

# Erfahrungen mit dem Thermal Response Test in Deutschland

von Burkhard Sanner<sup>1</sup>, Manfred Reuß<sup>2</sup>, Erich Mands<sup>3</sup> und Jens Müller<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Geowissenschaften der Justus-Liebig-Universität, Diezstraße 15, D-35390 Gießen

<sup>2</sup> Landtechnik Weihenstephan, TU München, Vöttinger Str. 36, D-85354 Freising

<sup>3</sup> UBeG GbR, Industriestraße 3, D-35580 Wetzlar

## Einleitung

Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrunds eine wesentliche Voraussetzung. Während bei kleinen Anlagen die Werte meist geschätzt werden und bei der Auslegung entsprechend Sicherheiten berücksichtigt werden müssen, oder die Auslegung gleich nach Erfahrungswerten vorgenommen wird, sind für größere Anlagen Untergrunduntersuchungen bis hin zu Probebohrung(en) erforderlich. Über solche Probebohrungen läßt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds durch zwei Verfahren bestimmen:

- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an möglichst ungestörten Proben (z.B. Bohrkerne); dabei sind alle wesentlichen lithologischen Einheiten des Bohrprofils zu beproben und vor allem auch der natürliche Wassergehalt der Proben zu erhalten.
- Bestimmung durch einen thermischen Response-Test (an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde); Vorteile sind hier die Messung über die gesamte Bohrlochlänge, die Einbeziehung der Bohrlochverfüllung, und die ungestörten Untergrundverhältnisse einschließlich evtl. vorhandenen Grundwasserflusses.

Wegen des erheblichen Aufwandes der erstgenannten Methode sind bislang standortspezifische Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen für die Erdwärmesondenauslegung so gut wie nie durchgeführt worden. Mit dem Thermal Response Test steht nunmehr ein Instrument zur Verfügung, daß bereits bei mittelgroßen Erdwärmesondenanlagen eine Optimierung und Absicherung der Auslegung durch direkt vor Ort ausgeführte Messungen ermöglicht.

Die theoretischen Grundlagen für den Thermal Response Test wurden über mehrere Jahrzehnte hinweg geschaffen (u.a. durch CHOUDARY, 1976; MOGENSEN, 1983; CLAEISSON et al., 1985; CLAEISSON & ESKILSON, 1988; HELLSTRÖM, 1991), bevor es Mitte der 90er Jahre zu ersten praktischen Umsetzungen kam. Diese erfolgte mit stationären Tests z.B. bei der Untersuchung eines Erdwärmesonden-Wärmespeichers in Linköping (HELLSTRÖM, 1997), und 1995 an der TU Luleå in Schweden mit dem Bau eines mobilen Meßgeräts zur direkten thermischen Leistungsmessung an einer Erdwärmesonde (EKLÖF & GEHLIN, 1996; GEHLIN & NORDELL, 1997).

Seit Mitte 1996 wurde eine ähnliche Entwicklung an der Oklahoma State University in den USA betrieben (AUSTIN, 1998). Ein etwas anders aufgebautes Gerät wurde in den Niederlanden entwickelt und getestet (VAN GELDER et al., 1999); es nutzt statt der elektrischen Widerstandsheizungen der vorgenannten Anlagen eine Wärmepumpe, um die Temperatur in der Erdwärmesonde absenken zu können. Dieses Verfahren bringt jedoch durch das dynamische Verhalten der Wärmepumpe gewisse Probleme mit sich.

Nach Kenntnis der Autoren existieren (neben den vorgenannten) schon Geräte in Großbritannien, Kanada, Norwegen, der Schweiz und der Türkei; weitere sind in der Entwicklung. In Deutschland stehen mindestens drei mobile Geräte für den Thermal Response Test im Einsatz (Landtechnik

Weihenstephan der TU München, Aetna Energiesysteme GmbH in Wildau und UBeG GbR in Wetzlar).

## Versuchsdurchführung

Der Thermal Response Test (Schema s. Abb. 1) ist ein geeignetes Mittel zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds und des thermischen Bohrlochwiderstands (bzw. der Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochverfüllung). Dabei muß aber auf eine sorgfältige Durchführung und korrekte Auswertung der Messungen geachtet werden.

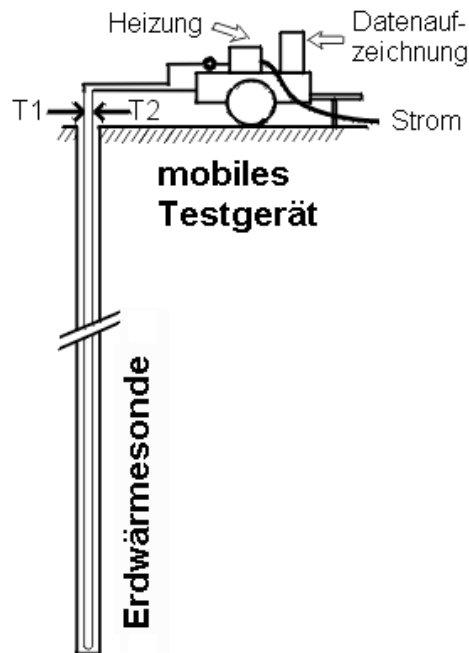


Abb. 1: Schema eines mobilen Aufbaus für den Thermal Response Test (Zeichnung UBeG)

Neben ausreichender Genauigkeit bei der Messung von Temperaturen und Wärmeleistung ist vor allem die Versuchsdauer wichtig. Sie sollte in keinem Fall weniger als zwei Tage betragen; Tabelle 1 zeigt die Meßdauer für eine Auswahl von Versuchen in Deutschland. In den USA, wo die Methode verstärkt kommerziell angewendet wird, besteht der Wunsch, die Meßzeiten deutlich zu kürzen, um Kosten einsparen zu können. Zwar besteht die Empfehlung einer Mindestmeßzeit von 50 Stunden (SKOUBY, 1998; SPITLER et al., 1999a), die allerdings auch angezweifelt wird (SMITH, 1999); man wünscht Versuchszeiten von weniger als 12 Stunden (u.a. um das Testgerät nicht über Nacht an der Baustelle belassen zu müssen).

