

Versuchsaufbau für einen Enhanced Geothermal-Response-Test



Der Enhanced-Geothermal-Response-Test als Auslegungsgrundlage und Optimierungstool

Geothermische Standorterkundung ■ Für die Planung und Auslegung von größeren Erdwärmesonden-Anlagen ist eine geothermische Standorterkundung erforderlich. Zur Bestimmung der geothermischen In-situ-Parameter hat sich in den letzten Jahren der Geothermal-Response-Test (GRT) auf dem Markt etabliert. Nachfolgend wird der sogenannte Enhanced (erweiterte) Geothermal-Response-Test (EGRT), eine Weiterentwicklung des klassischen GRT, vorgestellt. Der Versuchsaufbau und die theoretischen Grundlagen des EGRT werden beschrieben und seine Vorteile anhand von Praxisbeispielen erläutert.

Für die Auslegung und den wirtschaftlichen Betrieb von Erdwärmesonden-Anlagen ist die Kenntnis der geothermischen Untergrundparameter die entscheidende Größe. Bei kleineren Anlagen können diese noch abgeschätzt oder aus Erfahrungswerten und Tabellen [1, 2]

übernommen werden, sofern in der Auslegung der Anlage entsprechende Sicherheiten bezüglich der Ungenauigkeit dieser Parameter eingeplant werden. Bei größeren Anlagen ist deren möglichst genaue Kenntnis unerlässlich, da die parameter- und standortspezifischen Schwankungsbreiten der Pa-

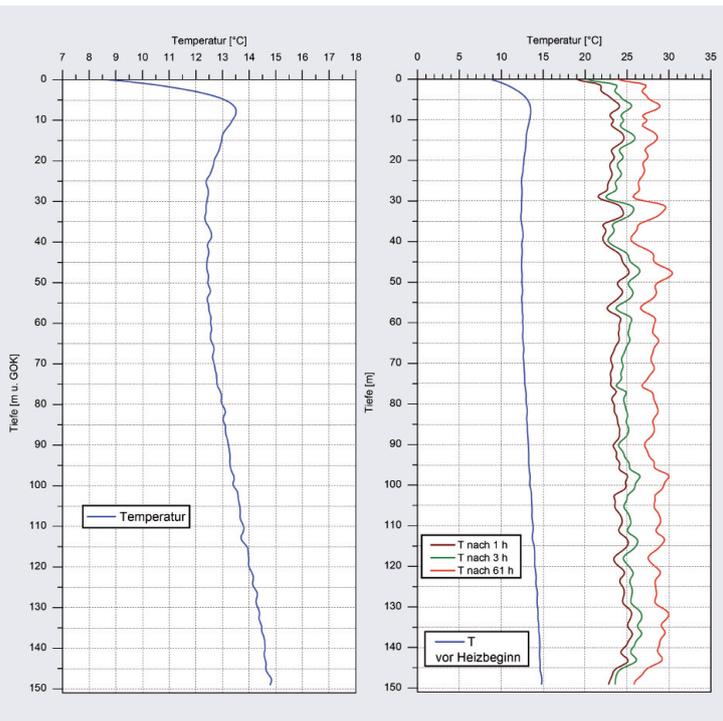


Abb. 1 Messergebnisse eines EGRT an einer 150 m tiefen Erdwärmesonde. Links: Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur. Rechts: Temperaturprofile während der Heizphase

parameter bei Unterdimensionierung zu erhöhten Betriebskosten, Schäden an der Anlage und dem Gebäude, z. B. durch Frosthebung, und zu einem temporären oder Totalausfall der Anlage führen können. Andererseits führt eine Überdimensionierung durch die relativ hohen Herstellungskosten von Erdwärmesonden zu einer falschen Wirtschaftlichkeitsberechnung und damit u. U. zu einem völlig unberechtigten Ausscheiden der Planungsvariante „Erdwärmesonden-Anlage“ bereits in einer frühen Planungsphase.

