

Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten des Geothermal Response Test: Bestimmung der Erdwärmesondenlänge mittels Thermoimpuls

Marc Sauer, Erich Mands, Edgar Grundmann und Burkhard Sanner

UBeG GbR, Wetzlar

Keywords: Geothermal Response Test, Temperaturprofile, Thermoimpuls-Verfahren

Zusammenfassung

Der Geothermal Response Test (GeRT, international auch TRT) erweist sich weiterhin als zuverlässiges Werkzeug zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes für die Planungen von Erdwärmesonden. Durch weiterentwickelte Auswerteverfahren kann die Validität der Testergebnisse gut eingeschätzt werden, und auch unter schwierigen Randbedingungen (Grundwasserfluss, äußere Einflüsse) lassen sich heute, gegenüber früher, häufig noch zuverlässige Ergebnisse erzielen. Neben der reinen Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes wurde der GeRT inzwischen auch für andere Fragestellungen erfolgreich angewendet.

Mit dem Thermoimpuls-Verfahren lässt sich einfach und sicher die tatsächliche Länge einer Erdwärmesonde bestimmen. Dazu wird entweder ausreichend lange vor Beginn des Tests oder nach dem Test eine stabile Zirkulation im Bohrloch eingestellt, ein kurzzeitiger Wärmepuls in den Kreislauf eingegeben und dann die Zeitdauer gemessen, nach der die erste Temperaturerhöhung am Austritt der Erdwärmesonde beobachtet werden kann. Aus Durchflussvolumen, Rohrdurchmesser und Zeit kann die zurückgelegte Wegstrecke berechnet werden; diese beträgt das Doppelte der Erdwärmesondenlänge. Bei vorhandenen, fertig gestellten Erdwärmesondenanlagen kann auch die Wärmepumpe zur Erzeugung eines Wärmeimpulses herangezogen werden, die gemessene Länge bezieht dann die oberirdischen Anschlussleitungen mit ein. Verschiedene Versuche haben gezeigt, dass sich mit diesem Verfahren auch nachträglich ein sicherer Nachweis der Erdwärmesondenlänge führen lässt.

1. Einleitung

Mit einem Geothermal Response Test können neben der Bestimmung der thermischen Untergrundeigenschaften wie der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und des Bohrlochwiderstandes eine ganze Reihe weiterer Fragen beantwortet werden. Insbesondere in Kombination mit den tiefenorientierten Temperaturmessungen in der Erdwärmesonde ergibt sich dabei eine sehr aussagekräftige Datengrundlage, die es erlaubt, die Auslegung der Erdwärmesondenfelder genau an die örtlichen Untergrundverhältnisse anzupassen bzw. zusätzliche Informationen zu erhalten.

Die Bestimmung der tatsächlichen Erdwärmesondenlänge erweist sich dabei als besonders interessant, da hierzu gelegentlich widersprüchliche oder unzureichende Angaben vorliegen. Diese Messung ist nicht nur für den Bauherren wichtig, auch für die Auswertung der Geothermal Response Test ist die Kenntnis der exakten Erdwärmesondenlänge eine Grundvoraussetzung. Zur Messung der tatsächlichen Länge eingebauter Erdwärmesonden wurde in der Vergangenheit eine ganze Reihe von Methoden entwickelt:

- Markierung der Sondenlänge ab Werk; diese wird allerdings nur von wenigen Erdwärmesondenherstellern angeboten und ist im Gelände manchmal nicht erkennbar (z.B. wegen Abrieb des Aufdrucks oder weil die Sonde genau unterhalb der Markierung gekürzt wurde).
- Messung der Sondentiefe mittels eines Lichtlots oder eines Drucksensors. Dabei erweist sich die Längenkontrolle von Erdwärmesonden gelegentlich als problematisch, insbesondere bei tiefen Erdwärmesonden können Verdrillungen oder Quetschungen dazu führen, dass das Lichtlot nicht mehr gezogen oder die Drucksonde nicht eingebracht werden können.
- Die zuvor genannte Längenmessung wird um eine tiefenorientierte Temperatureaufnahme in den Erdwärmesonden in Kombination mit der durch den Geothermal Response Test induzierten Erwärmung erweitert. Die Längenkontrolle der EWS erfolgt dabei über die Sondenfußabkühlung (s. Abschnitt 2). Auch hierbei treten jedoch zeitweise dieselben, oben genannten Störfaktoren auf.
- Längenbestimmung der Erdwärmesonden mittels Farbmarkierung (Tracer). Diese Messung ist oft nur mit einem hohen labortechnischen Aufwand oder lediglich qualitativ möglich. Bei qualitativer Auswertung können starke Abweichungen auftreten. Hierbei sind gegebenenfalls auch die Dispersionsprozesse im Zweistoffsystem Tracer - Erdwärmesondenfluid zu berücksichtigen.

