

## THERMAL RESPONSE TEST - EINE METHODE ZUR IN-SITU-BESTIMMUNG WICHTIGER THERMISCHER EIGENSCHAFTEN BEI ERDWÄRMESONDEN

Burkhard Sanner\*, Manfred Reuß\*\* & Erich Mandt

### 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.

### Entwicklung des Thermal Response Tests

Bei einem Thermal Response Test wird eine definierte Wärmeleistung an die Erdwärmesonde angelegt (meist Aufheizung), und der sich dabei ergebende Verlauf der Ein- und Austrittstemperaturen an der Erdwärmesonde aufgezeichnet.

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, 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 Kanada, Norwegen und der Schweiz, oder sind in der Entwicklung. In Deutschland wird der Thermal Response Test von der Landtechnik Weihenstephan der TU München und von der Firma UBeG GbR in Wetzlar ausgeführt.



### Anger's Leistungsbeweis:

Mehr Effizienz durch Erdwärme und geothermische Energie.



Nutzen Sie unser know how und gewinnen Sie mit Erdwärme einen neuen Bodenschatz. Erdwärme ist jahrzehntelange Energieversorgung frei Haus - ohne die Umwelt durch Schadstoffe zu belasten. Investieren Sie in Ihre Zukunft. Sprechen Sie mit unseren Spezialisten.

### Anger's Leistungsspektrum:

- Brunnenbohrungen und -anlagen
- Brunneninspektionen, Regenerierung, Sanierung
- Pumpenwartung und Reparaturen
- Bohrungen zur Lagerstättenerkundung

### H. Anger's Söhne

Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH  
Gutenbergstraße 33 • 37235 Hessisch Lichtenau  
Tel. (0 56 02) 93 30-0 • Fax (0 56 02) 93 30-70  
E-Mail: Angers\_Soehne@t-online.de

### Niederlassungen:

44229 Dortmund, Tel. (0231) 7 92 48 70  
56638 Saffig, Tel. (02625) 95 73 23  
81927 München, Tel. (089) 91 07 55 85  
99727 Nordhausen, Tel. (03631) 99 20 32  
A-1150 Wien, Tel. (0043) 1-8 92 95 48

**Anwendung**

Das erste Gerät in Schweden wurde im Hinblick auf eine größere Zahl von Anlagen zur direkten Kühlung von Telephon-Schaltstationen mit Erdwärmesonden gebaut. Getestet wurde es an der TU Luleå und an zwei ersten Kühlanlagen mit Erdwärmesonden in der Region Stockholm (Ängby und Drevikstrand; s. EKLÖF & GEHLIN, 1996). Inzwischen wurde das Gerät weiterentwickelt und erfolgreich für die Planung einer Vielzahl von derartigen Kühlanlagen verwendet (Tab. 1), daneben aber auch für die Auslegung normaler erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen. Die Ergebnisse für die Standorte in Tab. 1, die durchweg in Kristallin (meist Granit) lagen, waren:

- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 3,2$  bis  $\lambda = 4,2$  W/m/K, dazu zwei Spitzen über  $\lambda = 5,0$  W/m/K (Granit in Schweden hat nach Labormessungen  $\lambda = 3,0-4,5$  W/m/K)
- Thermischer Bohrlochwiderstand  $r_b = 0,04$  bis  $r_b = 0,10$  K/(W/m)

(SKOUBY, 1998; SPITLER et al., 1999a), die allerdings auch angezweifelt wird (SMITH, 1999). 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.

**Auswertung**

Die verbreitetste Methode der Auswertung eines Thermal Response Test basiert auf der KELVIN'sche 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; s.a. SANNER, 1992, S. 1-9 bis 1-14 und 7-4 bis 7-8). Die Grundformel in den Originalenheiten von 1948 lautet:

| Ort          | Anzahl an Erdwärmesonden | Tiefe d. Erdwärmesonden (m) | Maxim.Kühlleistung (kW) | Jährl. Kühlarbeit (MWh/a) |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Drevikstrand | 4                        | 160                         | 20                      | 173                       |
| Ängby        | 6                        | 132                         | 27                      | 237                       |
| Oskarshamm   | 4                        | 161                         | 30                      | 259                       |
| Hässleholm   | 19                       | 126                         | 105                     | 185                       |
| Linköping    | 7                        | 115                         | 45                      | 80                        |
| Norrköping   | 20                       | 157                         | 108                     | 192                       |
| Ludvika      | 5                        | 117                         | 35                      | 49                        |
| Örebro       | 60                       | 197                         | 200                     | 173                       |

