

*Schlussbericht Oktober 2002*

# **Angewandte Forschung: Workshop zur Qualitätssicherung von „geothermischen Response Tests“**

ausgearbeitet durch

Dr. Walter J. Eugster  
Polydynamics Engineering Zürich  
Malojaweg 19, 8048 Zürich  
[wje@polydynamics.ch](mailto:wje@polydynamics.ch)  
[www.polydynamics.ch](http://www.polydynamics.ch)

## Zusammenfassung

Am 24. September 2002 hat in Zürich ein weiterer Workshop zum Thema Qualitätssicherung von geothermischen Response Tests stattgefunden. Er knüpft an die Erkenntnisse des Workshops an der ETH Lausanne vom Oktober 2001 (EUGSTER & LALOUI, 2001) an und setzt die ursprünglich in Mol (NL) im Herbst 2000 (SANNER, 2001) begonnenen Diskussionen über Minimalanforderungen an diese Tests fort.

In seiner einfachsten Form wird der Test an einer fertig installierten Erdwärmesonde durch Anbringen einer genau definierten thermischen Last und durch Messen der Temperaturentwicklung beim Austritt aus der Erdwärmesonde durchgeführt. Die thermische Last kann durch Messung der Temperaturdifferenz und des Durchflusses bestimmt werden. Dabei werden jedoch hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt.

Die Auswertung des Tests kann unter gewissen Voraussetzungen über die Linienquellen-Theorie erfolgen oder über Parametervariation mit Hilfe von numerischen Modellen.

## Résumé

Le 24 septembre 2002 un workshop sur l'assurance de qualité des tests de réponse géothermique a été effectué à Zurich. Ce workshop a poursuit les discussions du workshop de Lausanne en octobre 2001 (EUGSTER & LALOUI, 2001) et de Mol (Pays-Bas; SANNER, 2001) en 2000 sur des demandes minimales aux tels tests.

Un test de réponse est effectué en appliquant une charge thermique bien définie à une sonde géothermique et en mesurant le développement de la température de sortie de la sonde. La charge thermique peut être déterminée par le débit et la différence en température en exigeant une grande précision des mesures.

L'analyse des tests est faite dans certaines circonstances à l'aide de la méthode de la source de ligne où à l'aide d'un modèle numérique.

## Summary

A workshop on the quality control of thermal response tests took place on 24 September 2002 in Zurich to refine the discussions and results of the workshops at Lausanne in October 2001 (EUGSTER & LALOUI, 2001) and at Mol (The Netherlands) in 2000 (SANNER, 2001).

The simplest way to perform a response test is to apply a well defined thermal load to a borehole heat exchanger and to record the temperature time history of the outlet temperatures. The thermal load may be defined by measuring the flow rate and the temperature difference. This implies a high accuracy of the flow and the temperature sensors.

The test analysis may be done under certain circumstances using the line-source method or using numerical models.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
Résumé .....	1
Summary .....	1
1. Einleitung.....	3
1.1. Ausgangslage.....	3
1.2. Ziel des Projektes.....	3
1.3. Vorgehen.....	3
1.4. Teilnehmer .....	4
2. Richtlinien für geothermische Response Tests .....	5
2.1. Definition des geothermischen Response Tests .....	5
2.2. Messausrüstung.....	6
2.3. Testaufbau am Standort.....	7
2.4. Testdurchführung .....	7
2.5. Testauswertung.....	8
2.6. Besonderheiten .....	9
2.7. Schlussbemerkungen.....	10
2.8. Literaturverzeichnis .....	11
3. Schlussbemerkungen und Ausblick.....	12

## 1. Einleitung

### 1.1. Ausgangslage

Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrunds eine wesentliche Voraussetzung. Während bei kleinen Anlagen diese Werte meist geschätzt werden oder die Auslegung nach Erfahrungswerten vorgenommen wird, sind für grössere Anlagen Untergrunduntersuchungen bis hin zu Probebohrung(en) erforderlich. Über solche Probebohrungen lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds z.B. durch einen thermischen Response Test (an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde) bestimmen. Vorteile sind die Messung über die gesamte Bohrlochlänge, der Einbezug der Hinterfüllung und der natürlichen Untergrundverhältnisse einschliesslich evtl. vorhandener Grundwasserflüsse.

