



Optimierte geothermische Erkundung durch Kopplung von Response Test und Temperaturmessung

Dr.-Ing. Christian Gutberlet

Dr.-Ing. Uwe Lehmann

GeoIngenieure Fruchtenicht + Lehmann GmbH, Wiesbaden

1 Einleitung

Seit Jahren steigt kontinuierlich der Anteil der Geothermie bei der Heizwärmeversorgung, und zwar sowohl im Wohn- als auch im Büro- und Gewerbebau. Der Schwerpunkt liegt diesbezüglich bei der oberflächennahen Geothermie, d.h. der Erdwärmennutzung in den obersten 400 m, während die tiefe Geothermie nahezu ausschließlich für Großprojekte interessant ist.

Der Anstieg der Erdwärmennutzung wird durch die letztlich veröffentlichten Statistiken des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG, siehe Rumohr 2009) belegt. Beispielhaft wird hierzu auf Bild 1 verwiesen, aus dem der deutliche Anstieg der Genehmigungen von Erdwärmesondenanlagen in Hessen hervorgeht. Der überproportionale Wert für das Jahr 2006 mit darauffolgender Stagnation wird von Rumohr (2009) auf den allgemeinen Abwärtstrend im Eigenheimbau zurückgeführt; eine eventuelle Trendumkehr in Bezug auf die Geothermie ist hiervon nicht abzuleiten.

In dieser Statistik werden lediglich die Erdwärmennutzung über Erdwärmesonden dargestellt, weitere Nutzungsmöglichkeiten wie Erdwärmekollektoren, Spiralsonden oder Energiepfähle (Ennigkeit 2002) sind im Vergleich hierzu weniger bedeutsam.

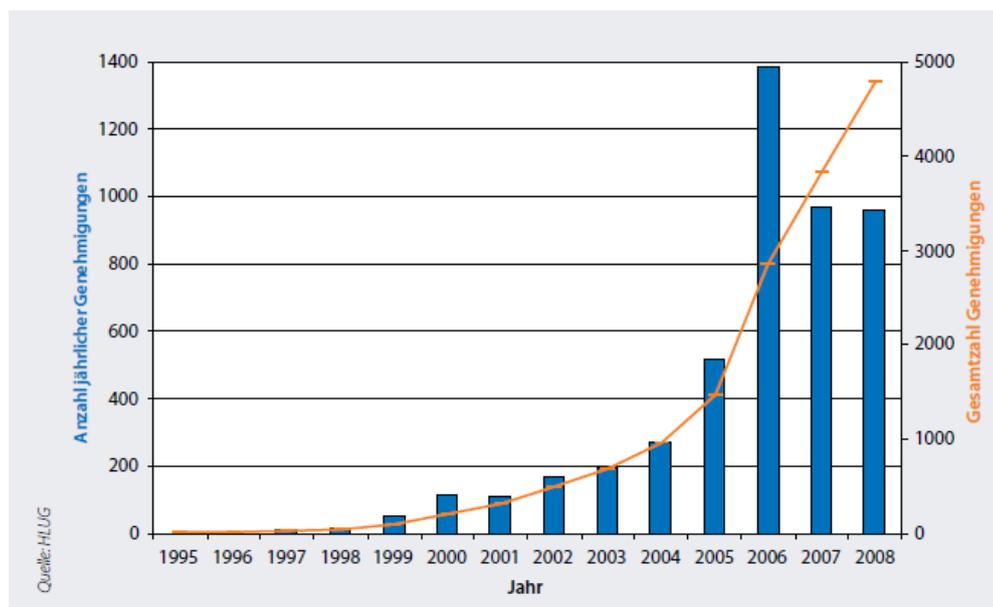


Bild 1 Zunahme der Anzahl jährlich genehmigter Erdwärmesondenanlagen in Hessen (Rumohr 2009)



2 Möglichkeiten der geothermischen Erkundung

Interessanterweise geht aus selber Statistik hervor, dass jeweils gut ein Viertel der Erdwärmesondenanlagen im betrachteten Zeitraum auf 100 m Sondentiefe und auf 50 W/m spezifische Entzugsleistung des Untergrundes ausgelegt wurden. Rumohr (2009) zieht sicherlich richtig den Schluss, dass ein Großteil der Erdwärmesondenanlagen überhaupt nicht oder nur „pi mal Daumen“ dimensioniert wurden.