Tab. 1: Auswahl mit Erdwärmesonden gekühlter Telephon-Stationen der schwedischen TELIA AB, die nach Thermal Response Tests ausgelegt wurden (nach GEHLIN & NORDELL, 1998)

In den USA wird die Methode inzwischen kommerziell angewendet. Tab. 2 zeigt eine Auswahl von Erdwärmesondenanlagen, für die die Basisdaten zur Auslegung mit einem Thermal Response Test gewonnen wurden. Die eigentliche Planung erfolgte dann mit dem PC-Programm GLHEPRO, das nach der g-Funktion-Methode arbeitet (wie das europäische Programm EED). In den USA besteht der Wunsch, die Meßzeiten deutlich zu kürzen, um Kosten einsparen zu können. Es besteht die Empfehlung einer Mindestmeßzeit von 50 Stunden

$$T - T_0 = \frac{Q'}{2\pi k} \int_0^x \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{Q'}{2\pi k} I(X)$$

$$X = r / \sqrt{2(k/\rho c_p)t}$$

- T Temperatur im Erdreich in jeder beliebigen gewählten Entfernung vom Rohr, in °F
- T<sub>0</sub> Ausgangstemperatur des Erdreiches, in °F
- Q' Wärmeabgabe des Rohres (neg. f. Wärmeaufn.), in BTU/hr pro Fuß Rohrlänge

| Anlage                            | Erdwärmesondenlänge insgesamt (m) | Wärmepumpenleistung (kW) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Webster County High School        | 21945                             | 1760                     |
| Marion Harding Hotel              | 5267                              | 528                      |
| Solon Public Library              | 4345                              | 282                      |
| Lake Erie Nature & Science Center | 3290                              | 253                      |
| Elyria Teachers Credit Union      | 1646                              | 144                      |
| The Middleton Corporation         | 457                               | 35                       |

Tab. 2: Mit dem Thermal Response Test der Oklahoma State University ausgelegte Erdwärmesondenanlagen (Auswahl, nach SMITH, 1999)

- k Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches, in BTU/hr.sqft.°F/ft
- β Integrationsvariable
- r Entfernung vom Mittelpunkt des Rohres, in Fuß
- ρ Dichte des Erdreiches, in pounds pro Kubikfuß
- c Spezifische Wärme des Erdreiches, in BTU pro pound.und °F
- t abgelaufene Zeit seit Beginn der Wärmeabgabe/-entnahme, in Stunden

Für die Auswertung nach der Linienquellentheorie (s. Kasten) ist eine ausreichende Laufzeit des Versuchs erforderlich. Das Mindestzeitkriterium hilft dabei, den passenden Kurvenabschnitt zu ermitteln. EKLÖF & GEHLIN (1996) fanden deutliche Abweichungen bei zu kurzer Meßdauer (Tab. 3). Grundsätzlich ist die Temperaturkurve auch optisch auf Inkonsistenzen zu prüfen, da die Steigung sehr stark in die Auswertung eingeht. Wenn z.B. Schwankungen von Einspeiseleistung oder Temperaturen im Tagesverlauf festgestellt werden (besonders empfindlich ist hier das Gerät mit Wärmepumpe, s. VAN GELDER et al., 1999), hilft bei der Auswertung nach der Linienquellentheorie nur eine ausreichend lange Meßzeit, um diese Schwankungen auszugleichen. Durch längere Meßzeiten können auch Störungen, wie sie z.B. durch Wärmeentwicklung beim Abbinden des Verfüllmaterials entstehen, reduziert werden.

| Luleå, F-building, Bohrtiefe 31 m |            |             |
|-----------------------------------|------------|-------------|
| Daten benutzt ab                  | 1 h 15 min | 12 h 30 min |
| Wärmeleitfähigkeit                | 3,9 W/m/K  | 3,7 W/m/K   |
| Ängby, Bohrtiefe 139 m            |            |             |
| Daten benutzt ab                  | 2 h 25 min | 24 h 15 min |
| Wärmeleitfähigkeit                | 3,8 W/m/K  | 4,7 W/m/K   |
| Drevikstrand, Bohrtiefe 163 m     |            |             |
| Daten benutzt ab                  | 3 h 20 min | 33 h 45 min |
| Wärmeleitfähigkeit                | 3,6 W/m/K  | 4,5 W/m/K   |