Mit einem geothermischen Response Test wird eine Temperatur-Zeit-Kurve gemessen, die mit verschiedenen Methoden ausgewertet werden kann. Als Ergebnis resultiert ein Parameter, welcher ein Mass für das gesamte Wärmetransportvermögen des Untergrundes ist und in Form einer Wärmeleitfähigkeit dargestellt wird. Darin sind jedoch auch Anteile evtl. vorhandenen konvektiven Wärmetransports und andere Störsignale enthalten, so dass hier korrekt von einer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit gesprochen werden sollte.

Mit dem geothermischen Response Test steht ein Instrument zur Verfügung, das bereits bei mittelgrossen Erdwärmesondenanlagen eine Optimierung und Absicherung der Auslegung durch direkt vor Ort ausgeführte Messungen ermöglicht.

Am 25. & 26. Oktober 2001 wurde an der ETH Lausanne ein Workshop über geothermische Response Tests durchgeführt. Ziel der von 27 Personen besuchten Veranstaltung war die Verbreitung der geothermischen Response Tests als Qualitätssicherungsinstrument für grösseren Erdwärmesondenanlagen.

In der Zwischenzeit wurden denn auch bereits geothermische Response Tests in der Schweiz durchgeführt (St. Gallen und Aarau).

### 1.2. Ziel des Projektes

Ziel des Projektes ist es, im Rahmen eines halbtägigen Workshops mit europäischen Experten auftretende Probleme bei geothermischen Response Tests, minimale Anforderungen an die Testdurchführung und –auswertung zu diskutieren und so die Qualitätssicherung der Response Tests selbst weiterzuführen. Fernziel ist eine Homogenisierung von Testverfahren und Auswertung innerhalb von Europa.

### 1.3. Vorgehen

Der Workshop hat am 24. September 2002 in Zürich stattgefunden. Das Hauptthema der Diskussion war die Qualitätskontrolle von geothermischen Response Tests:

- Welches ist die minimale Testanordnung und -ausrüstung
- Art und Qualität der Messung
- Wie können falsche bzw. verfälschte Messresultate vermieden werden
- Testauswertung

Die Hauptresultate aus diesem Workshop sind in geschlossener Form in Kapitel 2 dieses Schlussberichtes („Richtlinien für geothermische Response Tests“) dargestellt. Dieser Text ist ebenfalls in den Beitrag „Stand der Entwicklung und Anwendung des Thermal-Response-Test“ (Autoren: Eugster, Sanner und Mands) der 7. Geothermischen Fachtagung in Waren (Müritz) eingeflossen. Darüber hinausgehende Erkenntnisse sind im Kapitel 3 „Ergänzende Bemerkungen, Ausblick“ zusammengefasst.

## 1.4. Teilnehmer

Folgende Personen haben neben dem Autor am Workshop teilgenommen:

- Dr. Burkhard Sanner: Institut für angewandte Geowissenschaften, Universität Giessen, D-35390 Giessen; und: UBeG GbR, D-35580 Wetzlar.
- Dipl.-Phys. Manfred Reuss: Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), D-85748 Garching.
- Prof. Dr. Arturo J. Busso: Applied Physics, Universidad Nacional del Nordeste, AR-3400 Corrientes, Argentina; z.Zt. ZAE Bayern.
- Dr. Henk J.L. Witte: Groenholland b.v., NL-1059 CD Amsterdam.
- Dipl.-Ing. Wulf Brandt: Aetna Energiesysteme GmbH, D-15745 Wildau

Kurzfristig abgesagt haben ihre Teilnahme:

- Dr. Lyesse Laloui: EPFL, CH-1015 Lausanne.
- Dr. Harald L. Gorhan, Programmleiter Geothermie: Electrowatt-Ekono AG, CH-8037 Zürich.