Im Rahmen der Vor- oder Entwurfsplanung ist daher eine geothermische Standorterkundung mit Pilotbohrung und Geländeversuchen zur Erkundung der geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Standortgegebenheiten erforderlich. Die Pilotbohrung wird als Erdwärmesonde ausgebaut und später in das zu planende Erdwärmesonden-Feld integriert. Die systemrelevanten und mit Geländeversuchen nach Möglichkeit zu bestimmenden Parameter sind:

- die ungestörte Untergrundtemperatur T_m [°C],
- die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m x K)] des Untergrundes,
- der Bohrlochwiderstand R_b [K / (W / m)],
- die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität $\rho \times c_p$ [J / m³ x K] und
- die Grundwasserabstandsgeschwindigkeit v_a [m/s].

Hierfür wurden in den letzten Jahren verschiedene Messverfahren entwickelt, die mit unterschiedlichen Mess- und Auswertemethoden meist nur eine bestimmte Auswahl dieser Parameter bestimmen. Direkt messen lassen sich lediglich die Parameter „Temperatur“ und „Heizleistung“ an den jeweils

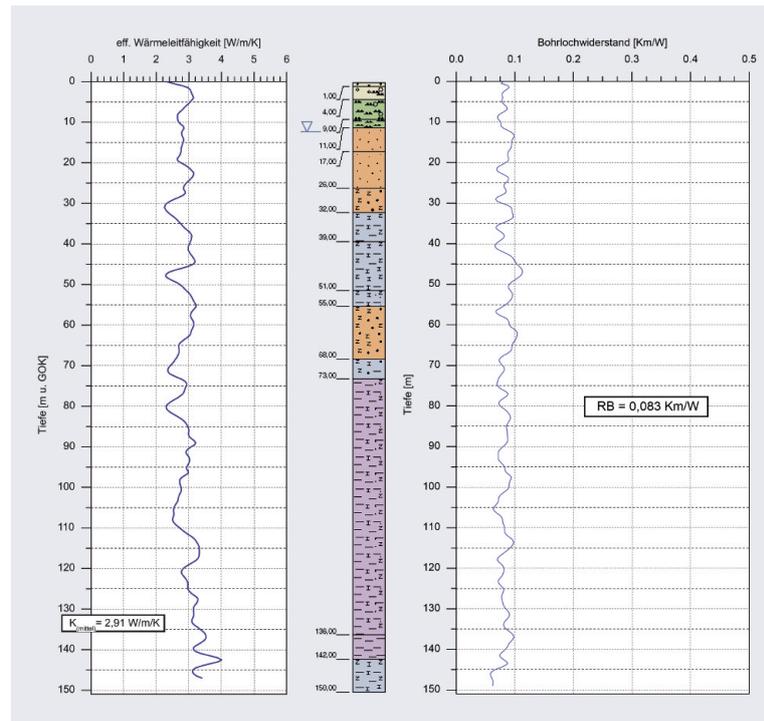


Abb. 2 Ausgewertete Messergebnisse des EGRT mit Bohrprofil. Links: Tiefenprofil der berechneten Wärmeleitfähigkeit. Rechts: Tiefenprofil des berechneten Bohrlochwiderstands

verfahrenstypischen Messpunkten. Anhand von physikalischen und mathematischen Modellen werden daraus die geothermischen Kennwerte abgeleitet. Je nach Messverfahren werden die Kennwerte entweder über die gesamte Erdwärmesondenlänge gemittelt, punktuell in bestimmten Tiefen oder als Funktion der Tiefe bestimmt. Neben unterschiedlichen Messgeräten, Messmethoden und Messverfahren werden auch unterschiedliche mathematische Auswerteverfahren und unterschiedliche physikalische Modelle verwendet. Mit dem seit einigen Jahren auf dem Markt etablierten klassischen Geothermal-Response-Test (GRT, auch TRT genannt) lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und der Bohrlochwiderstand als gemittelter Wert über die gesamte Erdwärmesondenlänge bestimmen. Je nach Auswerteverfahren kann auch die gemittelte volumenbezogene spezifische Wärmekapazität bestimmt werden. Die gemittelten Werte ►