Tab. 3: Ergebnisse von Thermal Response Tests bei Auswertung nach unterschiedlicher Meßdauer (nach Daten aus EKLÖF & GEHLIN, 1996)

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



UBeG GbR – Dr. E. Mands & Dipl.-Geol. M. Sauer  
 Zum Boden 6 35580 Wetzlar  
 Tel.: 06441/212910 Fax.: 06441/212911  
 eMail: UBeG@01019freenet.de

**Umwelttechnik:**

- Alllastenuntersuchungen
- Sanierungskonzepte
- Erstellung von Rückbaukonzepten

**Baugrunduntersuchungen:**

- Gründungsgutachten
- Bauüberwachung

**Geotechnik:**

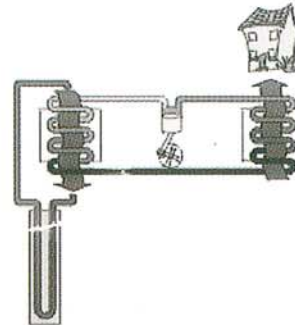
- Erdstatische Berechnungen für:
- Damm-, Wege-, Straßen- und Kanalbau
  - Böschungen

**Hydrogeologie:**

- Untersuchungen zur Grundwassererschließung
- Überwachung von Brunnenbohrungen und Pumpversuchen

**Geothermie:**

- Beratung und Planung zur Nutzung der Erdwärme / -kälte für Heizung und Kühlung von Gebäuden
- Beratung und Planung erdgekoppelter Solaranlagen
- Dimensionierung von Energiepfählen
- Ermittlung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes mittels Geothermal-Response-Test (GeRT)
- Fachbauleitung und Überwachung



an der Oklahoma State University in den USA stattgefunden (SPITLER et al., 1999a). In einem laufenden FuE-Projekt ist es das Ziel, die reinen Rechenzeiten von jetzt 3-4 Stunden herabzusetzen, und auch eine online-Auswertung während der Messung zu entwickeln (SPITLER et al., 1999b).

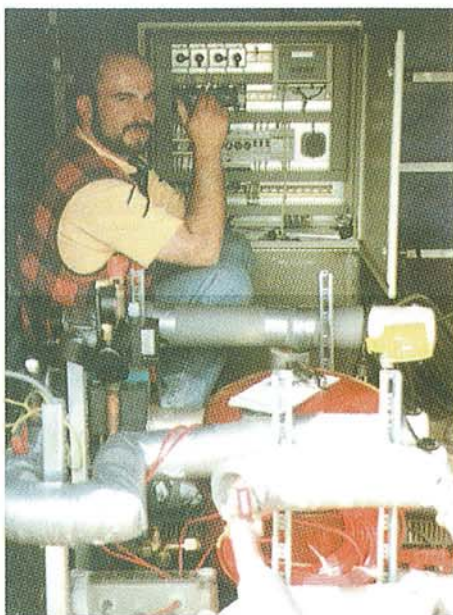


Abb. 1: Gerät zur Durchführung von Thermal Response Tests (montiert auf Pkw-Anhänger; UBeG GbR)

**Beispiele aus Deutschland**

Als Beispiel aus Deutschland sei zuerst eine Messung aus dem Raum südlich von Frankfurt genannt, die mit dem Gerät der UBeG GbR (Abb. 1) im Sommer 1999 durchgeführt wurde. Abb. 2 zeigt die Regressionsgerade der Fluid-Mitteltemperaturen für eine 50-Stunden-Messung (nur Werte über 6,9 Stunden, s. Kasten). Die Parameter der Erdwärmesonde und die Ergebnisse sind in Tab. 4 aufgeführt.

Der durch die Messung bestimmte Wert für den thermischen Bohrlochwiderstand (d.h. den Temperaturverlust zwischen natürlichem Untergrund an der Bohrlochwand und Fluid in den Rohren) beträgt  $r_b = 0,11 \text{ K/(W/m)}$ . Mit EED läßt sich dieser Wert auch mit den verwendeten Materialien und Maßen berechnen; es ergibt sich  $r_b = 0,115 \text{ K/(W/m)}$ ; die Übereinstimmung ist ausgezeichnet.