## 2. Richtlinien für geothermische Response Tests

Richtlinien für die Durchführung von geothermische Response Tests wurden bereits im Herbst 2000 beim Workshop in Mol (NL) diskutiert (SANNER, 2001) und sind seither ein Thema der Arbeitsgruppe des Annex 13 „wells and boreholes“ des Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage der Internationalen Energie Agentur (IEA). Daneben ist die Harmonisierung des Testverfahrens innerhalb Holland, Deutschland und der Schweiz sowie die Qualitätssicherung der Tests eines der Hauptthemen während eines Workshops in Lausanne (Schweiz) vom 25./26. Oktober 2001 (EUGSTER & LALOU, 2001) und eines Expertentreffens vom 24. September 2002 in Zürich gewesen. Die nachstehenden Ausführungen sind eine Synthese dieser Grundlagen.

### 2.1. Definition des geothermischen Response Tests

Beim geothermischen Response Test wird eine genau definierte thermische Last an eine Erdwärmesonde oder einen Energiepfahl angelegt und die Entwicklung der Ein- und Austrittstemperatur direkt an der Erdwärmesonde oder am Energiepfahl kontinuierlich gemessen. Diese Temperaturantwort (Thermal Response) erlaubt die Extrapolation des thermischen Verhaltens des Untergrundes in die Zukunft. Der Test wird in der Regel mit Hilfe einer transportablen Messausrüstung durchgeführt, welche direkt zum Bohrloch bzw. zum Energiepfahl gebracht werden kann (Bild 1).

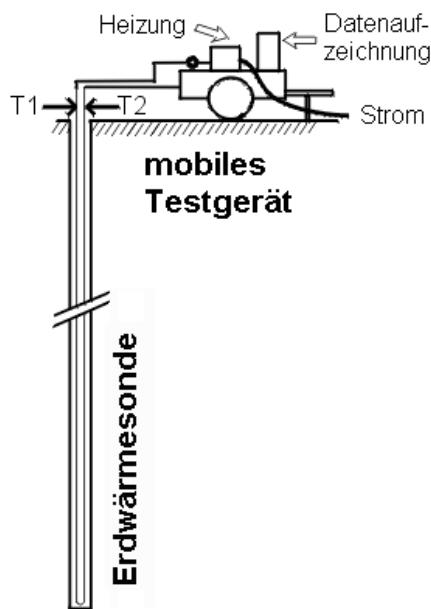


Bild 1: Schema eines mobilen Aufbaus für den geothermischen Response Test (Zeichnung UBeG)

Ein mögliches Konzept für die Testauswertung ist die Annahme, dass der Untergrund ein rein konduktives Medium ist und dass somit die scheinbare mittlere Wärmeleitfähigkeit und andere thermische Parameter des Untergrundes bestimmt werden können.

Die minimale Anforderungen an einen geothermischen Response Test sind:

- die thermische Last muss so konstant wie möglich sein
- der Verlauf der Ein- und Austrittstemperatur der Erdwärmesonde muss kontinuierlich aufgezeichnet werden.

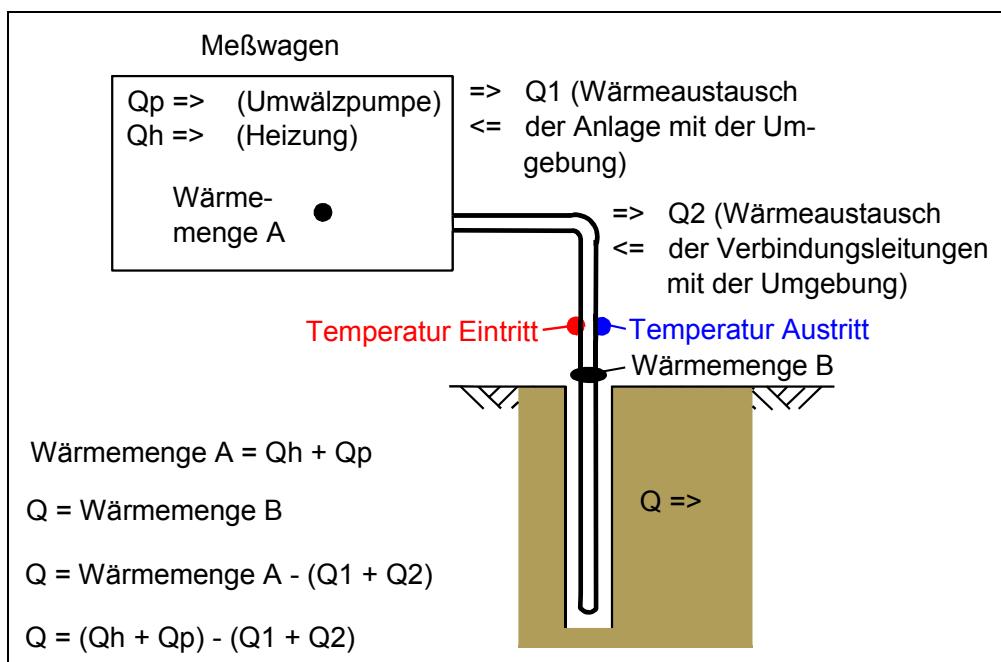
- Minimale Zeitdauer des Tests: 48 – 72 Stunden.
- Testauswertung nach den Anforderungen in Abschnitt 2.5.