Beratende Geowissenschaftler und Sachverständige für Geothermie und Umweltschutz

tewag
 Technologie - Erdwärmeanlagen - Umweltschutz GmbH
 Blumenstraße 24
 93055 Regensburg

Tel.: 0941-20863360
 Fax: 0941-20863369
 info@tewag.de
 www.tewag.de

Beratung

Messung

Gutachten

Planung

Geologische Erstinschätzung

Machbarkeitsstudien, Modellierungen (FEM)

Thermal Response Test, Temperaturlogs

Auslegung, Planung, Projektüberwachung

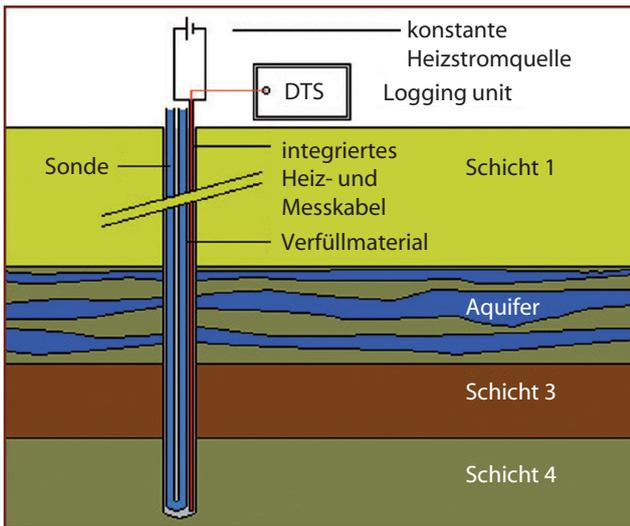


Abb. 3 Schematischer Versuchsaufbau für einen Enhanced Geothermal-Response-Test

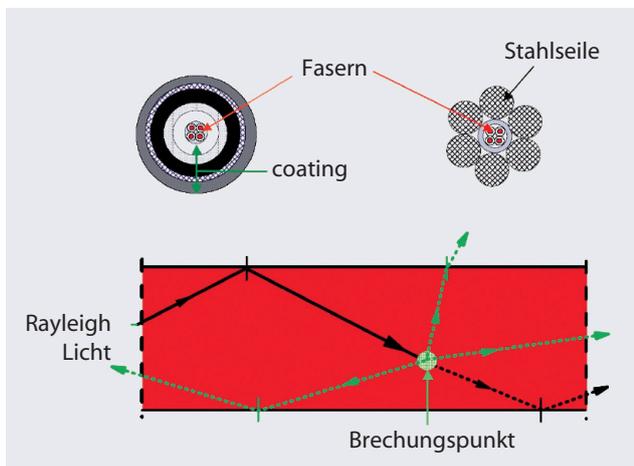


Abb. 4 Schematische Darstellung unterschiedlicher Kabelaufbauten (oben). Schematische Darstellung der Streuung bzw. Reflexion eines optischen Signals in einer Glasfaser (unten)

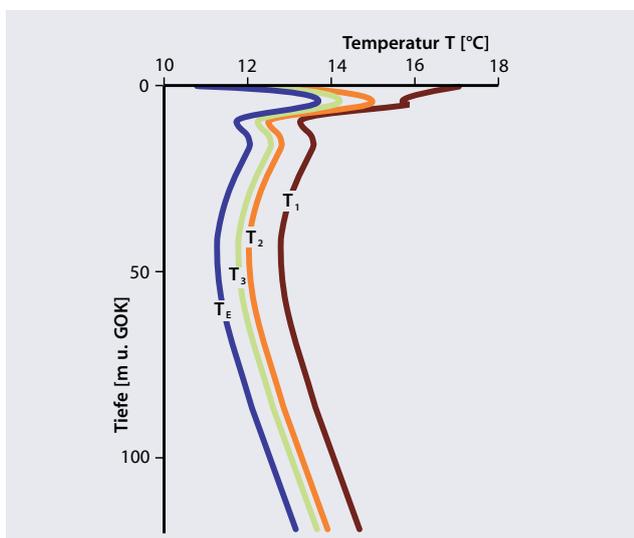


Abb. 5 Drei ausgewählte Temperatur-Tiefenprofile T_1 , T_2 und T_3 nach Ende der Bohrarbeiten und die berechnete, korrigierte ungestörte Bodentemperatur T_E