Die Abschätzung der möglichen Entzugsleistung und damit die Qualität einer Dimensionierung einer Erdwärmesondenanlage hängt freilich von der Kenntnis der Baugrundverhältnisse ab. Die Erkundung dieser Verhältnisse kann theoretisch durch eine Erkundungsbohrung, Aufnahme der Bodenschichtungen und Festlegung von geothermischen Kennwerten erfolgen. Wegen der sehr hohen Kosten wird dies allenfalls im Einzelfall ausgeführt. In der Praxis erfolgt – sofern überhaupt – eine Standortbeurteilung jedoch i.d.R. über die Herstellung einer Pilotsonde mit anschließender Ausführung eines Geothermal Response Tests. Bezüglich der Entwicklungsgeschichte des Geothermal Response Tests wird auf Katzenbach et al. (2007) verwiesen.

Bei einem Geothermal Response Test wird ein Belastungsversuch an einer fertigen und gebrauchsfähigen Erdwärmesonde ausgeführt, indem über einen Zeitraum t ein konstanter Energieeintrag (oder alternativ -austrag) Q [W] in das SONDENSYSTEM erfolgt. Als zeitabhängige Messparameter werden die Temperaturen T_{in} und T_{out} [K] des in die Sonde ein- und ausströmenden Fluides erfasst.

In Bild 2 ist ein typischer Verlauf der Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer eines Geothermal Response Tests (im Rebstock-Gelände in Frankfurt am Main, siehe Beispiel in Abschnitt 4) dargestellt.

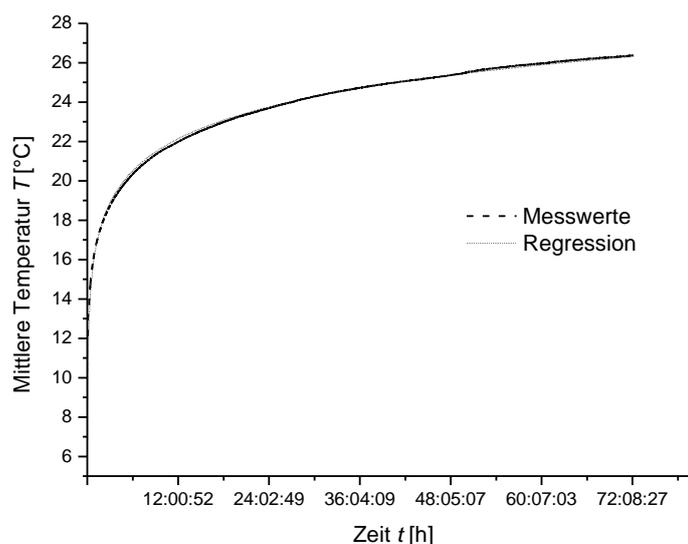


Bild 2 Zunahme der Temperatur während eines Geothermal Response Tests Projektbeispiel 2)



Die Regression erfolgt auf Basis der Kelvinschen Linienquellentheorie, die durch folgende Gleichung einen Bezug zwischen der Fluidtemperatur T_f , der Temperatur an der Bohrlochwandung T_b , dem Wärmeeintrag (/austrag) q , der Wärmeleitfähigkeit λ sowie der Zeit t herstellt:

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + qR_b \quad (1)$$

Weitere Größen in Gleichung (1) sind der thermische Bohrlochwiderstand R_b , die Konstante $\gamma \approx 0,577$, der Bohrdurchmesser r_b sowie die Temperaturleitfähigkeit a , die sich wiederum als Quotient aus der Wärmeleitfähigkeit λ und dem Produkt aus der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_p berechnet.