## 2.2. Messausrüstung

Die Messausrüstung muss in der Lage sein, eine konstante Heiz- oder Kühllast zu liefern. Unter gewissen Umständen kann auch eine Kühllast erforderlich sein. Dies vor allem in Situationen, wenn Gefriereffekte untersucht werden sollen und wenn im Untergrund starke Grundwasser-Konvektionseffekte auftreten können.

Die Heiz- oder Kältequelle muss über mehrere thermische Laststufen verfügen. Eine Zirkulationspumpe ist erforderlich. Die Durchflussrate muss regelbar sein. Es müssen minimale Sicherheitsarmaturen eingebaut sein, z.B. als Schutz gegen Überhitzung und Lecks etc.

Die effektiv angelegte Leistung  $Q$  muss gemäss Bild 2 bestimmt werden. Als Verfahren wird die Messung der Temperaturdifferenz in Punkt B und der Durchflussrate empfohlen. Als Genauigkeit wird bei der Temperaturmessung  $\pm 0.05$  K und bei der Durchflussmessung  $\pm 2\%$  verlangt.



*Bild 2: Aufbau des geothermischen Response Tests mit Wärmeeinleitung in den Untergrund. Die Lage der Temperaturmessstellen sowie die Lage der Bestimmung der eingeleiteten Wärmemenge (am Punkt A oder B) ist festgehalten.*

Die Temperaturmessung muss direkt am Punkt B durchgeführt werden. Das Zeitintervall zwischen 2 Messungen soll maximal 5 Minuten betragen. Falls die Testauswertung mit Hilfe der Parametervariation durchgeführt werden soll, ist es empfehlenswert, das Messintervall während der ersten Stunden zu verkleinern. Um den Einfluss von  $Q_1$  und  $Q_2$  zu minimieren und somit Lastschwankungen zu vermeiden, muss die Zuleitung und die Messausrüstung wärmedämmt sein.

Es ist zudem empfehlenswert, die Außentemperatur sowie die Lufttemperatur im Messcontainer aufzuzeichnen. Dies kann bei schwierig zu interpretierenden Messdaten aufschlussreich

sein. Ebenso kann es hilfreich sein, die Temperatur direkt in den Erdwärmesondenrohren zu messen.

Die aktuellen Messdaten sollten über ein Datenfernübertragungssystem jederzeit kontrolliert werden können.

### 2.3. Testaufbau am Standort

Am Teststandort muss die Mess- und Testausrüstung dicht an die Erdwärmesonde angegeschlossen werden. Die Verbindungsschläuche müssen wärmegedämmt sein. Die Verbindung zwischen Testausrüstung und Bohrloch soll so kurz wie möglich sein. Die Erdwärmesonde und das Messsystem müssen mit Wärmeträgerflüssigkeit gefüllt werden. Im Heizfall ist dies Wasser. Falls ein Gefrieren im Flüssigkeitskreislauf möglich ist, muss eine Frostschutz-Wassergemisch mit genau bekanntem Mischverhältnis und genau bekannten thermischen Eigenschaften verwendet werden. Der Flüssigkeitskreislauf muss sorgfältig entlüftet werden. Deshalb sollten Entlüftungsventile in der Messausrüstung bereits integriert sein.