Grundsätzlich gibt es für eine Verkürzung des Meßzeitraums physikalische Grenzen, da sich ein ausreichend stabiler Wärmefluß auch in der Umgebung des Bohrloches einstellen muß. In den ersten Stunden wird der Temperaturverlauf noch wesentlich durch die Bohrlochverfüllung bestimmt. Durch längere Meßzeiten können auch Störungen reduziert werden, wie sie z.B. durch Wärmeentwicklung beim Abbinden des Verfüllmaterials oder durch Schwankungen bei der Energieversorgung entstehen.

Kürzere Meßzeiten bedeuten immer einen Verlust an Genauigkeit, der nur teilweise durch aufwendigere Auswertemethoden (z.B. Parameterbestimmung mit numerischer Simulation, s.u.) ausgeglichen werden kann. In einer Untersuchung von SPITLER et al. (1999a) zeigten nach 50 Stunden ver-

schiedene Auswertemethoden eine Abweichung von  $\pm 5\%$  gegenüber dem Mittel aller Methoden, bei der Benutzung der Werte bis lediglich 20 Stunden waren bereits Abweichung von  $\pm 15\%$  zu verzeichnen. Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob eine aufwendigere Auswertung oder eine längere Messung im Einzelfall wirtschaftlicher ist. Wegen der physikalischen Grenzen sollte die Meßzeit aber auf jeden Fall deutlich höher liegen als die berechnete Mindestzeit.

*Tabelle 1: Versuchsdauer sowie weitere Daten einiger Thermal Response Tests in Deutschland (Geologie und Ergebnisse s. Tabelle 2) (LTW: Landtechnik Weihestephan; UBeG: UBeG GbR, Wetzlar)*

Projekt	Versuchsdauer	Untergrundtemperatur	Wärmeeinleitung	Bohrlochtiefe	Bohrlochdurchmesser
LTW-A	250 h	15,6 °C	2,65 kW	35 m	150 mm
LTW-E	244 h	ca. 13 °C	4,36 kW	99,7 m	160 mm
UBeG-B	68,6 h	11,6 °C	4,43 kW	91 m	146 mm
UBeG-D	47,3 h	11,9 °C	6,36 kW	117 m	200 mm
UBeG-G	69,3 h	12,6 °C	5,17 kW	100 m	180 mm
UBeG-L1	50,2 h	12,2 °C	4,90 kW	99 m	150 mm
UBeG-L2	94 h	11,9 °C	3,40 kW	70 m	160 mm
UBeG-M	90,5 h	11,2 °C	4,36 kW	92 m	150 mm
UBeG-W	66,3 h	12,4 °C	3,35 kW	75 m	194 mm

Generell gibt die Messung mit Beheizung der Erdwärmesonde die gleichen Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds wie bei Abkühlung. Lediglich dort, wo mächtige ungesättigte Sedimente vorliegen und daher durch Feuchtetransport bei der Erwärmung wechselnde Wärmeleitfähigkeiten entstehen können, ist eine Messung mit der im späteren Anlagenbetrieb geplanten Temperaturabsenkung sinnvoll. Auch dann, wenn der tatsächliche Wärmepumpenbetrieb durchgespielt werden soll (einschließlich der Einflüsse aus Wärmeträgemedium, evtl. Vereisung des Grundwassers etc.), ist ein Gerät wie bei VAN GELDER et al. (1999) beschrieben trotz des größeren Bau- und Betriebsaufwandes vorzuziehen.

## Versuchsauswertung

Der einfachste Weg zur Auswertung eines thermischen Response Tests beruht auf der KELVIN'schen Linienquellentheorie. Diese wurde bereits in den 40er Jahren für die Berechnung erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen verwendet, um die Temperaturentwicklung im Erdreich zeitabhängig zu erfassen (INGERSOLL & PLASS, 1948). Eine Approximation wird durch folgende Formel ermöglicht, die bei EKLÖF & GEHLIN (1996) gegeben ist:

$$k = \frac{Q}{4 \pi H \lambda_{\text{eff}}} \quad [1]$$

mit

- k Steigung des Kurvenabschnitts bei logarithmischer Zeitachse
- Q Eingespeiste bzw. entzogene Wärmeleistung (W)
- H Länge der Erdwärmesonde (m)
- $\lambda_{\text{eff}}$  Effektive Wärmeleitfähigkeit, d.h. inkl. konvektivem Wärmetransport (W/m/K)

Die effektive Wärmeleitfähigkeit ist dann:

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi H \cdot k} \quad [2]$$

Für die Auswertung nach der Linienquellentheorie ist eine ausreichende Laufzeit des Versuchs erforderlich. Das Mindestzeit-Kriterium hilft dabei, den passenden Kurvenabschnitt zu ermitteln:

$$t_b = \frac{5r^2}{\alpha} \quad [3]$$

mit  $t_b$  Untere Zeitgrenze der zu verwendenden Daten  
 $r$  Bohrlochradius (m) NB: Radius, d.h. 0,5 x Durchmesser  
 $\alpha$  Thermische Diffusivität (Temperaturleitfähigkeit), mit geschätzten Werten  
( $\alpha = \lambda / \rho c_p$ )