können für bestimmte Bauvorhaben völlig ausreichend sein. Häufig bieten jedoch die Standortgegebenheiten und die gebäudetechnischen Erfordernisse ein enormes Potenzial an technischen und wirtschaftlichen Optimierungsmöglichkeiten, die eine andere Qualität der geothermischen Daten erfordern. Nachfolgend wird daher als logische Konsequenz eine Weiterentwicklung des klassischen GRT, der sogenannte Enhanced (erweiterte) Geothermal Response Test (EGRT) vorgestellt.

Theoretische Grundlagen und Messprinzip des EGRT

Der Enhanced Geothermal Response Test (EGRT) basiert ebenso wie der klassische GRT auf dem Nadelsonden- bzw. Zylinderquellenverfahren zur In-situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [3, 4, 5, 6]. Während beim GRT lediglich gemittelte Werte bestimmt werden, liefert der EGRT jeweils Tiefenprofile der Temperatur (Abb. 1), der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes (Abb. 2 links) und des Bohrlochwiderstandes (Abb. 2 rechts).

Für die Durchführung eines EGRT wird ein Hybridkabel, bestehend aus mindestens einer Kupferader, mindestens einer Glasfaser und einer Zentralader als Zugentlastung, in Form einer Schleife mit den Doppel-U-Rohren (Erdwärmesonde) bzw. einer Koaxialsonde bei der Pilotbohrung in den Untergrund eingebracht (Abb. 3). Vor Beginn der Messung muss das Temperaturfeld der Bohrung und des umgebenden Untergrundes in einem ungestörten stationären Zustand und die Erdwärmesonde mit Wasser gefüllt sein. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit muss das Wärmeträgermedium ruhen. Optionale spätere Messungen von Temperaturprofilen können auch bei laufender Umwälzpumpe im Betrieb der Erdwärmesonden-Anlage durchgeführt werden. Ein gestörtes Temperaturfeld kann z. B. durch den Bohrvorgang selbst, die Zirkulation der Spülflüssigkeit beim Bohren, die Wärmeproduktion beim Abbinden des Verfüllmaterials oder durch die Befüllung der Erdwärmesonde entstehen.

Die Kupferadern werden als Heizdrähte verwendet, mit den Glasfasern kann während der gesamten Versuchsdauer an jedem Punkt des Kabels die Temperatur gemessen werden. Der Wärmeeintrag in den Untergrund erfolgt durch das Aufheizen der Kupferadern, indem diese an eine Konstantstromquelle angeschlossen werden. Die vom Kupferkabel an die Umgebung abgegebene definierte Leistung in Form von Wärme ist damit über die gesamte Länge des Kabels (der Bohrung) pro Längenabschnitt konstant (Heat-Pulse-Methode). Die Eindringtiefe der durch das Anlegen der Heizspannung erzeugten Wärmefront ist eine Funktion der Heizdauer. Entlang des Glasfasermesskabels kann über dessen ganze Länge die Temperatur an jedem Ort zu jeder Zeit mittels des faseroptischen Temperaturmessverfahrens (DTS: distributed temperature sensing) unter Verwendung eines Lasers bestimmt werden. Unter Zugrundelegung der Linien- bzw. Zylinderquellentheorie kann damit die Verteilung der thermischen Materialparameter, die ungestörte Untergrundtemperatur, die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und der Bohrlochwiderstand der Erdwärmesonde als Funktion der Tiefe entlang der Messstrecke bestimmt werden.