### 2.4. Testdurchführung

Sobald die Zirkulation startet, muss auch die Datenaufzeichnung in Betrieb sein.

Zwei Varianten sind möglich, um die mittlere Anfangstemperatur im Untergrund zu bestimmen:

- Messung des Temperaturprofils innerhalb der Erdwärmesonde ohne Zirkulation - oder im Fall eines offenen mit Grundwasser gefüllten Bohrloches, Messung des Temperaturprofils im Ringraum ausserhalb der EWS.
- Messung der Ein- und Austrittstemperaturen während der ersten 10 – 20 Minuten Zirkulation ohne Heizen/Kühlen mit hoher zeitlicher Auflösung (< 10 Sekunden Messintervall). Das Vorbeiströmen der Wassersäule an den Temperaturfühlern erzeugt ein Bild des Temperaturprofils im Bohrloch.

Nach diesen Vorbereitungsmessungen wird die Heiz- bzw. Kühllast dazugeschaltet. Die thermische Last soll so gewählt werden, dass die Differenz zwischen mittlerer Formationstemperatur und Fluidtemperatur möglichst nahe an die im effektiven Betrieb herrschenden Verhältnisse kommt. Die erwarteten Temperaturänderungen können mit einer angenommenen Wärmeleitfähigkeit abgeschätzt werden. Typische Lastwerte für schlecht leitende Gesteine liegen bei 30 W/m und für sehr gut leitende Gesteine bei 80 W/m.

Als Regel soll die angelegte Last im Heizbetrieb 50 W/m nicht ohne triftigen Grund überschreiten. Die Temperaturänderung gegenüber der ungestörten mittleren Formationstemperatur soll 20 K nicht überschreiten. Als typische Temperaturdifferenz über die Erdwärmesonde ist ein Wert von 3 – 5 K anzustreben.

Bei zu hohen thermischen Lasten mit entsprechend hohen Temperaturdifferenzen zwischen Formations- und Fluidtemperatur ist bei wassergesättigten Böden die Möglichkeit gegeben, dass die errechnete scheinbare Wärmeleitfähigkeit wegen allenfalls auftretender induzierter Konvektionsbewegungen zu hoch ist für einen normalen Betrieb.

Die Durchflussrate muss so gewählt werden, dass in den EWS-Rohren während des gesamten Tests ein turbulentes Strömungsregime herrscht. Ideal sind Reynolds-Zahlen um 3'000.

Die Minimaldauer des Tests muss mindestens 48 – 72 Stunden betragen.

## 2.5. Testauswertung

Ziel der Auswertung ist die Bestimmung der für den Betrieb von erdgekoppelten Wärmepumpen relevanten thermischen Parameter des Untergrundes. Die geforderte Genauigkeit der ermittelten Wärmeleitfähigkeit muss zwischen 5 % und 10 % liegen bei Berücksichtigung sämtlicher Fehlerquellen im gesamten Messsystem.

Zur Testauswertung stehen prinzipiell zwei Methoden zur Verfügung:

- die Linienquellen-Approximation
- die Parametervariation mit Hilfe von numerischen Modellen

Beide Methoden gehen von reiner Wärmeleitung im Untergrund aus. Dies obwohl durchaus andere Wärmetransportprozesse im Untergrund stattfinden können wie zum Beispiel konvektiver Wärmetransport durch Grundwasserströmungen. Deshalb wird als Testresultat von einer „mittleren scheinbaren Wärmeleitfähigkeit“ oder von einer „effektiven Wärmeleitfähigkeit“ des Untergrundes gesprochen. Diese Wärmeleitfähigkeit beinhaltet die Effekte aus konvektiven Wärmetransport oder aus anderen lokalen Besonderheiten.

Beide Methoden sind generell gleichwertig, solange eine stabile thermische Last während des Tests gesichert ist.

