnis liefern kann.

Die Bestimmung der ungestörten Erdreichtemperatur über die Aufnahme von Temperaturprofilen vor der Testausführung hat entscheidende Vorteile gegenüber der Ermittlung durch den Response-Test (nur Umwälzpumpe läuft). Die Beeinflussung der Temperaturen durch das Messgerät selbst ist wesentlich geringer und es lassen sich weitere Parameter wie geothermischer Gradient, evtl. Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit oder geothermischen Wärmefluss ableiten.

Die Aufnahme von Temperaturprofilen nach dem eigentlichen Test kann ebenfalls wertvolle Hinweise auf einen Grundwassereinfluss liefern. Zudem kann die Qualität der Hinterfüllung und, bei unterschiedlichen Bohrdurchmessern, die relative Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials im Vergleich zum Gebirge beurteilt werden.

Bei ausreichend großem Unterschied der Wärmeleitfähigkeiten von Verfüllmaterial und Gebirge kann mit den Temperaturprofilen die Tiefe der eingebrachten Schutzverrohrung bzw. signifikante Unterschiede des Bohrlochdurchmessers ermittelt werden.

Das Auftreten einer Fußpunkt-Abkühlung ist ein sicheres Indiz dafür, dass mit der Temperatursonde der Erdwärmesondenfuß erreicht wurde, so kann die Sondentiefe sicher ermittelt werden.

Literatur

Sanner, B., Mands, E., Sauer, M. & Grundmann, E.: Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test, Proceedings, EGC 2007 Unterhaching (2007)

Sauer, M., Mands, E., Sanner, B. & Grundmann, E.: Wirtschaftliche Aspekte beim Einsatz von Geothermal-Response-Tests, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2007 Bochum (2007)

Sanner, B., Mands, E., Sauer, M. & Grundmann, E. (2008): Thermal Response Test, a routine method to determine thermal ground properties for GSHP design, Proceedings, IEA HPC 2008, Zürich

Sauer, M., Mands, E., Sanner, B. & Grundmann, E. (2008): Thermal Response Tests in Europa – von Irland bis Griechenland, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2008 Karlsruhe

Mands, E., Sauer, M., Grundmann, E., Langguth, K., Sanner, B. & Gäbler, W. (2008): Stand der technischen Entwicklung oberflächennaher Geothermie in Deutschland, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 59, 12/08, Bonn

Sanner, B., Mands, E., Sauer, M. & Grundmann, E. (2009): Economic aspects of thermal response test – Advantages, technical improvements, commercial application, Proceedings, Effstock 2009, Stockholm

UBeG Dr. E. Mands & M. Sauer GbR, Reinbergstraße 2, 35580 Wetzlar
M.Sauer@UBeG.de