Faseroptisches Temperaturmessverfahren

Ein energiereicher Laser sendet ein definiertes optisches Signal in eine Glasfaser, das dann entlang seiner gesamten Lauflänge reflektiert wird. Die zurückgestreuten Signale können hinsichtlich ihrer Frequenzverteilung analysiert werden (Abb. 4). Diese lässt sich in einen „Raleigh“- und in einen „Raman“-Anteil unterscheiden. Die beiden Komponenten des „Raman“-Anteils, das „Stokes-Licht“ und das „Anti-Stokes-Licht“, sind hinsichtlich ihres Frequenzspektrums abhängig von der Temperatur am Ort der Reflexion in der Glasfaser [7]. Eine Frequenzanalyse ermöglicht demnach eine vergleichsweise genaue Bestimmung der Temperatur am Ort der Reflexion. Die Lagebestimmung wird durch eine sehr exakte Messung der Reflexionszeiten, unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit in der Glasfaser, durchgeführt.

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Theorie zur Auswertung der $T(t)$ -Messkurven ist in [8] ausführlich behandelt. Nachfolgend wird lediglich die Lösung der Wärmeleitungsgleichung für den Temperaturverlauf einer Linienquelle angegeben:

$$\text{Für } \frac{\kappa \cdot t}{r^2} \gg 1 \text{ oder } \frac{\kappa \cdot t}{r^2} \geq 5 \text{ gilt:} \quad (1)$$

$$T(r, t) = \frac{q_L}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \kappa \cdot t}{r^2} \right) - \gamma \right) + T_0 \quad (2)$$

mit:

$T(r, t)$ = Temperatur der Linienquelle (LWL-Kabel)

r = Entfernung zur Linienquelle

t = Zeit seit Anschalten der Quelle

q_L = Heizleistung pro Längeneinheit

π = Pi

κ = Temperaturleitfähigkeit

λ = Wärmeleitfähigkeit

γ = Eulersche Konstante

T_0 = Ungestörte Bodentemperatur

Wird Gleichung (1) zur Berechnung der Temperatur des Fluids innerhalb des Sondenrohres einer EWS verwendet, so berechnet man die Temperatur am Bohrlochrand ($r = r_B$) und addiert den Effekt des Bohrlochwiderstandes hinzu. Die Temperatur des Fluids als Funktion der Zeit kann dann folgendermaßen beschrieben werden:

$$T_F(t) = \frac{q_L}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \kappa \cdot t}{r^2} \right) - \gamma \right) + q_L \cdot R_B + T_0 \quad (3)$$

mit:

r = Bohrradius

R_B = Bohrlochwiderstand

T_0 = Ungestörte Bodentemperatur

In der Praxis berechnet sich die längennormierte Heizleistung zu:

$$q_L = \frac{R \cdot I^2}{L} \quad (4)$$

mit:

R = Widerstand des Heizdrahtes

I = konstanter Heizstrom

L = Länge des beheizten Kabels

Die angegebene Lösung der Wärmeleitungsgleichung bezeichnet man als Langzeitlösung für eine ideale Linienquelle in einem homogenen, isotropen Medium. Den Messfehler bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, aufgrund der Abweichung der tatsächlichen Gegebenheiten von den theoretischen Voraussetzungen, einschließlich der Messungenauigkeiten gibt [9] kleiner als $\pm 15\%$ an. Die Wärmeleitfähigkeits-Messungen werden – als „einfachste“ Auswertemöglichkeit – nach der oben angegebenen Langzeitlösung wie folgt ausgewertet: Trägt man die mit der optischen Faser gemessene Temperatur $T(t)$ über dem Logarithmus der Heizzeit ($\ln(t/t_0)$) auf, so erhält man eine Aufheizkurve, die für große Heizzeiten t in eine Gerade mit der Steigung $q_L / (4\pi\lambda)$ übergeht. Aus der Steigung dieser Geraden lässt sich die Wärmeleitfähigkeit λ des umgebenden Mediums berechnen:

$$\frac{q_L}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} = \frac{T(t_2) - T(t_1)}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{q_L}{4\pi} \cdot \frac{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}{T(t_2) - T(t_1)} \quad \text{mit } t_2 > t_1 \quad (6)$$