Grundsätzlich ist die Temperaturkurve auch optisch auf Inkonsistenzen zu prüfen, da die Meßdaten durchaus von den theoretischen Annahmen abweichen können und die Steigung sehr stark in die Auswertung eingeht. Weiterhin empfiehlt es sich bei größeren Abweichungen (vor allem nach unten) der nunmehr berechneten Wärmeleitfähigkeit von der in Formel [3] angenommenen, die Mindestzeit  $t_b$  mit den neuen Werten erneut zu berechnen. Damit wird ein veränderter Kurvenabschnitt zur Auswertung herangezogen, und das Ergebnis läßt sich iterativ verbessern. Ein Beispiel für eine Auswertung nach dem Linienquellenverfahren ist weiter unten im Abschnitt über den Workshop in Mol gegeben.

Eine andere Art der Auswertung, bei der sich wechselnde Verhältnisse besser erfassen lassen, ist die Parameterbestimmung mit Hilfe numerischer Simulation. Dazu wird ein numerisches Modell der Erdwärmesonde aufgebaut, mit dem die Fluidtemperaturen vorhergesagt werden können. Durch gezielte Parametervariation wird nach den Eingangswerten gesucht, mit denen der Temperaturverlauf am genauesten errechnet wird. Schwankungen der Umgebungstemperaturen oder der Wärmeleistung können hierbei direkt eingegeben werden. Eine solche, erheblich aufwendigere Auswertemethode konnte bei Messungen an dem Erdwärmesondenspeicher in Linköping entwickelt und erprobt werden (HELLSTRÖM, 1997), da diese im Rahmen eines FuE-Projekts stattfanden. Weitere Arbeiten zur Parameterbestimmung durch numerische Simulation haben vor allem an der Oklahoma State University in den USA stattgefunden (SPITTLER et al., 1999b; SPITTLER et al., 2000).

## Erfahrungen mit dem Thermal Response Test in Deutschland

Der erste Thermal Response Test in Deutschland wurde im Sommer 1999 mit dem Gerät der UBeG GbR an einer Probebohrung für ein größeres Bürogebäude in Langen (südliche Frankfurt) durchgeführt (s.a. MANDS et al., 2000). Abb. 2 zeigt die Regressionsgerade der mittleren Fluidtemperatur für den Zeitraum von 7-50 Stunden bei logarithmischer Zeitachse. Die Steigung beträgt  $k = 1,411$ , und mit Formel [2] kann die Wärmeleitfähigkeit zu  $\lambda_{eff} = 2,8$  W/m/K berechnet werden. Der thermische Bohrlochwiderstand beträgt nach der Messung  $r_b = 0,11$  K/(W/m); er kann aber auch aus der Bohrlochgeometrie und den verwendeten Materialien berechnet werden (mit EED wurde ein Wert von  $r_b = 0,115$  K/(W/m) erhalten).

Im weiteren Verlauf wurde die Anlagenauslegung in Langen modifiziert und die endgültige Bohrtiefe verringert. Im September 2000 wurde dann an einer dieser neuen Bohrung ein weiterer Response Test durchgeführt, um den Einfluß des nunmehr eingesetzten, thermisch verbesserten Verfüllmaterials zu untersuchen. Der thermische Bohrlochwiderstand wurde nun mit  $r_b = 0,08$  K/(W/m) gemessen. Eine Parameterbestimmung mit dem Programm EED ergab bei der gegebenen Geometrie

eine Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von 1,6 W/m/K, um  $R_b = 0,08 \text{ K}/(\text{W}/\text{m})$  zu erreichen (bei einem durchschnittlichen Mittenabstand der U-Rohre von 8 cm; s. Abb.3)

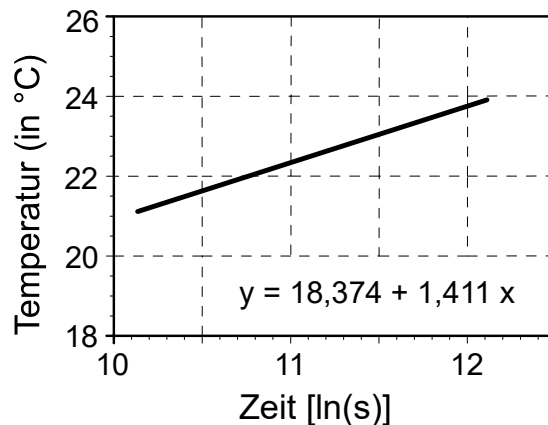


Abb. 2: Regressionsgerade der mittleren Fluidtemperatur für den Thermal Response Test in Langen (UBeG-L1 in Tab. 1 und 2, Kurve der Originaldaten s. Abb. 5)