2. Sondenfußabkühlung

Üblicherweise kann die Sondentiefe durch Lotung mittels Lichtlot ermittelt werden. Bei einer Diskrepanz zwischen erwarteter Sondentiefe und geloteter Sondentiefe kann oft nicht sicher beurteilt werden, ob die EWS tatsächlich kürzer ist als erwartet, oder eine Querschnittsverengung durch z.B. Quetschung das weitere Einbringen des Lichtlotes verhindert.

Mit der Aufnahme von Temperaturprofilen nach der Durchführung eines Geothermal Response Tests kann anhand der Abkühlungsrate qualitativ eindeutig beurteilt werden, ob mit der Temperatursonde der Erdwärmesondenfuß erreicht wurde. Am Sondentiefsten zeigt sich üblicherweise eine deutliche „Fußpunktabkühlung“. 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. 1).

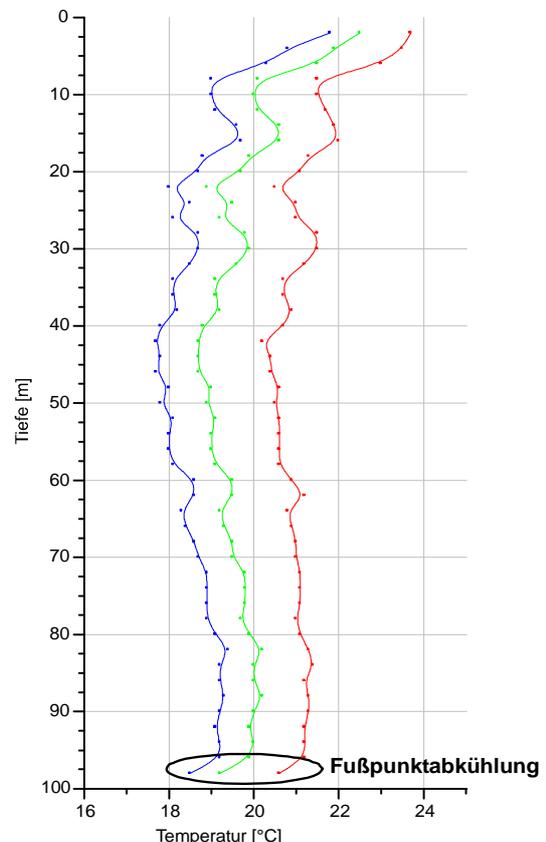


Abb. 1: Fußpunktabkühlung

3. Thermoimpuls

Die Thermoimpulsmessung stellt eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Erdwärmesondenlänge im Rahmen eines Geothermal Response Tests dar. Die Thermoimpulsmessung als Qualitätskontrolle ist u. a. dafür geeignet, die Sondeneinbindetiefen bereits bestehender Erdwärmesondenanlagen ohne direkten Zugang zu den Erdwärmesonden (z. B. nur über den Verteiler) ohne zusätzlichen Aufwand zu bestimmen.

Eine Thermoimpulsmessung findet an einem bestehenden Fluidkreislauf statt, bei dem aufgeheiztes Fluid (zumeist Wasser, jedoch nicht zwingend erforderlich) in die Erdwärmesonde einspeist wird. Anschließend wird der Zeitpunkt bestimmt, an dem sich der Wärmeeintrag durch eine Temperaturerhöhung im Rücklauf der Erdwärmesonde bemerkbar macht. Aus dem zwischenzeitlich durchgegangenen Gesamtfluidvolumen kann unter Kenntnis von Sondenometrie und -typ, sowie ggf. der Länge der Zulaufleitungen die Erdwärmesondenlänge bestimmt werden.