Da die Heizleistung durch die Messung von Heizstrom und elektrischem Widerstand bekannt ist, kann damit die Wärmeleitfähigkeit λ an jedem Punkt der Messstrecke berechnet werden. Nach Abschalten der Heizquelle verteilt sich die eingebrachte Energie in der Umgebung und die Temperaturen gleichen sich wieder an den ungestörten Ausgangszustand an. Da die konduktive Wärmeleitung aus Potenzialen abgeleitet werden kann, gilt hier das Superpositionsprinzip und die Gleichung für den Relaxationsprozess kann aus der Lösung für den Temperaturverlauf einer Linienquelle entwickelt werden.

$$\text{Für } t > t_h \text{ und } \frac{\kappa \cdot (t - t_h)}{r^2} \gg 1 \text{ gilt:} \quad (7)$$

$$T(t) = \frac{q_L}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \left(\frac{t}{t - t_h} \right) \quad (8)$$

t_h = Länge des Heat-Pulses

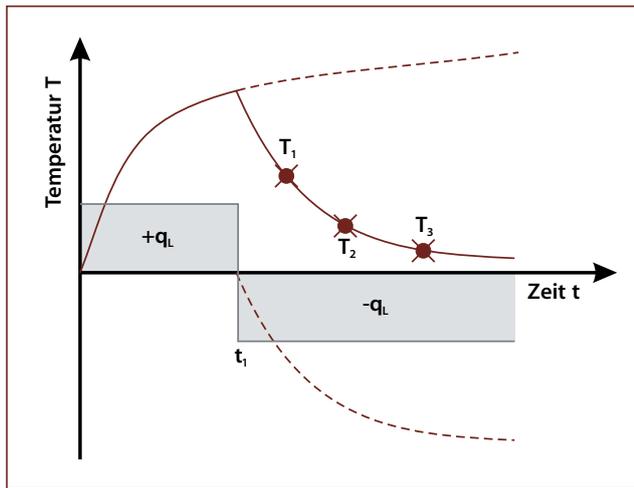


Abb. 6 Beschreibung des Relaxationsprozesses mit den drei Einzelmessungen T_1 , T_2 und T_3 durch Superposition der Quellen $+q_L$ und $-q_L$

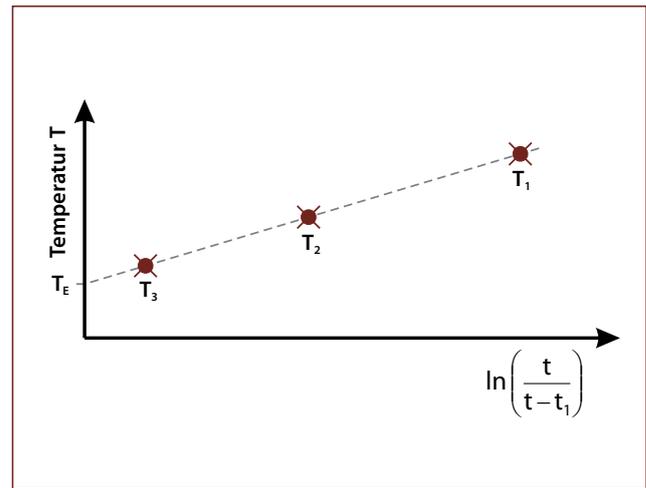


Abb. 7 Bestimmung der ungestörten Bodentemperatur T_E

Werden die registrierten Temperaturen des Relaxationsvorgangs über $\ln(t/(t-t_1))$ aufgetragen, so kann aus der Steigung dieser Geraden ebenfalls die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Der Bereich des Bodens, der von der Temperaturstörung betroffen ist, breitet sich nach folgender Gleichung aus:

$$r = \sqrt{\frac{4}{e^{\gamma}} \cdot \kappa \cdot t} \approx 1,5 \cdot \sqrt{\kappa \cdot t} \quad (9)$$

e = Eulersche Zahl

Bei einer angenommenen Diffusivität (Temperaturleitfähigkeit) des Bodens von $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ist nach der Heizdauer von einem Tag bis in einer Entfernung von 0,62 m der Quelle das Erdreich von der Temperaturstörung betroffen. Nach einer Zeitdauer von sechs Tagen sind es etwa 1,53 m.