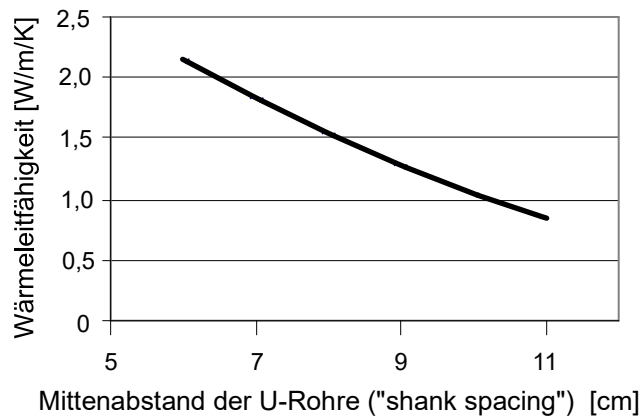


Abb. 3: Parameterbestimmung für die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials in Versuch UBeG-L2 mit EED; Variation der Lage der Rohre im Bohrloch (Mittenabstand rund 3,5 cm würde bedeuten, daß sich die Rohre berühren, bei ca. 12,5 cm liegen die Rohre theoretisch an der Bohrlochwand; knapp 8 cm ist ein mittlerer Wert)

Ebenfalls im Sommer 1999 fand der erste Versuch mit dem Gerät der Landtechnik Weihenstephan statt (LTW-A in Tab. 1 und 2). Er erfolgte an einer 35 m tiefen Erdwärmesonde in Attenkirchen bei Freising, die als Probebohrung für einen Erdwärmesondenspeicher niedergebracht worden war. Wegen der vorgesehenen Nutzung der geplanten Anlage als Hochtemperatur-Wärmespeicher (bis ca. 80 °C) besteht die Erdwärmesonde aus einem einfachen Polybuten-U-Rohr; es wurde deshalb auch mit deutlich höheren Temperaturen und sehr langer Meßzeit gearbeitet. Beim Untergrund handelt es sich im wesentlichen um Schluff und Ton mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit, wodurch sich die Startzeit (Mindestzeit) der Messung verlängert. Abb. 4 zeigt die Meßwerte und die Regressionsgerade für eine Versuchsdauer von 250 Stunden.

Bis zum Oktober 2000 wurden in Deutschland ein gutes Dutzend Thermal Response Tests durchgeführt. Tabelle 2 führt die wesentlichen auf; dazu kommen noch mindestens zwei durch Aetna GmbH, Wildau, gemessene Erdwärmesonden (in Emden und Erfurt), sowie die im Rahmen des Workshops in Mol, Belgien, durch deutsche Gruppen gemachten Versuche (s. nächstes Kapitel). Weitere Messungen für den Winter 2000/2001 sind bereits in Vorbereitung. Aus Tabelle 2 ist auch

ersichtlich, daß die Verfüllung mit thermisch verbesserten Materialien eine deutliche Reduktion des thermischen Bohrlochwiderstands und damit einen geringeren Temperaturverlust im Bohrloch ermöglicht.

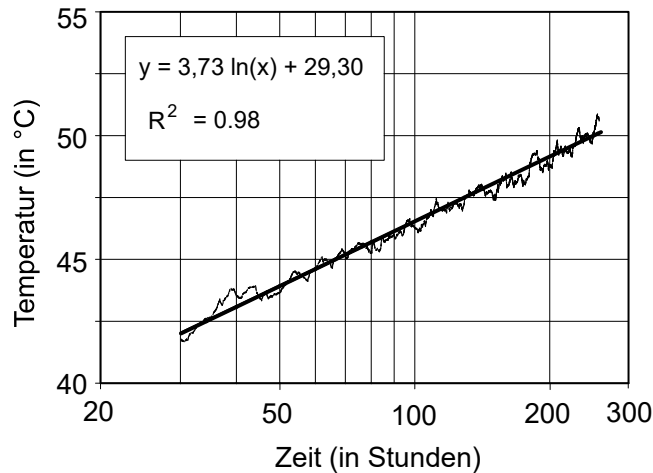


Abb. 4: Meßwerte und Regressionsgerade des Thermal Response Tests in Attenkirchen (LTW-A), ab 30 Stunden

Tabelle 2: Auswahl thermischer Response Tests in Deutschland 1999-2000 (LTW: Landtechnik Weihestephan; UBeG: UBeG GbR, Wetzlar)

Projekt	Geologie	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{eff}}$	Therm. Bohrlochwiderstand $r_b$
LTW-A	Schluff und Ton (Quartär/Tertiär)	1,6 W/m/K	? K/(W/m)
LTW-E	Mesozoische Sedimente	2,8 W/m/K	0,18 K/(W/m)
UBeG-B	Mesozische Sedimente	2,7 W/m/K	0,10 K/(W/m)
UBeG-D	Mergel („Emschermergel“, Kreide)	2,0 W/m/K	0,12 K/(W/m)
UBeG-G	Sand/Schluff, Mergel (Kreide)	2,3 W/m/K	* 0,08 K/(W/m)
UBeG-L1	Sand und Ton (Quartär/Tertiär)	2,8 W/m/K	0,11 K/(W/m)
UBeG-L2	Sand und Ton (Quartär/Tertiär)	2,3 W/m/K	* 0,08 K/(W/m)
UBeG-M	Mergel, tonig	2,5 W/m/K	0,12 K/(W/m)
UBeG-W	Mergel, ton. („Emschermergel“, Kreide)	1,5 W/m/K	0,11 K/(W/m)

\* Verfüllung mit thermisch verbessertem Verpressmaterial

Seit den ersten Versuchen wurden die Geräte weiterentwickelt und die Auswertemethodik verfeinert. Die Erfahrung zeigt, daß vor allem eine wirksame Entlüftung des Erdwärmesondenkreislaufs wichtig ist. Eine Fernüberwachung hat sich als sehr hilfreich erwiesen, um bei längerer Versuchsdauer eine regelmäßige Kontrolle zu haben. Auch unvorhergesehene Ereignisse wie z.B. das Kappen der Netzversorgung oder das Manipulieren an Fühlern durch Unbefugte sind vorgekommen. Neben der Versorgung aus dem Netz ist mindestens ein Versuch auch mit einem Stromaggregat

betrieben worden. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Vergleichbarkeit der Messung mit verschiedenen Geräten konnte durch den Vergleichstest in Mol (s.u.) nachgewiesen werden. Nicht immer wurden derart schöne Kurven wie die Beispiele in Abb. 5 erhalten, doch ließ sich immer eine sinnvolle Auswertung durchführen. Der Thermal Response Test hat sich somit nun auch in Deutschland als zuverlässiges Instrument erwiesen.