Über eine logarithmische Regression mittels des Ansatzes

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (2)$$

mit den Kurvenparametern k und m kann – bei Ansatz eines konstanten Wärmeeintrags – die effektive Wärmeleitfähigkeit berechnet werden:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{4\pi k} \quad (3)$$

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit dem Attribut „effektiv“ versehen, da sie eher als System- denn als Materialparameter zu verstehen ist und Eigenschaften der beprobten Sonde subsummiert und somit die Interaktion zwischen Sonde und umgebenden Baugrund berücksichtigt.

Eine neuere Vorgehensweise wurde in der Schweiz durch Rohner et al. (2004) begründet. Hierbei wird eine Temperatursonde durch eine fertiggestellte Erdwärmesonde geführt und dabei Druck und Temperatur in definierten Intervallen gemessen. Da über den hydrostatischen Druck die Tiefe bestimmt werden kann, ermöglicht die Auswertung des Versuchs die Erstellung eines Temperaturprofils über die Tiefe (siehe Bild 3).

Aus dem Temperaturprofil kann der Temperaturgradient

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

diskretisiert als Differenzenquotient über ein räumliches Messintervall i bestimmt werden:

$$\nabla T_i = \frac{T_{i,\text{unten}} - T_{i,\text{oben}}}{z_{i,\text{unten}} - z_{i,\text{oben}}} \quad (5)$$

Die zum betrachteten Intervall gehörige Wärmeleitfähigkeit λ_i wird dann unter Einbeziehung des örtlichen Wärmeflusswertes q_{loc} berechnet:

$$\lambda_i = \frac{q_{loc}}{\nabla T_i} \quad (6)$$

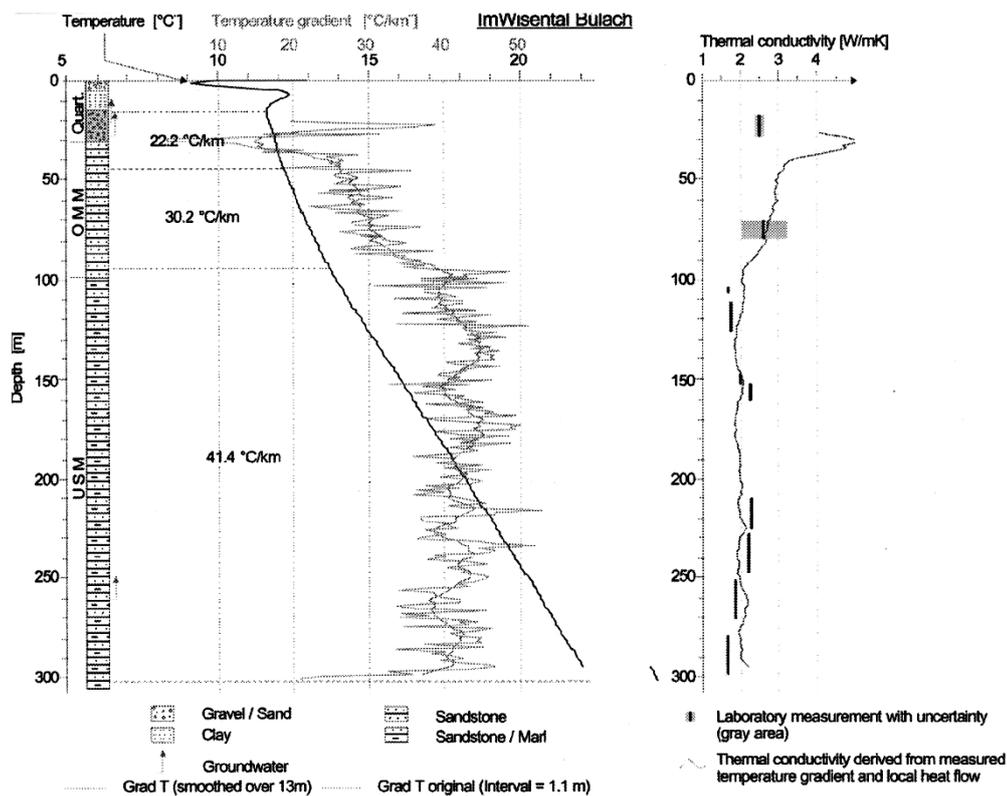


Bild 3 Auswertung einer Temperaturmessung (Rohner et al. 2004)