### Linienquellen-Approximation:

Als Basis dient hier die Kelvin'sche Linienquellentheorie, die bereits vor mehreren Jahrzehnten zur Bestimmung der Temperaturentwicklung im Erdreich bei erdgekoppelten Wärmepumpen verwendet wurde (z.B. INGERSOLL & PLASS, 1948). Weitere Arbeiten im Hinblick auf geothermische Response Tests stammen z.B. von HELLSTRÖM, 1991; EKLÖF & GEHLIN, 1996; SANNER ET AL., 1999; MÜLLER ET. AL., 2001.

Um die Linienquellen-Approximation anwenden zu können, muss die gemessene Temperaturkurve nach einem gewissen Startintervall  $t_0$  eine konstante Steigung gegenüber der logarithmischen Zeit aufweisen. Dieses Startintervall ist abhängig vom Bohrlochradius  $r_b$  und von der Temperaturleitfähigkeit  $a$  des Untergrundes:  $t_0 > 5r_b^2/a$ . Die scheinbare Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  kann dann nach folgender Gleichung [1] ermittelt werden.

$$\lambda = \frac{\dot{q}}{4 \pi k} = \frac{\dot{Q}}{4 \pi H k} \quad [1]$$

$\dot{q}$  = spezifischer Wärmestrom [W/m]

$k$  = Steigung der Temperaturkurve

$\dot{Q}$  = Gesamtwärmestrom [W]

$H$  = Länge (Tiefe) d. Wärmetauschersonde [m]

Der Bohrlochwiderstand  $R_b$  als pauschaler, hauptsächlich durch das Rohrmaterial und die Hinterfüllung bestimmter Wärmeübergangswert zwischen der Innenwand der Erdwärmesondenrohre und der Formation kann aus [2] berechnet werden.

$$R_b = \frac{H}{\dot{Q}} (T_f - T) - \frac{1}{4 \pi \lambda} \left[ \ln \frac{4 a t}{r_b^2} - \gamma \right] \quad [2]$$

$a$  = Temperaturleitfähigkeit Erdreich ( $a = \lambda/c$ ) [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$c$  = volumenbezogene Wärmekapazität =  $\rho c_p$  [ $\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$ ]

$t$  = Zeit [s]

$T$  = Anfangstemperatur des Fluids/Erdreichs zur Zeit  $t=0$  [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_f$  = Fluidtemperatur zum gewählten Zeitpunkt  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ]

$$r_b = \text{Bohrlochradius [m]}$$
$$\gamma = \text{Euler'sche Konstante (0,57722)}$$

Der Vorteil der Linienquellen-Approximation ist, dass zur Bestimmung der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit nur während des Tests gemessene Größen verwendet werden müssen. Annahmen über nicht gemessene Untergrundeigenschaften sind lediglich bei der Bestimmung des Startintervalls notwendig. Nicht geeignet ist dieses Verfahren bei schwankender thermischer Last bzw. bei stärkerem konvektiven Anteil (Grundwasserfluss).

#### Parametervariation:

Hier wird ein numerisches Modell einer Erdwärmesonde verwendet. Die Eingabewerte werden solange variiert bis die theoretischen Temperaturwerte den gemessenen Werten entsprechen. Die einfachste Art ist die Verwendung eines rein konduktiven Modells.

Ein Vorteil der Parametervariation ist, dass zeitlich veränderliche Einflüsse erfasst werden können (z.B. schwankende thermische Last, Einfluss Globalstrahlung bei extremen Testbedingungen etc.). Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode sind gerade die vielen zusätzlichen Parameter, welche im Modell berücksichtigt werden können, welche aber nicht gemessen werden. Es ist also insbesondere darauf zu achten, dass durch frei wählbare implizit oder explizit formulierte Randbedingungen (z.B. Anfangstemperatur, Wärmeflussregime etc.) und Modellparameter (z.B. volumetrische Wärmekapazität der Formation etc.) nicht die Genauigkeit der resultierenden scheinbaren Wärmeleitfähigkeit reduziert wird.

## 2.6. Besonderheiten

Unter bestimmten Bedingungen lassen sich keine verwertbaren Ergebnisse erhalten. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn während der Versuchsdurchführung die thermische Last stetig nach einer Seite abweicht (steigt oder abnimmt). Während Schwankungen der Leistung durch entsprechend lange Versuchsdauer ausgeglichen werden können, ist in einem solchen Fall das erhaltene Ergebnis nicht korrekt.