Die Thermoimpulsmessung wird zur Minimierung einiger Störfaktoren (s. Kapitel Fehlerquellen), als thermischer Stoß nach dem Ende des Response Tests durchgeführt.

3.1 Rahmenbedingungen für die Versuchsdurchführung

Um den Versuch mit ausreichender Genauigkeit durchführen zu können, müssen die folgenden Rahmenbedingungen eingehalten werden:

- Es muss ein geschlossener Fluidkreislauf etabliert sein.
- Der Durchfluss sollte möglichst konstant und dauerhaft turbulent sein.
- Wird der Thermoimpuls nach Ende eines GeRT ausgeführt, muss der Untergrund sich so weit abgekühlt haben, dass der Impuls nicht überprägt wird (i.d.R. nach 2 bis 3 Stunden).
- Die den Impuls erzeugende Wärmeleistung sollte möglichst hoch sein.
- Je nach Sondenlänge beträgt die Impulsdauer zwischen 2 und 15 Minuten.
- Die Temperaturmessung muss in einer hohen zeitlichen Auflösung erfolgen.
- Die Mess- und Anzeigegenauigkeit der Temperaturmessung muss möglichst hoch sein (Auflösung in hundertstel Grad).
- Die Mess- und Anzeigegenauigkeit der Volumenmessung muss möglichst hoch sein (Auflösung in mindestens 0,1 Liter).
- Die Temperaturmessung sollte direkt am Sondenkopf erfolgen. Bei Versuchsdurchführung mit WP an bestehenden Systemen muss das Volumen der Anbindeleitungen berücksichtigt werden.

3.2 Beispiel

An einer Doppel-U-Erdwärmesonde (4 x 40 mm x 3,7 mm) mit einer bekannten Tiefe von 295 m wurde ein Thermoimpuls mit einer Heizleistung von rund 16 kW über ca. 15 min eingegeben.

Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt den Temperaturverlauf im Vor- und Rücklauf am Sondenkopf. Die zeitliche Auflösung beträgt 1 sec. Die mittlere Durchflussrate über den Versuchszeitraum beträgt 2.098,1 l/h.