Als zweites Beispiel sei hier eine Messung an einer 35m tiefen Erdwärmesonde in Attenkirchen bei Freising erwähnt, die von der Landtechnik Weihestephan durchgeführt wur-

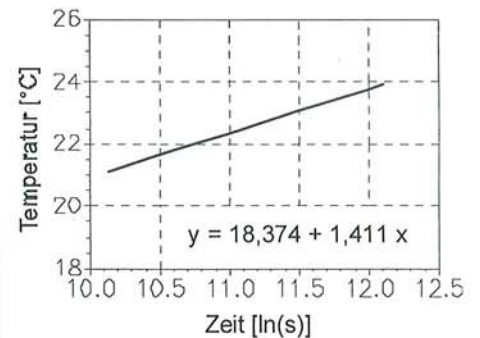


Abb. 2: Regressionsgerade der Fluid-Mitteltemperatur des Thermal Response Test südlich Frankfurt/Main (s. Text)

de. Wegen der vorgesehenen Nutzung der geplanten Erdwärmesondenanlage als Wärmespeicher wurde mit deutlich höheren Temperaturen gearbeitet. Beim Untergrund handelt es sich im wesentlichen um Schluff und Ton mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit; dadurch verlängert sich auch die Startzeit der Messung. Die Abb. 3

| Erdwärmesonden- und Standortdaten |                         | Ergebnisse des Thermal Response Tests |   |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|
| Erdwärmesondenlänge               | H = 99 m                | Meßzeit                               | 50,2 Stunden                                |
| Erdwärmesondentyp                 | HDPE-Doppel-U           | Wärmeleistung in EWS                  | Q = 4900 W                                  |
| Bohrlochdurchmesser               | 2r = 150 mm             | therm. Bohrlochwiderst.               | $r_b = 0,11 \text{ K/(W/m)}$                |
| mittl. Erdreichtemperatur         | $T_0 = 12,2 \text{ °C}$ | Wärmeleitfähigkeit                    | $\lambda_{\text{eff}} = 2,79 \text{ W/m/K}$ |

Tab. 4: Technische Daten und Meßergebnisse einer mit dem Thermal Response Test gemessenen Erdwärmesonde südlich Frankfurt/Main

| Erdwärmesonden- und Standortdaten |                         | Ergebnisse des Thermal Response Tests |   |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|
| Erdwärmesondenlänge               | H = 35 m                | Meßzeit                               | 250 Stunden                                 |
| Erdwärmesondentyp                 | PB-Einfach-U            | Wärmeleistung in EWS                  | Q = 2650 W                                  |
| Bohrlochdurchmesser               | 2r = 150 mm             | therm. Bohrlochwiderst.               | $r_b = 0,50 \text{ K/(W/m)}$                |
| mittl. Erdreichtemperatur         | $T_0 = 15,6 \text{ °C}$ | Wärmeleitfähigkeit                    | $\lambda_{\text{eff}} = 1,62 \text{ W/m/K}$ |

Tab. 5: Technische Daten und Meßergebnisse einer mit dem Thermal Response Test gemessenen Erdwärmesonde in Attenkirchen bei Freising