Gleichung (6) besagt, dass bei einer geringeren Zunahme der Temperatur mit der Tiefe eine höhere (und damit bessere) Wärmeleitfähigkeit zu verzeichnen ist. Dies ist logisch, da sich die Wärme praktisch nicht „aufstaut“, sondern durch das leitende Material gut abgeführt werden kann.

Rohner et al. (2004) belegen die Qualität der Methode durch Gegenüberstellung mit Laborversuchen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (siehe Bild 3).

Damit ergibt sich eine tiefenabhängige Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Gegenüber der aus dem Geothermal Response Test bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} hat diese Methode die Eigenschaft, dass keine nennenswerten Effekte aus der Sondenherstellung im Messergebnis einfließen.



Der eindeutige Nachteil liegt darin, dass der örtliche Wärmefluss q_{loc} bekannt sein muss. In der Schweiz sind diesbezüglich große Teile des Landes kartiert, während dies in Deutschland nicht in dieser Qualität der Fall ist.

3 Projektbeispiel 1: Verwaltungsgebäude Rebstock

In Frankfurt am Main wurde 2003 ein Verwaltungsgebäude im neuen Rebstockgelände fertiggestellt (siehe auch Bild 5). Zur Versorgung des Gebäudes mit Wärme im Winter und Kälte im Sommer galt es, eine Erdwärmesondenanlage zu entwerfen. Die gesamte Heizleistung beläuft sich auf 196 kW. Der Kälte- und Wärmebedarf hebt sich über das Jahr auf (Bild 4).

Die effektive Wärmeleitfähigkeit wurde mittels eines Geothermal Response Tests an einer 60 m langen Pilotsonde zu $\lambda_{eff} = 2,3 \text{ W/(mK)}$ bestimmt, was einen recht guten Wert darstellt. Die mittlere Leistung beträgt 57,6 W/m. Damit wurde das Sondenfeld auf 68 Erdwärmesonden mit einer Länge von 60 m dimensioniert. Die Länge von 60 m ergab sich aus der damals geforderten Begrenzung durch die genehmigende Behörde.

Für weitere Details wird auf Früchtenicht und Saleski (2007) verwiesen.