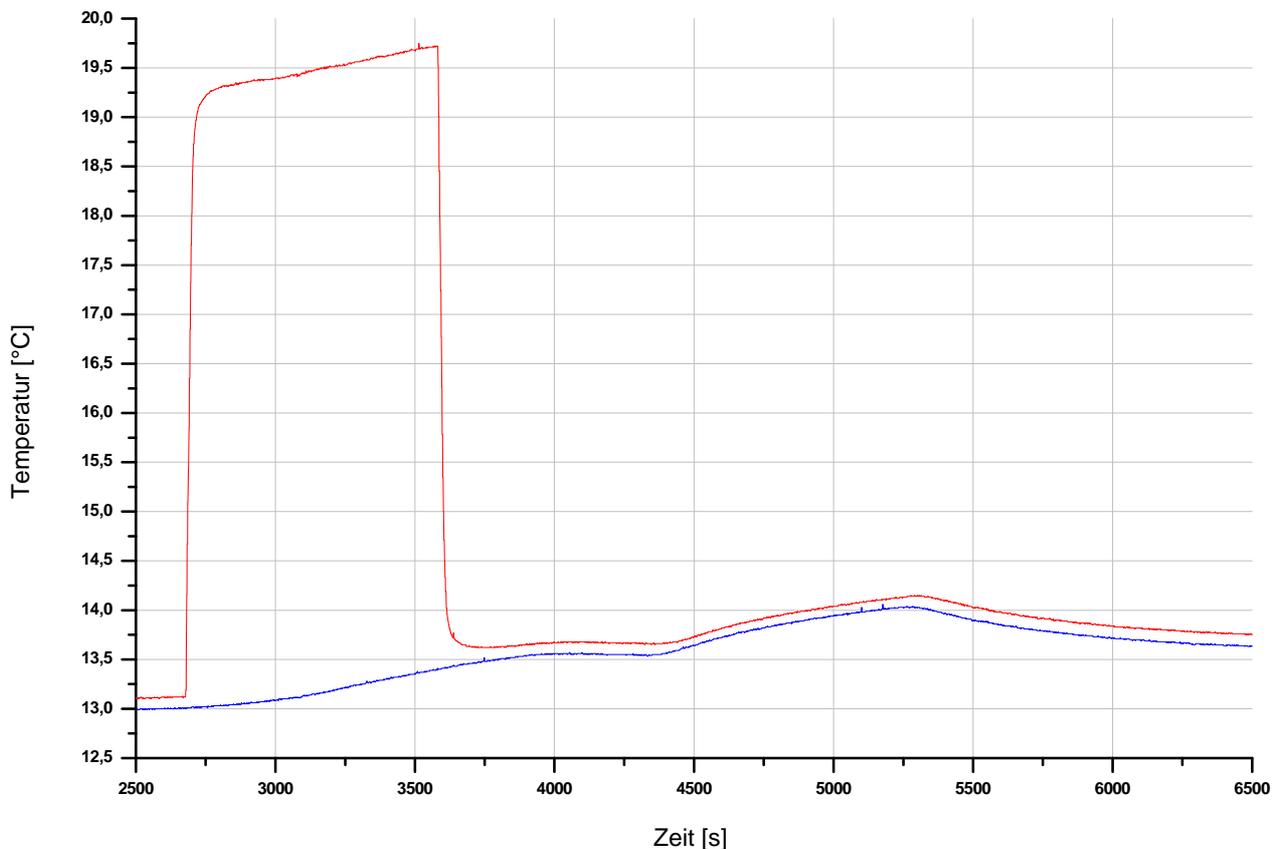


Abb. 2: Temperaturentwicklung im Vorlauf zu einer 295 m tiefen Erdwärmesonde (rot) und Rücklauf von der Erdwärmesonde (blau) bei Anlegen eines Thermoimpulses (Übersicht über die gesamte Messdauer)

Der initiale Thermoimpuls ist mit einer Temperaturerhöhung um etwa 6 K im Vorlauf zur Erdwärmesonde gut zu erkennen. Nach der Impulsdauer von 15 min fällt die Temperatur schnell wieder ab. Nach weiteren etwa 13 min zeigen die Kurven durch den signifikanten Anstieg der Temperatur im Rücklauf an, dass der Impuls den Kreislauf einmal durchlaufen hat. Da unterwegs ein Teil der Wärmeenergie an das Gebirge abgegeben wurde, ist der Impuls nun deutlich abgeschwächt. Aufgrund der Wärmeleitung innerhalb des Bohrlochs (Wärmeübergang zwischen abwärts- und aufwärts führenden Rohren) steigt die Rücklauftemperatur während der Heizphase ebenfalls leicht an.

Damit der genaue Zeitpunkt des Beginns der Impulsantwort besser bestimmt werden kann, muss die Skalierung geändert werden (Abb. 3). Anhand des Kurvenverlaufes kann dann die Impulslaufzeit mit 1.705 sec bestimmt werden. Bei der mittleren Durchflussrate von 2.098,1 l/h entspricht dies einem Volumen von 993,7 l.

Die gesamte Rohrlänge ergibt sich aus dem Quotient von Wasservolumen und innerem Rohrquerschnitt zu 1.190,4 m. Die Tiefe der Doppel-U-Sonde berechnet sich danach auf 297,6 m.

Die mit dem Thermoimpuls ermittelte Tiefe entspricht damit in guter Näherung der bekannten Tiefe von 295 m.