Andere Fehlerquellen sind:

- Thermisch induzierte Konvektion in offenen Bohrlöchern oder durchlässigen Schichten
- Eindringendes Regenwasser (Oberflächenabdichtung erforderlich!)
- Starker Grundwasserfluss
- Aufdringen gespannter/arterischer Grundwässer in schlecht verfülltem Bohrlochringraum

Bei Verdacht auf zu starken Grundwasserfluss kann man eine stufenweise Auswertung durchführen. Dabei wird von einem Ausgangszeitpunkt aus ein jeweils länger werdender Zeitraum betrachtet und für die entsprechende Temperaturkurve die scheinbare Wärmeleitfähigkeit berechnet (z.B. 10-15 h, 10-20 h, 10-25 h usw.). Bei rein konduktiven Bedingungen werden selbst bei schwankenden thermischen Lasten die Werte nach einiger Zeit konvergieren, bei starkem Grundwasserfluss steigt die scheinbare Wärmeleitfähigkeit jedoch mit länger werdendem Kurvenabschnitt stetig weiter an, und es kann kein Konvergenzwert festgestellt werden.

Besonders auffällig können Temperaturkurven aus Bohrungen sein, in denen Grundwasser parallel zur Erdwärmesonde strömt (z.B. artesische Verhältnisse). Solche Bohrungen sind aus wasserwirtschaftlicher Sicht natürlich unerwünscht. Bild 3 zeigt ein Beispiel: Die Temperaturkurve knickt nach einem kurzen, schnellen Anstieg auf eine horizontale Linie ein, d.h. die gesamte eingespeiste Wärmemenge wird abgeführt. Nach Erhöhung der Einspeiseleistung wiederholt sich das Bild.

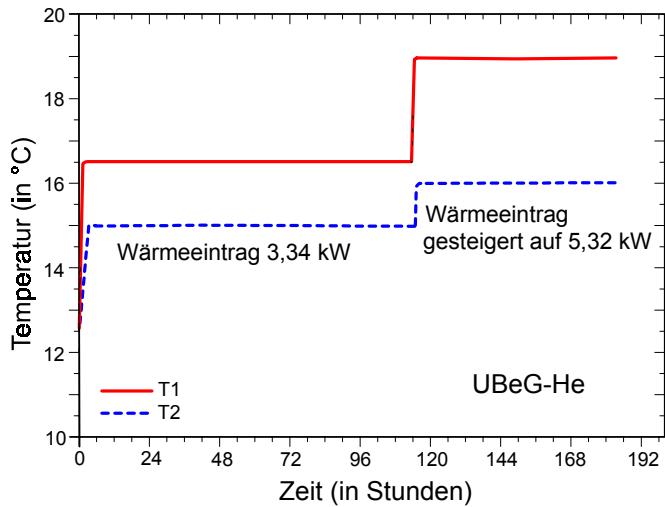


Bild 3: Temperaturkurven der Eintritts- (T1) und Austrittstemperaturen (T2) für einen Response Tests an einer nur mit Kies verfüllten Erdwärmesonde mit im Ringraum aufsteigenden Grundwasser

## 2.7. Schlussbemerkungen

Das angewendete Strömungsregime während des geothermischen Response Tests ist äusserst wichtig. Falls der spätere Betrieb mit laminarer Strömung stattfinden soll, muss auch der TRT mit laminarer Strömung durchgeführt werden. Die Strömung hat einen starken Einfluss auf den Bohrlochwiderstand. Falls der im Test bestimmt Bohrlochwiderstand für die definitive Auslegung einer EWS-Anlage verwendet werden will, muss die Durchflussrate, die Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Formation etc. gut mit den späteren Betriebsbedingungen übereinstimmen.

Das mathematisch-physikalische Konzept der Testauswertung muss mit jenem der Anlage-Auslegung identisch sein. Es ist unzulässig, Parameter, welche mit Hilfe der Linienquellenmethode bestimmt worden sind, in Auslegungsprogrammen zu verwenden, welche auf numerischen Modellen aufgebaut sind.