Relevanz, Bestimmung und Korrektur der ungestörten Untergrundtemperatur

Die Ermittlung des stationären ungestörten Temperatur-Tiefenprofils ist sowohl für die richtige Auswertung des EGRT (und auch GRT) als auch für die korrekte Auslegung der Erdwärmesonden-Anlage entscheidend.

Einfluss der gemessenen Untergrundtemperatur auf die Auswertung des EGRT/GRT

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass im Bereich der Erdwärmesonde ein stationäres ungestörtes Temperaturumfeld für die korrekte Auswertung des EGRT – das gilt auch

für den klassischen GRT – erforderlich ist. Um dies in der Praxis nach Möglichkeit zu erreichen, wird der klassische GRT mit möglichst großem zeitlichem Abstand nach Fertigstellung der Pilotbohrung gestartet. Dies sind in der Regel drei bis sieben Tage, eine Kontrolle, ob ein stationäres ungestörtes Temperaturumfeld auch tatsächlich erreicht wurde, ist jedoch nicht möglich.

Bei einem EGRT werden vor der Aufheizphase bereits kontinuierlich Temperaturprofile gemessen, um das Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur zu ermitteln. Durch den Vergleich mehrerer Temperatur-Tiefenprofile ist festzustellen, ob sich das Umfeld der Erdwärmesonde bereits im thermischen Gleichgewicht befindet oder nicht (**Abb. 5**). Ist das nicht der Fall, so kann unter Zugrundelegung einfacher Annahmen die weitere Entwicklung des Temperaturprofils bis hin zur Gleichgewichtstemperatur (Equilibriumstemperatur) berechnet werden. Somit kann die gemessene Temperaturentwicklung während der Aufheizphase und damit das Ergebnis der daraus abgeleiteten Wärmeleitfähigkeit korrigiert werden.

Zur Herleitung der physikalischen Beschreibung werden folgende Annahmen getroffen: Die Bohrung wurde vom Zeitpunkt t_0 bis zum Zeitpunkt t_1 mit einem konstanten Wärmefluss gestört (z. B. Hydratationswärme, die beim Abbinden des Verfüllbaustoffs freigesetzt wird). Mit der Anwendung des Superpositionsprinzips kann der nach Ende der Störung einsetzende Relaxationsprozess durch Zuschalten eines vom Betrag her gleichen, aber mit entgegengesetzten Vorzeichen behafteten Wärmeflusses beschrieben werden

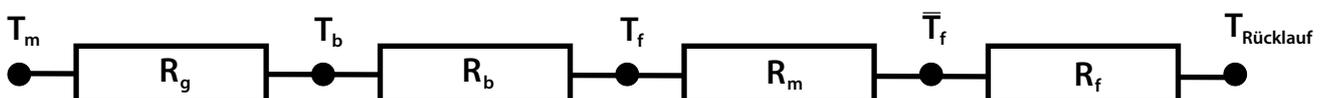


Abb. 8 Thermische Widerstände in einer Erdwärmesonde [10]

(Abb. 6). Wird die Langzeitnäherungslösung der Zylinder- oder Linienquelle für die Beschreibung des transienten Vorganges einer Wärmequelle angesetzt, so lautet mit Anwendung des Superpositionsprinzips die Lösung für den Relaxationsvorgang:

$$\text{Für } \frac{\kappa(t-t_1)}{r^2} \gg 1 \text{ und } t > t_1 \text{ gilt:} \quad (10)$$

$$T(t) = T_E + \frac{q_L}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{t}{t-t_1}\right)$$

mit:

T_E = Equilibriumstemperatur

Wird der gemessene Angleichvorgang entsprechend **Abbildung 7** aufgetragen, so lässt sich die Größe T_E auch ohne Kenntnis der Wärmemenge, mit der die Bohrung gestört wurde, bestimmen.