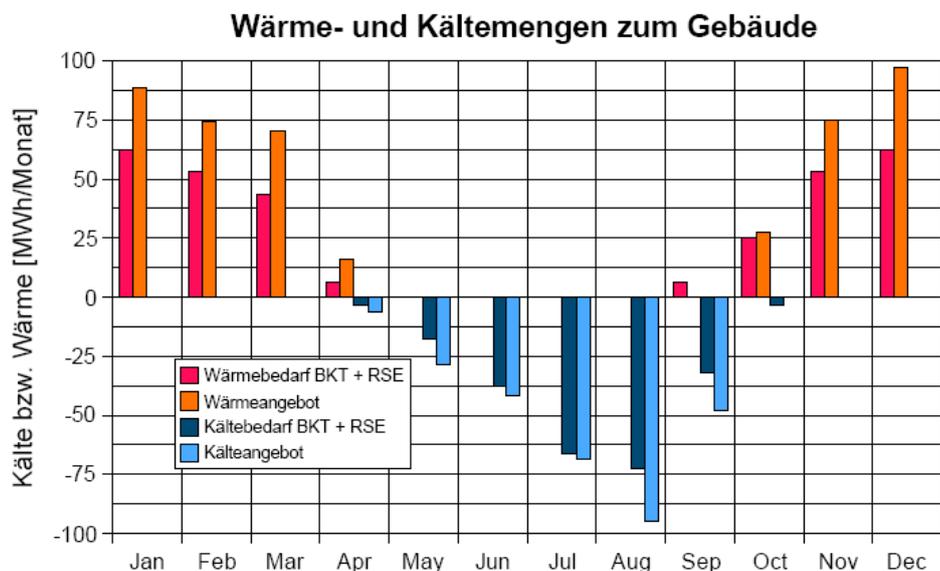


Bild 4 Wärme- und Kältebedarf des Verwaltungsgebäudes

4 Projektbeispiel 2: Wohngebäude Rebstock

Für dieses Wohnbauprojekt, ebenfalls im Frankfurter Rebstockgelände gelegen, wird eine kombinierte Wärmeversorgung aus Fernwärme und Erdwärme realisiert. Mit Hilfe der Geothermie wird auch hier gleichzeitig die Kühlung des Gebäudes im Sommer ermöglicht. Zur Dimensionierung der Erdwärmesondenanlage wurde ein Geothermal Response Test ausgeführt, der durch in-situ-Temperaturmessungen vor und nach der Versuchsdurchführung ergänzt wurde.

Ursprünglich war eine Bohrtiefe von 150 m für die Erdwärmesonden anvisiert. Aufgrund von sich in Sondierungsgesprächen mit den zuständigen Behörden abzeichnenden Einwände gegen diese großen Bohrtiefe wurde die Pilotsonde im Frühjahr 2009 mit einer Länge von 100 m hergestellt und an dieser ein Response Test ausgeführt.

Das für den Response Test benutzte Gerät ist in Bild 5 aufgenommen. Im Hintergrund, nur durch eine Straße getrennt, sieht man das im vorigen Kapitel vorgestellte Präzedenzprojekt.

In Bild 2 ist der Temperaturverlauf über die Versuchsdauer mit dem Regressionsergebnis dargestellt. Der Test ergab eine effektive Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{eff}} = 1,6 \text{ W/(mK)}$, was erstaunlich war, da nur ca. 150 m entfernt bei dem Verwaltungsgebäude eine mit $\lambda_{\text{eff}} = 2,3 \text{ W/(mK)}$ deutlich höhere Leitfähigkeit ermittelt wurde. Wegen der bei beiden Projekten durchgeführten Qualitätssicherung werden Effekte aus der Sondenherstellung als Ursache für die Diskrepanz ausgeschlossen.



Bild 5 Response Test-Gerät zur Untersuchung beim Wohngebäude mit dem Verwaltungsgebäude im Hintergrund

Da in Ergänzung zum Response Test eine Temperaturmessung ausgeführt wurde, konnte hier die Lösung gefunden werden.

Der Temperaturverlauf über die Tiefe ist in Bild 6 dargestellt. Ab dem oberflächennahen, klimatisch sowie durch das Grundwasser beeinflussten Bereich bis ca. 35 m Tiefe folgt eine weitestgehend stetige, aber geringe Zunahme der in-situ-Temperatur. Ab ca. 75 m Tiefe nehmen

die Temperaturen schließlich bis zur Endtiefe überproportional zu, so dass hier ein deutlich höherer Temperaturgradient vorliegt.

Da gemäß den in Kap. 2 dargestellten Beziehungen die Wärmeleitfähigkeit indirekt proportional zum Temperaturgradienten ist (Gleichung 6), liegt im Tiefenbereich zwischen ca. 35 m und 75 m ein thermisch günstiger Boden mit hoher Wärmeleitfähigkeit vor, während ab eben 75 m Tiefe mit einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit zu rechnen ist. Die obersten Baugrundzonen werden wegen der dortigen Grundwasser-durchströmung sowieso als recht günstig eingestuft.