Bei der Testvorbereitung ist immer darauf zu achten, worin letztlich das Ziel des Tests besteht, d.h. wozu schliesslich die mit dem Test ermittelte Wärmeleitfähigkeit dient:

- als Auslegungshilfe für normale EWS-Anlagen: hier gelten die oben erwähnten Regeln uneingeschränkt
- zur Kartierung der regionalen Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes auf Grund von willkürlich ausgewählten Bohrungen: hier müssen höhere Ansprüche an die Testausrüstung, -durchführung und –auswertung erfüllt werden
- zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes für Speichervorhaben: hier müssen die Randbedingungen des Tests möglichst genau an die später gesuchten Betriebsbedingungen angepasst werden. Dies gilt insbesondere für die Fluidtemperaturen in der Erdwärmesonde

## 2.8. Literaturverzeichnis

- EKLÖF, C. & GEHLIN, S. (1996): TED - a mobile equipment for thermal response test. - 62 p., Master's thesis 1996:198E, Luleå University of Technology
- EUGSTER, W.J. & LALOUI, L. eds. (2001): Proc. Geothermische Response Tests, 25./26.10.2001, EPFL Lausanne. ISBN 3-932570-43-X. Geothermische Vereinigung e.V., Geeste.
- HELLSTRÖM, G. (1991): Ground Heat Storage, Thermal Analysis of Duct Storage Systems, I. Theory. - 262 S., Dept. Mathematical Physics, University of Lund, Lund.
- INGERSOLL, L.R. & PLASS, H.J. (1948): Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. - Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, S. 119-122, Chicago
- MÜLLER, J., REUSS, M. & SANNER, B. (2001): Thermal Response Test – eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. – Proc. Fachseminar oberflächennahe Geothermie, 21./22.02.2001 Freising, Landtechnik Freienstephan, TU München. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg.
- SANNER, B., REUSS, M. & MANDS, E. (1999): Thermal Response Test - eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. - Geothermische Energie 24/25, Geeste
- SANNER, B. (2001): Entwicklung und Stand des mobilen Thermal Response Test. – in: EUGSTER, W.J., LALOUI, L. eds., Proc. Geothermische Response Tests, EPFL Lausanne. ISBN 3-932570-43-X. Geothermische Vereinigung e.V., Geeste.

### 3. Ergänzende Bemerkungen, Ausblick

Der geothermische Response-Test ist grundsätzlich ein sehr einfaches Instrument, die wichtigste thermische Eigenschaft des Untergrundes für den Betrieb einer Erdwärmesonde, die scheinbare Wärmeleitfähigkeit, zu bestimmen. Hierzu ist lediglich die angelegte thermische Leistung sowie die resultierende Temperaturrentwicklung aus der Erdwärmesonde über einen gewissen Zeitbereich zu messen. Aus diesem Grund sind auch die geforderten Messgenauigkeiten für den Durchfluss und die Temperatur relativ hoch. Deshalb wird auch empfohlen, die Temperaturen direkt im Fluid und nicht über Tauchhülsen zu messen.

Da dieser Test nicht im Labor stattfindet, sondern unter rauen Witterungs- und selten idealen Baustellenbedingungen, ist die Qualitätssicherung der Messanordnung und Messdurchführung von grösster Wichtigkeit.

Insbesondere ist deshalb dem Schutz der Messeinrichtung vor äusseren Einflüssen höchste Priorität zuzuordnen:

- Sicherstellung einer konstanten Stromversorgung für das Heizelement
- Sicherstellen eines konstanten Durchflusses
- Überdurchschnittlich gute Wärmedämmung der Verbindungsleitungen
- Strahlungsschutz für die Messgeräte
- bei durchlässigen Schotterböden: Verhindern, dass Regenwasser in den Untergrund eindringen kann
- Testdurchführung erst nach einem allfälligen Aushärten der Hinterfüllung

Während des Workshops wurden erste Gespräche hinsichtlich eines „Gütesiegels“ für geothermische Response Tests aufgenommen. In diesem Gütesiegel sollen nicht nur Minimalanforderungen an die Testausrüstung und Testdurchführung verbrieft werden, sondern auch Standards für die Auswertung und Berichterstattung gesetzt werden.