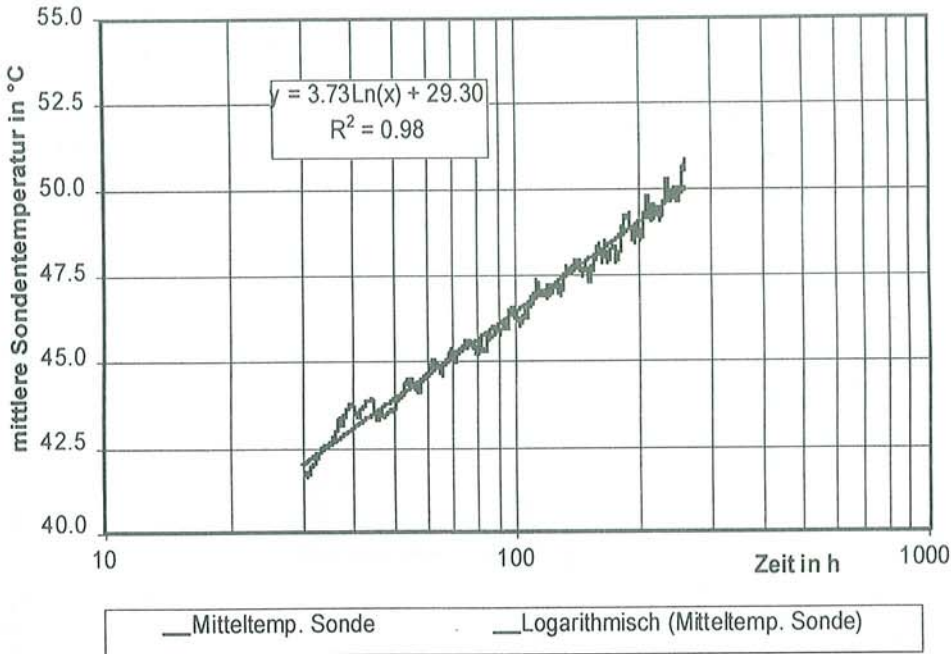


Abb. 3: Meßwerte und Regressionsgerade des Thermal Response Tests in Attenkirchen

zeigt die Meßwerte und die Regressionsgerade für eine Versuchsdauer von 250 Stunden, in Tab. 5 sind die technischen Daten und Ergebnisse aufgeführt.

### Schlußfolgerungen

Der Thermal Response Test ist ein geeignetes Mittel zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds und des thermischen Bohrlochwiderstands. Dabei muß aber auf eine sorgfältige Durchführung und korrekte Auswertung der Messungen geachtet werden.

Einfachere Rechenmethoden und kürzere Meßzeiten bedeuten immer einen Verlust an Genauigkeit. In einer Untersuchung von SPITLER et al. (1999a) zeigten nach 50 Stunden verschiedene 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 (s. Kasten).

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 Feuchttransport bei der Erwärmung wechsell-


de 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.

Vor allem 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.

### Literatur

- AUSTIN, W. (1998): *Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties*. - 164 S., 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

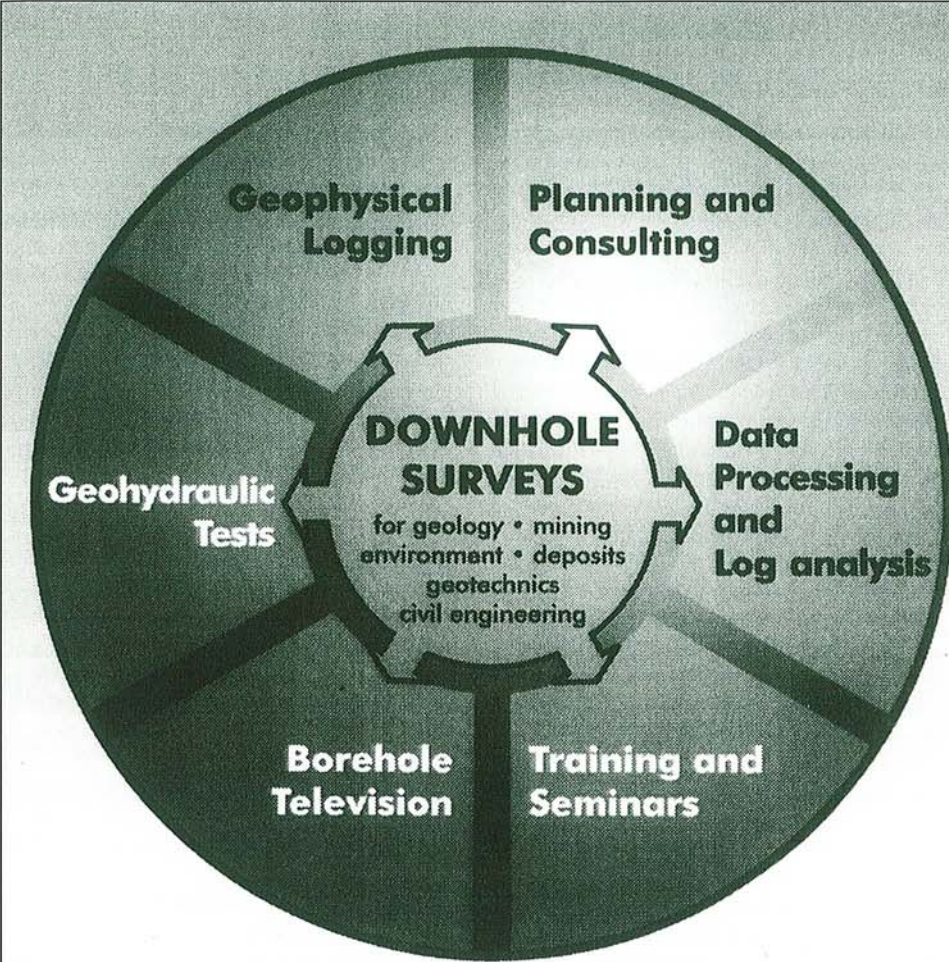
- CLAESSON, J., EFTRING, B., ESKILSON, P. & HELLSTRÖM, G. (1985): *Markvärme, en handbok om termiska analyser*. - 3 Bände, SCBR T16-18:1985, Stockholm  
 CLAESSON, J. & ESKILSON, P. (1988): *Conductive Heat Extraction to a deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules*. - Energy 13/6, S. 509-527, Oxford  
 EKLÖF, C. & GEHLIN, S. (1996): *TED - a mobile equipment for thermal response test*. - 62 S., 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. 7th International Conference on Thermal Energy Storage Megastock '97, Vol. 1, S. 103-108, Sapporo  
 GEHLIN, S. & NORDELL, B. (1998): *Thermal response tests of boreholes - results from in situ measurements*. - Proc. 2nd Geothermal Conference at Richard Stockton College, <http://www.geo-journal.stockton.edu/>, Pomona NJ  
 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. 6th International Conference on Thermal Energy Storage Calorstock '94, S. 373-380, Espoo/Helsinki  
 HELLSTRÖM, G. (1997): *Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden*. - Proc. 7th International Conference on Thermal Energy Storage Megastock '97, Vol. 1, S. 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  
 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. (1992): *Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation*. - 328 S., IZW-Bericht 2/92, FIZ, Karlsruhe  
 SKOUBY, A. (1998): *Thermal Conductivity Testing*. - in: SKOUBY, A., Proper Engineering + Thermally Enhanced Grouts = GeoExchange Savings, The Source, 11-12/98, S. 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>