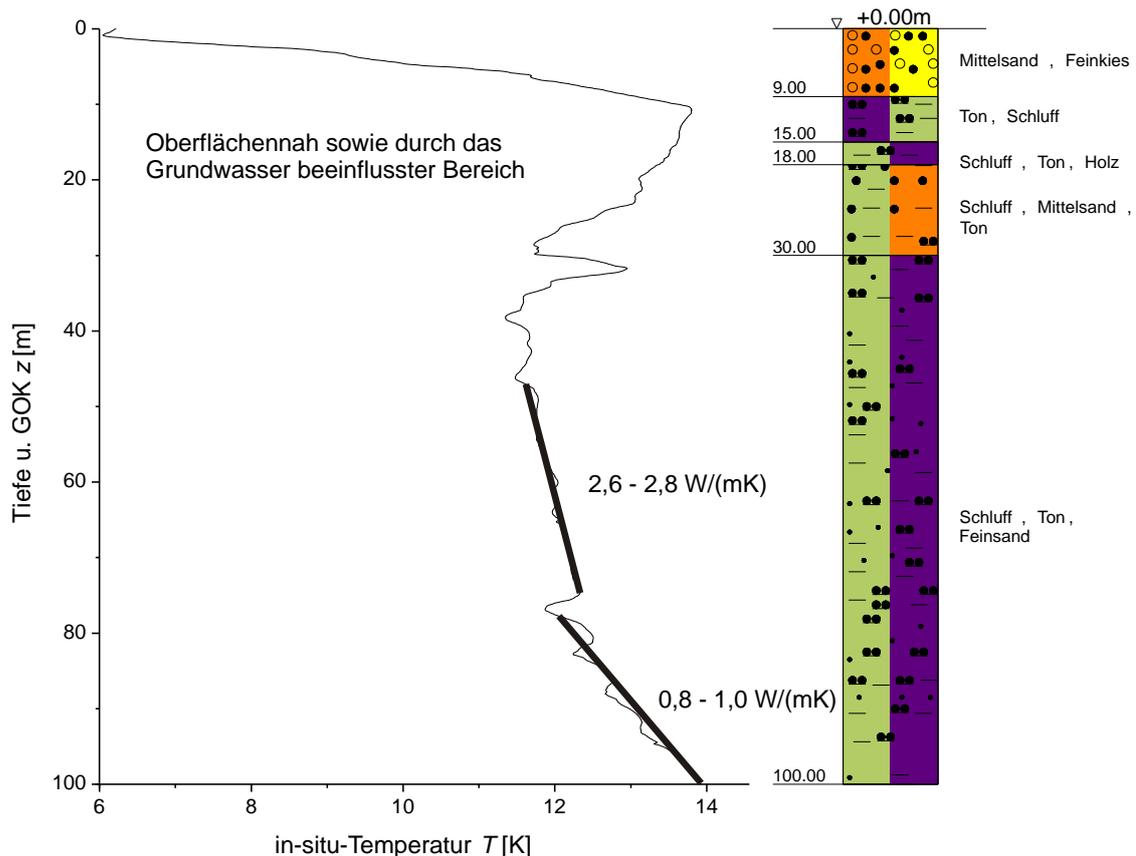


Bild 6 Temperaturkurve über die Sondentiefe beim Wohngebäude und Bohrprofil

Mit einem geschätzten lokalen Wärmefluss von $q_{\text{loc}} = 0,07 \text{ W/m}^2$ (aus dem für nachfolgend erwähnte Simulation benutzten Programm EED) erhält man je nach Art und Weise der Differentiation für den Bereich zwischen 35 m und 75 m Tiefe eine effektive Wärmeleitfähigkeit von ca. $\lambda_{\text{eff}} = 2,6 - 2,8 \text{ W/(mK)}$, während sich für den ungünstigeren Bereich darunter etwa $\lambda_{\text{eff}} = 0,8 - 1,0 \text{ W/(mK)}$ ergeben.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit aus dem Versuch stellt somit einen gewichteten Mittelwert der Eigenschaften der einzelnen Bereiche dar.

In Bild 6 ist ebenfalls das aufgenommene Bohrprofil dargestellt. Demnach handelt es sich ab 18 m Tiefe um eine Wechsellage aus tertiären Schluffen, Tonen und Sanden, die leider aufgrund



der verfahrensbedingt schlechten Qualität der Probengewinnung beim Spülbohren nicht weiter differenziert werden konnten. Aus dem Bohrprofil kann insofern keine Übereinstimmung mit o.g. thermischer Diskontinuität festgestellt werden.