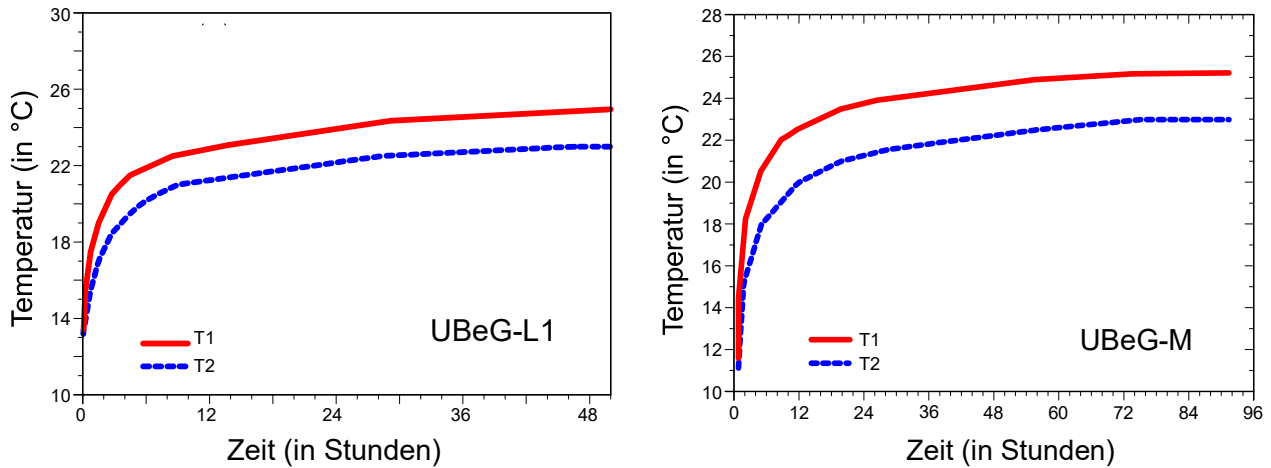


Abb. 5: Temperaturkurven für Eintritts- (T1) und Austrittstemperaturen (T2) an der Erdwärmesonde für zwei typische Response Tests (Messung UBeG)

## Seminar und Vergleichsversuch in Mol, Belgien

Am 14.10.2000 fand im flämischen Forschungszentrum (VITO) in Mol ein Workshop zu Erfahrungen mit dem Thermal Response Test statt. Er war als gemeinsames Vorhaben der Annexes 12 und 13 des Energiespeicherprogramms der IEA organisiert und brachte die in Europa mit dem Thermal Response Test arbeitenden Personen zu Diskussion und Erfahrungsaustausch zusammen, insgesamt 20 Teilnehmer aus 9 Ländern (B, CH, D, J, NL, S, TR, UK, USA).

Vorträge aus Schweden, Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz informierten über die Erfahrungen in diesen Ländern. Diskutiert wurden die Zuverlässigkeit der Ergebnisse, eingesetztes Gerät, Versuchsdauer, vertikale Auflösung (Schichten); weiterhin die Analogien des Thermal Response Test mit dem Pumpversuch in der Hydrogeologie. Die Anwendbarkeit hydrogeologischer Methoden für die Versuchsauswertung sollte untersucht werden. Die folgenden Empfehlungen für die Versuchsdurchführung wurden gegeben:

- Versuchsdauer                    mindestens etwa 50 Stunden, bis zu 100 Stunden
- Temperaturänderung            mindestens 10 K gegenüber der Anfangstemperatur, bis zum gewünschten Betriebstemperaturniveau
- Durchflußrate                    Fließen sollte turbulent sein (oder mit der für den Betrieb gewünschten Durchflußrate, falls bereits bekannt)

An der TU Luleå soll eine Website zum Informationsaustausch über Thermal Response Test eingerichtet werden, und ein Workshop wie der in Mol sollte etwa einmal jährlich durchgeführt werden. Ausführlichere Ergebnisse des Workshops und die gehaltenen Vorträge sollen in einem Sonderband der „Giessener Geologischen Schriften“ veröffentlicht werden.

Der Standort Mol bot aber auch die Möglichkeit, einen Vergleich von Messungen mit drei verschiedenen Responsetest-Geräten zu erhalten. In Mol standen drei eng benachbarte Erdwärmeson-

den in praktisch identischer Geologie zur Verfügung, die für die Standortuntersuchung des geplanten Erdwärmespeichers „TESSAS“ installiert worden waren. Es handelt sich dabei um Doppel-U-Sonden, wobei in jeder Bohrung ein anderes Verfüllmaterial zum Einsatz kam:

- Mol-Sand (Wiedereinfüllung des beim Bohren geförderten, anstehenden Sandes)
- Gemischter Sand (Einfüllung eines in der Kornverteilung optimierten Sandes)
- Benonit (Verpressung mit der üblichen Bentonit-Zement-Suspension)

Im Sommer 2000 wurden an allen drei Erdwärmesonden Responsetests durch Groenholland (NL) durchgeführt, in den Tagen vor und während des Workshops erfolgten Tests mit den Geräten der Landtechnik Weihenstephan und UBeG Wetzlar (beide D). Das holländische Gerät benutzt eine Wärmepumpe als Wärme-/Kältequelle, die beiden deutschen Geräte verfügen über elektrische Widerstandsheizung.