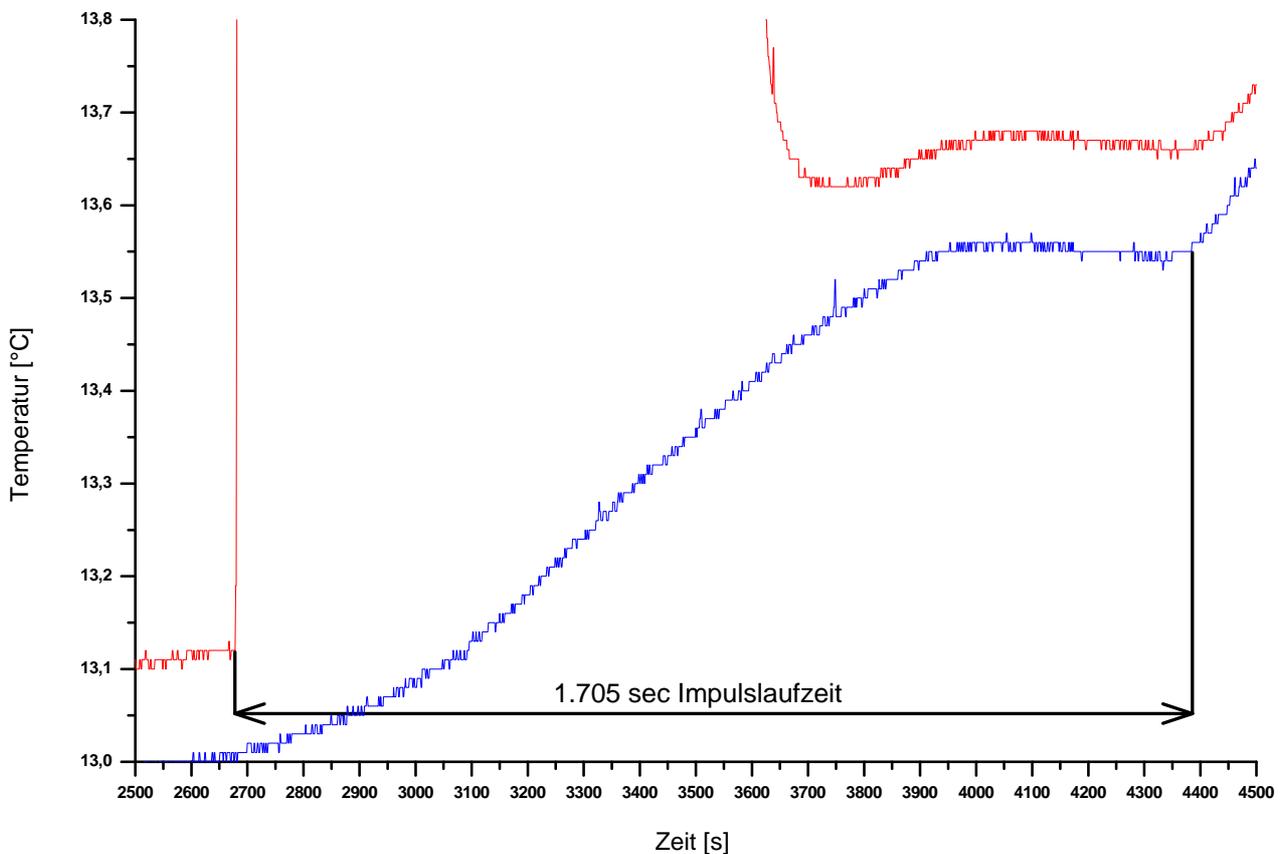


Abb. 3: Detail des Messkurve zum Thermoimpuls in höherer Auflösung (Vorlauf zur Erdwärmesonde rot, Rücklauf von der Erdwärmesonde blau); der Zeitpunkt des Anstiegs im Rücklauf ist gut zu erkennen

3.3 Mögliche Fehlerquellen

Neben den messtechnischen Fehlern der Temperatur- und Volumenmessung sind die nachfolgend aufgeführten Punkte als weitere mögliche Fehlerquellen zu berücksichtigen:

3.3.1 Messungenauigkeit durch Luft einschüsse im Fluidkreislauf

Um den den Wärmetransport störenden Einfluss von Luft einschüssen im Fluidkreislauf zu minimieren, ist zur Entlüftung und Herstellung eines einheitlichen Temperaturniveaus der Fluidkreislauf mindestens eine halbe Stunde ohne Leistungsbeaufschlagung zu zirkulieren.