Da die Sonden beim Verwaltungsgebäude (ohne Kenntnis o.g. Baugrundbedingungen) nur 60 m lang waren, liegen sie damit durchweg im geothermisch günstigen Bereich ab 75 m Tiefe. Die um 40 m längere Pilotsonde des Wohnbauprojektes dagegen erschließt somit eine unterproportional höhere Entzugsleistung.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Ansatz der beim Verwaltungsgebäude ermittelten Wärmeleitfähigkeit (die für den neuen Standort noch durch einen erneuten Test zu verifizieren wäre) erbrachte die in Tab. 1 dargestellten Gesamtmeter für Sonden mit 75 m und 100 m Länge. Die Berechnungen wurden mit dem Programm EED (2009) ausgeführt.

Sondentiefe [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Anzahl Sonden [-]	Gesamtlänge [m]
75	2,3	27	2025
100	1,6	24	2400

Tab. 1 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit unterschiedlichen Sondenlängen

Durch eine Verkürzung der Einzelsonden auf 75 m könnten somit insgesamt 375 m Erdwärmesonden eingespart werden.

Leider konnte die damit erforderliche höhere Anzahl an Sonden im vorliegenden Fall nicht in den verbleibenden Freiflächen angeordnet werden. Eine Anordnung unter Gründungsplatte war wegen der hierfür ungünstig hohen Grundwasserstände ausgeschlossen werden, so dass als einzige Lösung die Inkaufnahme der geringen Wirtschaftlichkeit der Sondenanlage übrig blieb.

4 Schlussbemerkung

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, mit welcher Methodik die Aussagekraft des Geothermal Response Tests weiter ausgebaut werden kann.

Bei zwei unmittelbar benachbarten Bauprojekten im Frankfurter Rebstockgelände wurde je ein Geothermal Response Test an unterschiedlich langen Pilotsonden ausgeführt. In 2003 wurde an einer 60 m langen Sonde eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit (und damit mögliche Entzugsleistung) festgestellt als bei der in 2009 betesteten, 100 m langen Sonde.

Da bei der Betestung der 100 m-Sonde vorab eine Messung der in-situ-Temperatur ausgeführt wurde, konnte damit eine tiefenbereichsabhängige Verteilung der Wärmeleitfähigkeit im Baugrund festgestellt werden: Bei ca. 75 m Tiefe ist eine praktisch sprungartige Abnahme der



Wärmeleitfähigkeit zu verzeichnen, so dass die Mehrmeter der längeren Sonde nur eine geringe Mehrleistung ermöglichen.

Eine begleitende Temperaturmessung fällt wirtschaftlich angesichts der vergleichsweise hohen Kosten für die Herstellung der Pilotsonde und des Response Tests nicht ins Gewicht. Die Erhöhung des Informationsgehalts kann jedoch zu spürbar wirtschaftlicheren Entwürfen führen.

Der Informationsgewinn wird noch größer, wenn für den ingenieurpraktischen Einsatz verwertbare Kartierungen des Wärmeflusses herangezogen werden können, wie dies in der Schweiz bereits der Fall ist. Hier herrscht eindeutig Forschungsbedarf.

Literatur

EED (2009)

Earth Energy Designer, Version 3.13, www.buildingphysics.com

Ennigkeit, A. (2002)

Energiepfahlanlagen mit Saisonalem Thermospeicher. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 60, 2002

Früchtenicht, H. Saleski, S (2007)

Heizen und Kühlen mit der Geothermie, VBI Nachrichten

Katzenbach, R., Clauß, F., Waberseck, T., Vogler, M., Adamietz, U. (2007)

Aktuelle Entwicklungen bei Energiepfahl- und Erdwärmesondenanlagen, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 76, 2007, S. 129-151

Rohner, E., Rybach, L., Schärli, U. (2004)

Neue Methode zur in-situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern, Die neue Rolle der Geothermie mit 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, S. 324-328

Rumohr, S. (2009)

Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Hessen – Zahlen und Kenngrößen, bbr 03/2009