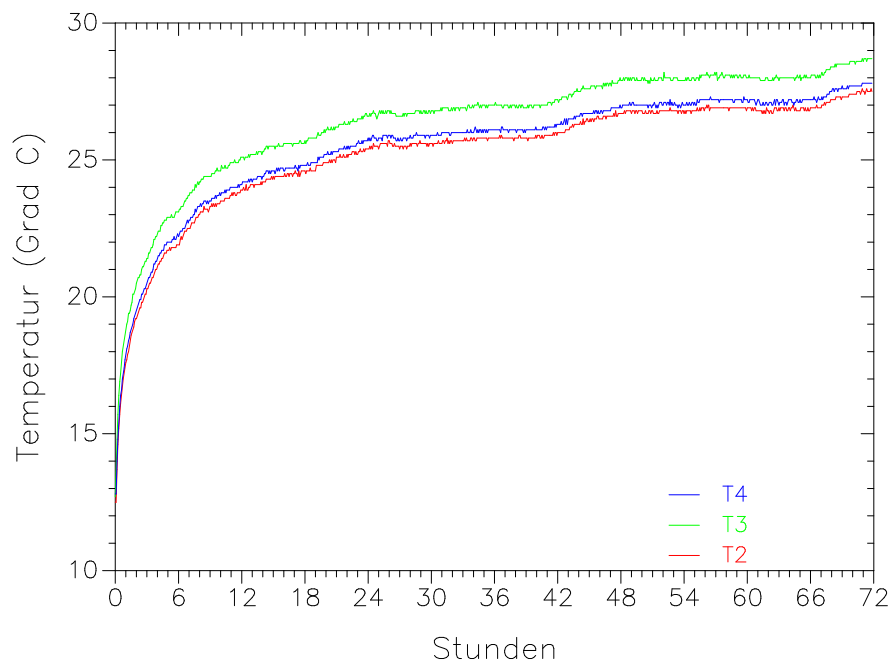
Am Beispiel der UBeG-Messung sollen die Daten und die Auswertung verdeutlicht werden:

a) Grunddaten

- Erdwärmesondenlänge 30,5 m
- Erdwärmesondenbauart Doppel-U-Sonde aus Polybutene
- Bohrlochdurchmesser 150 mm
- Versuchsdauer 71,8 h (11.-13-10.2000)

b) Meßdaten

- Heizarbeit 129 kWh
- Heizleistung 1797 W
- Ausgangstemperatur (Mittelwert über 30,5 m Erdwärmesondenlänge) 12,5 °C
- Temperaturkurve:



c) Berechnung des Mindestzeit-Kriteriums mit geschätzten Werten

( $\lambda = 2,0 \text{ W/m/K}$ ,  $\rho c_p = 2,3 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$ )

- Thermische Diffusivität:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{2,0}{2300000} = 8,7 \cdot 10^{-7}$$



- Mindestzeitkriterium:

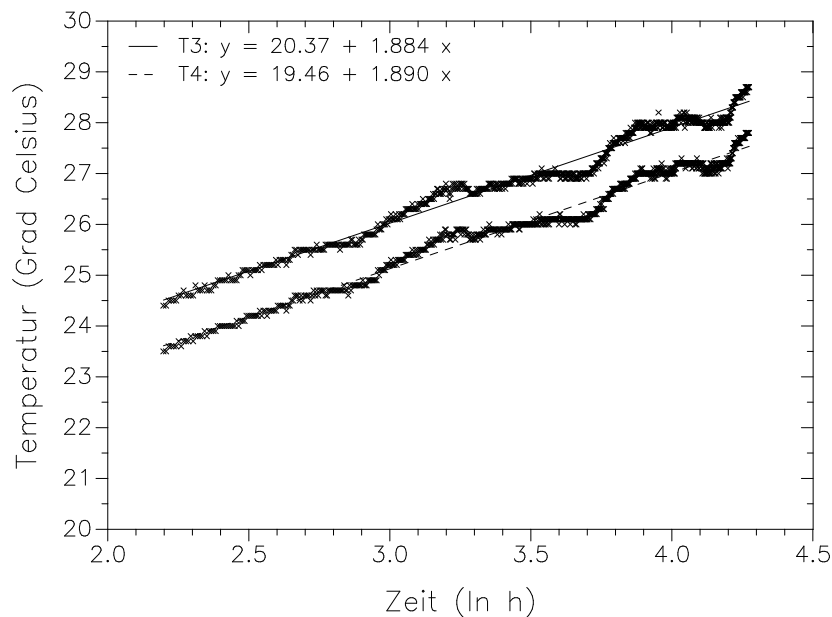
$$t_{b1} = \frac{5r_0^2}{\alpha} = \frac{5 \cdot 0,075^2}{0,00000087} = 32327s$$

Dies entspricht 8,98 Stunden (8h 59min)

- d) Erstellung der Regressionsgeraden auf logarithmischer Zeitachse (mit Werten ab 9 Stunden)

Sensor	Regressionsgerade
T3	$Y = 20,37 + 1,884 X$
T4	$Y = 19,46 + 1,890 X$

Die optische Kontrolle der Regressionsgeraden in der nachfolgenden Abbildung zeigt, daß das Mindestzeitkriterium ausreichend groß ist:



- e) Berechnung der Wärmeleitfähigkeit

$$T3 \quad \lambda_{eff} = \frac{1797}{4\pi 30,5 \cdot 1,884} = 2,49 W / m / K$$

$$T4 \quad \lambda_{eff} = \frac{1797}{4\pi 30,5 \cdot 1,890} = 2,48 W / m / K$$

$$\lambda_{eff} = 2,49 W/m/K$$

- f) Berechnung des thermischen Bohrlochwiderstands

Der thermische Bohrlochwiderstand bestimmt die Temperaturverluste von der Bohrlochwand bis ins Fluid. Ein niedriger Wert kann bei gutem Anschluß an das Erdreich erreicht werden (z.B. mit optimierten Verfüllmaterialien); typische sind Werte um etwa 0,1 K/(W/m).

Der thermische Bohrlochwiderstand kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$R_b = \frac{H}{Q} \cdot (T_f - T_0) - \frac{1}{4\pi \lambda} \cdot \left( \ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - 0,5772 \right)$$

mit Q	Wärmeeintrag (W)	1676 W
H	Erdwärmesondenlänge (m)	30,5 m
T <sub>0</sub>	Ungestörte Erdreichtemperatur (°C)	12,5 °C
λ	Wärmeleitfähigkeit (W/m/K)	2,32 W/m/K
α	Thermische Diffusivität, λ/ρc <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> /s)	1,08 * 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
r <sub>0</sub>	Bohrlochradius (m)	0,075 m

Die folgenden Wertepaare werden variiert:

t Zeit (s)

$T_f$  Mittlere Fluidtemperatur (Mittelwert von T3 and T4) zum Zeitpunkt t (°C)

$R_b$  wird für verschiedene Zeit-Temperatur-Wertepaare von 12 bis 71 Stunden berechnet (s. Tabelle); das repräsentative Ergebnis ist  $R_b = 0,13 \text{ K/(W/m)}$ :

Zeit		$R_b$
12 h	43200 s	0,127 K/(W/m)
24 h	86400 s	0,137 K/(W/m)
36 h	129600 s	0,127 K/(W/m)
48 h	172800 s	0,133 K/(W/m)
60 h	216000 s	0,130 K/(W/m)
71 h	255600 s	0,136 K/(W/m)

Die Ergebnisse der verschiedenen Versuche (Tab. 3) ergeben für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs einen Wert jeweils um etwa 2,5 W/m/K. Aufgrund der gleichen geologischen Verhältnisse ist eine solche Übereinstimmung auch zu erwarten. Lediglich der Versuch Groenholland/Bentonit weicht davon ab; hier ist ggf. zu prüfen, ob es bei der Versuchsdurchführung zu irgendwelchen Unregelmäßigkeiten gekommen ist. Bei der Auswertung mit einem Simulationsmodell (Tab. 4) sind die Unterschiede weniger stark. Bei dieser Auswertung wird übrigens nicht der thermische Bohrlochwiderstand erhalten, sondern stattdessen die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials (je höher die Wärmeleitfähigkeit, desto geringer der Bohrlochwiderstand). Auf jeden Fall zeigen die Ergebnisse, daß mit dem Thermal Response Test wiederholbare und verlässliche Ergebnisse zu erhalten sind.

Tab. 3: *Ergebnisse der Vergleichsmessungen in Mol; Auswertung nach dem Linienquellenprinzip*

Verfüllmaterial:	Groenholland	UBeG	Weihenstephan
Mol-Sand	$\lambda = 2,47 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,06 \text{ K/(W/m)}$	-	$\lambda = 2,47 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,05 \text{ K/(W/m)}$
Gemischter Sand	$\lambda = 2,40 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,1 \text{ K/(W/m)}$	-	$\lambda = 2,51 \text{ W/m/K}$ $r_b = ?$
Bentonit	$\lambda = 1,86 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,08 \text{ K/(W/m)}$	$\lambda = 2,49 \text{ W/m/K}$ $r_b = 0,13 \text{ K/(W/m)}$	-

Tab. 4: *Ergebnisse der Messungen in Mol durch Groenholland, ausgewertet mit einem 2D-Simulationsmodell (Verfüllung mit Sand zeigt korrekterweise eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit wie die des Erdreichs, das hier ja auch überwiegend aus Sand besteht)*

	Mol-Sand	Gemischter Sand	Bentonit
Erdreich	$\lambda = 2,56 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 2,47 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 2,26 \text{ W/m/K}$
Verfüllung	$\lambda = 2,42 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 2,52 \text{ W/m/K}$	$\lambda = 1,25 \text{ W/m/K}$

## Schlußfolgerungen

Mit dem Thermal Response Test können genaue Daten für die Anlagenauslegung am Standort erhoben werden. Das Meßgerät kann ohne weiteres mobil aufgebaut werden, so wie es mit dem ersten schwedischen Gerät auf einem Anhänger geschah (EKLÖF & GEHLIN, 1996). Das Gerät der Landtechnik Weihenstephan besteht aus zwei tragbaren Behältern, die in einem Fahrzeug oder Anhänger transportiert werden können, dasjenige von UBeG aus einem Rahmen mit dem Heizungsaufbau und einem Steuer- und Datenaufzeichnungsschrank, beides auf einem Anhänger montiert.