3.3.2 Messungenauigkeit durch zu große Zeitintervalle

Die Wahl der Zeitintervalle bei der Aufzeichnung der Messdaten Temperatur [°C] und Fluidumwälzmenge [m³] trägt ganz entscheidend zur Güte der Messung bei. Zum Erreichen bestimmter räumlichen Diskretisierung bei der Längenbestimmung können die benötigten Zeitintervalle bereits vorab der Messung errechnet werden, zum Beispiel zum Erreichen einer Messgenauigkeit von ± 1 m bei einem Durchfluss von ca. 2 m³/h sollte das Messintervall bei 40er-Erdwärmesonden ca. 6 s, bei 32er-Erdwärmesonden ca. 4 s betragen. Generell sollte eine zeitliche Diskretisierung der Messung von 10 s oder weniger gewählt werden.

3.3.3 Messungengenauigkeit durch ggf. ungleich durchflossene Stränge bei Doppel-U-Sonden

Bei Messungen an Doppel-U-Sonden kann es vorkommen, dass die zwei Einzelstränge aufgrund von z. B. Quetschungen ungleich durchflossen werden. Daher ist zu empfehlen, die Messung lediglich an einem U-Strang der Erdwärmesonde durchzuführen. Dies kann bei Doppel-U-Sonden natürlich nicht im Rahmen der eigentlichen Durchführung des Geothermal Response Tests geschehen, da zur Bestimmung des tatsächlichen Bohrlochwiderstandes R_b der Erdwärmesonde beide Einzelstränge an das Testgerät angeschlossen sein müssen. Da eine Thermoimpulsmessung vor dem Geothermal Response Test diesen stören würde, kann die Messung erst nach Testabschluss durchgeführt werden. Bei bestehenden Anlagen kann eine Messung in einzelnen Strängen nur durchgeführt werden, falls diese einzeln bis zum Verteiler oder einer zugänglichen Stelle geführt wurden und einzeln absperrbar sind.

3.3.4 Messungengenauigkeit durch Beeinflussung der thermischen Signalstärke

Eine zu niedrig angelegte thermische Leistung oder signifikante, strömungsabhängige Wärmeübertragungsprozesse können zum Verlust der Messgenauigkeit führen oder die Messung unbrauchbar machen. Der Wärmeübergang im Fluid selbst sowie zwischen Fluid und dem begrenzenden Festkörper (Erdwärmesonde) ist maßgeblich von der Strömungsart abhängig. Um Störeinflüsse zu minimieren, sollte die Thermoimpulsmessung bei voll turbulenten Strömungsverhältnissen durchgeführt werden.

3.3.5 Falsche Bemessung der Zulaufleitungen und der darin befindlichen Fluidmenge

Wie beim Geothermal Response Test empfiehlt es sich, die Messfühler zur Temperaturmessung direkt am Ein- oder Austrittspunkt des Fluids in die bzw. aus der Erdwärmesonde zu positionieren. Wird die Messung dagegen am Verteiler einer bestehenden Anlage durchgeführt, muss die Länge und der Durchmesser der Zulaufleitungen bei der Berechnung berücksichtigt werden. Ist nur ein einziger Temperaturmesspunkt vorhanden, muss das Volumen des gesamten Flüssigkeitskreislaufes einbezogen werden.

4. Fazit

Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus vielen hundert Testauswertungen in den vergangenen 10 Jahren zeigen, dass unter günstigen Bedingungen mit den Messergebnissen eines Geothermal-Response-Tests und insbesondere in Kombination mit der Aufnahme von Tiefen-Temperatur-Profilen vor und nach der eigentlichen Testausführung eine ganze Reihe weiterer Erkenntnisse über den Untergrund und die getestete Erdwärmesonde selbst gewonnen werden können. Neben der reinen Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds wurde der GeRT inzwischen auch für andere Fragestellungen erfolgreich angewendet.

Bei unklarer Sondentiefe kann mit dem Thermoimpuls-Verfahren mit vergleichsweise einfachen Mitteln die Sondentiefe reproduzierbar und hinreichend genau bestimmt werden, auch wenn andere Methoden (z.B. Lotung) aufgrund der Gegebenheiten nicht eingesetzt werden können.

Der Test kann insbesondere bei Beweisverfahren eingesetzt werden und stellt bei existierenden Anlagen eine vergleichsweise unaufwändige und kostengünstige Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Sondentiefe dar.

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 & Dipl.-Geol. M. Sauer GbR, Reinbergstraße 2, 35580 Wetzlar
M.Sauer@UBeG.de