**Gesellschaft für  
bohrlochgeophysikalische  
und geoökologische  
Messungen mbH**

**Dortmund • Gommern • Gotha  
Leipzig • Mainz • Storkow  
München**

**Industriepark  
Magdeburger Straße  
D-39245 Gommern  
Tel.: (00 49 39200) 74 00  
Fax: (00 49 39200) 5 00 47**



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, S. 56-58, GTV, Geeste

\*Dr. Burkhard Sanner, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Justus-Liebig-Universität, Gießen  
\*\*Dipl.-Phys. Manfred Reuß/Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, TU München, Freising-Weihenstephan  
\*\*\* Dr. Erich Mands, UbeG GbR

Auswertung nach einer aus der Linienquellentheorie abgeleitete Funktion:

$$\text{Steigung} = \frac{Q}{4 \pi H \lambda_{\text{eff}}}$$

mit Steigung Steigung der Kurve des Temperaturanstiegs gegen ln(Zeit)  
Q Wärmeleistung (Eintrag/Entzug)  
H Erdwärmesondentlänge  
 $\lambda_{\text{eff}}$  Effektive Wärmeleitfähigkeit (d.h. einschließlich Einfluß von Grundwasser, Bohrlochverfüllung etc.)

Mindestzeit, unterhalb derer die Daten für diese Form der Auswertung nicht verwendet werden dürfen:

$$t_b = \frac{5r^2}{\alpha}$$

mit  $t_b$  Mindestzeit / untere Grenze  
r Bohrlochradius  
 $\alpha$  Thermische Diffusivität ( $\alpha = \lambda / \rho c_p$ ), mit angenommenen Werten

Der thermische Bohrlochwiderstand kann nach folgender Formel berechnet werden:

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

mit Q Wärmeeintrag  
H Bohrlochtiefe  
 $T_0$  Ungestörte Erdreichtemperatur  
 $T_f$  Mittlere Fluidtemperatur  
 $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit (W/m/K)  
 $\alpha$  Thermische Diffusivität  
r Bohrlochradius  
t Zeit