Durch die mobilen Meßgeräte bekommt der Thermal Response Test eine erhebliche Bedeutung für die korrekte Auslegung von Erdwärmesondenanlagen. Er ist nicht nur bei der Dimensionierung größerer Erdwärmesondenanlagen unverzichtbar, es bietet sich auch an, aus einer Vielzahl von Messungen ein Kataster anzulegen. Zudem bietet er die Möglichkeit, in Streitfällen die Auslegung von Anlagen zu überprüfen. Ein Thermal Response Test sollte daher in Zukunft bei jeder größeren Anlage durchgeführt werden. Entsprechende Standardverfahren und Richtlinien müssen in den nächsten Jahren erarbeitet werden.

Durch die deutsche Mitarbeit an Annex 12 und Annex 13 des IEA Energy Storage Implementing Agreement kann eine stetige Weiterentwicklung erfolgen; so sind z.B. Versuche mit höheren Temperaturen für Hochtemperatur-Erdwärmesondenspeicher geplant. Der Thermal Response Test ist gegen Ende des Jahres 2000 bereits zu einem Standardverfahren bei der Planung mittlerer und großer Erdwärmesondenfelder geworden.

## Danksagung

Die Mitarbeit der Universität Gießen und der Landtechnik Weihenstephan an Annex 12 und 13 des Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage (ECES) der Internationalen Energie-Agentur IEA wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft BMWi gefördert, wofür die Autoren danken. Die Autoren danken vor allem auch für die Finanzierung der deutschen Teilnahme am und der deutschen Messungen im Rahmen des Workshops in Mol unter Kz. 0389809A durch den BMWi. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

## Literatur

AUSTIN, W. (1998): Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. - 164 p., MSc-thesis, OSU, Stillwater OK

CHOUDARY, A. (1976): An approach to determine the thermal conductivity and diffusivity of a rock in situ. - PhD-thesis, OSU, Stillwater OK

CLAESSON, J., EFTRING, B., ESKILSON, P. & HELLSTRÖM, G. (1985): Markvärme, en handbok om termiska analyser. - 3 Bände, SCBR T16-18:1985, Stockholm

CLAESSON, J. & ESKILSON, P. (1988): Conductive Heat Extraction to a deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules. - Energy 13/6, S. 509-527, Oxford

CRUICKSHANKS, F., BARDSLEY, J. & WILLIAMS, H. (2000): In-Situ Measurement of Thermal Properties of Cunard Formation in a borehole, Halifax, Nova Scotia. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 171-175, Stuttgart

- EKLÖF, C. & GEHLIN, S. (1996): TED - a mobile equipment for thermal response test. - 62 p., Master's thesis 1996:198E, Luleå University of Technology
- GEHLIN, S. & NORDELL, B. (1997): Thermal Response Test - a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole. - Proc. MEGASTOCK '97, pp. 103-108, Sapporo
- GEHLIN, S. (1998) Thermal Response Test - In-situ measurements of thermal properties in hard rock. - Lic. thesis 1998:37, Luleå University of Technology, Luleå
- GEHLIN, S. & HELLSTRÖM, G. (2000): Recent Status of In-Situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 159-164, Stuttgart
- HELLSTRÖM, G. (1991): Ground Heat Storage, Thermal Analysis of Duct Storage Systems, I. Theory. - 262 S., Dept. Mathematical Physics, University of Lund, Lund.
- HELLSTRÖM, G. (1994): Fluid-to-ground thermal resistance in duct ground heat storage. - Proc. CALORSTOCK '94, pp. 373-380, Espoo/Helsinki
- HELLSTRÖM, G. (1997): Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden. - Proc. MEGASTOCK '97, pp. 115-120, Sapporo
- 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
- MANDS, E., SANNER, B., SAUER, M. & SEIDINGER, W. (2000): Das Low Energy Office der Deutschen Flugsicherung in Langen mit geothermischer Wärme/Kälte-Speicherung. - Ber. 6. Geoth. Fachtagung Herne, GtV, Geeste
- MOGENSEN, P. (1983): Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. - Proc. Int Conf Subs Heat Storage, S. 652-657, SCBR, Stockholm
- 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., REUSS, M., MANDS, E. & MÜLLER, J. (2000): Thermal Response Test - Experiences in Germany. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 177-182, Stuttgart
- SKOUBY, A. (1998): Thermal Conductivity Testing. - in: SKOUBY, A., Proper Engineering + Thermally Enhanced Grouts = GeoExchange Savings, The Source, 11-12/98, p. 5, Stillwater OK
- SMITH, M. (1999): Comments on In-Situ Borehole Thermal Conductivity Testing. - The Source 1-2/99, Stillwater OK
- SPITLER, J., REES, S. & YAVUZTURK, C. (1999a): More Comments on In-situ Borehole Thermal Conductivity Testing - The Source 3-4/99, Stillwater OK
- SPITLER, J., YAVUZTURK, C. & JAIN, N. (1999b): Refinement and Validation of In-situ Parameter Estimation Models. - Kurzbericht, OSU, Stillwater, OK; <http://www.mae.okstate.edu/Faculty/spitler/pdfs/insitu.pdf>
- SPITLER, J.D., YAVUZTURK, C. & REES, S.J. (2000): In Situ Measurement of Ground Thermal Properties. - Proc. TERRASTOCK 2000, pp. 165-170, Stuttgart
- VAN GELDER, G., WITTE, H.J.L., KALMA, S., SNIJDERS, A. & WENNEKES, R.G.A (1999): In-situ-Messung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds durch Wärmeentzug. - Tagungsband OPET-Seminar Erdgekoppelte Wärmepumpen zum Heizen und Klimatisieren von Gebäuden, Cottbus, pp. 56-58, GtV, Geeste