Einfluss der gemessenen Untergrundtemperatur auf die Auslegung

Die Ermittlung des korrekten Temperatur-Tiefenprofils bei einem ungestörten stationären Temperaturumfeld der Erdwärmesonde hat auch einen entscheidenden Einfluss auf die Dimensionierung der Erdwärmesonden-Anlage, da die ungestörte Jahresmitteltemperatur an der Erdoberfläche (T_{mo}) und der Temperaturgradient im unbeeinflussten Untergrund (ΔT_{Grad}) einen direkten und signifikanten Einfluss auf die z. B. mit Earth Energy Designer (EED) oder dem Programm EWS berechneten Temperaturen des Wärmeträgermediums beim Betrieb der Erdwärmesonden-Anlage haben. Dies lässt sich anhand der analytischen Erdwärmesondengleichung einfach erläutern. Nach [10] lässt sich die analytische Erdwärmesondengleichung vereinfacht u. a. als eine Addition von thermischen Widerständen wie folgt beschreiben:

$$T_{Quelle} = T_m - (R_g + R_b + R_m - R_f) \cdot \dot{q} \quad (11)$$

$$T_{Rücklauf} = T_m - (R_g + R_b + R_m + R_f) \cdot \dot{q} \quad (12)$$

und wie in **Abbildung 8** vereinfacht grafisch darstellen.

T_{Quelle} = Quellentemperatur (Temperatur des ausströmenden Sondenfluids)

$T_{Rücklauf}$ = Rücklauftemperatur (Temperatur des einströmenden Sondenfluids)

T_b	= Bohrlochtemperatur
T_f	= mittlere Fluidtemperatur in der Tiefe $\frac{H}{2}$
\bar{T}_f	= mittlere Fluidtemperatur im Verdampfer
T_m	= ungestörte Untergrundmitteltemperatur in der Tiefe $\frac{H}{2}$
H	= Erdwärmesondenlänge, Bohrtiefe
R_b	= thermischer Bohrlochwiderstand (von Fluid bis Bohrradius) in der Tiefe $\frac{H}{2}$
R_f	= thermischer Verbraucherwiderstand
R_g	= Wärmewiderstand des Untergrundes
R_m	= thermischer Transportwiderstand zwischen der Tiefe $\frac{H}{2}$ und der Oberfläche
\dot{q}	= spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge

Durch verschiedene Umformungen erhält man nach [10] die ausführliche analytische Erdwärmesondengleichung (siehe Gleichungen 13, 14)

mit:

T_{mo} = Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche

ΔT_{Grad} = Temperaturgradient im unbeeinflussten Untergrund

R_a = Wärmeübergangswiderstand vom Fluid zum Sondenrohr

g = dimensionslose Temperatursprungantwort des Untergrundes Erde nach Eskilson

λ_{Earth} = Wärmeleitfähigkeit der Erde (des umgebenden Untergrundes)

cp_{Sole} = spezifische Wärmekapazität des Sondenfluids

\dot{m} = Massenstrom, Sondendurchsatz

In den Gleichungen 11 und 12 ist es mit T_m die ungestörte Untergrundmitteltemperatur in der Tiefe $H/2$ und in den Gleichungen 13 und 14 ist es entsprechend mit T_{mo} die ungestörte Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche, welche den berechneten Kurvenverlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen des Wärmeträgermediums über die Betriebszeit in Form eines linearen Offsets entscheidend beeinflussen. Eine um 1 K zu hoch oder zu niedrig angenommene Untergrundtemperatur verschiebt den berechneten Kurvenverlauf des Wärmeträgermediums um entsprechend diesen Betrag, sodass bei falsch ermittelten Werten die Erdwärmesonden-Anlage entsprechend über- oder unterdimensioniert wird. Ebenso lässt sich aus dem gemessenen Temperaturprofil des ungestörten Untergrundes (**Abb. 1**) auch der für die Anlagenauslegung

$$T_{Quelle} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t,r)}{2\pi\lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} - \frac{H}{2\dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \cdot \dot{q} \quad (13) \quad (13)$$

$$T_{Rücklauf} = T_{mo} + \Delta T_{Grad} \cdot \frac{H}{2} - \left[\frac{g(t,r)}{2\pi\lambda_{Earth}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot cp_{Sole}^2} + \frac{H}{2\dot{m} \cdot cp_{Sole}} \right] \cdot \dot{q} \quad (14) \quad (14)$$

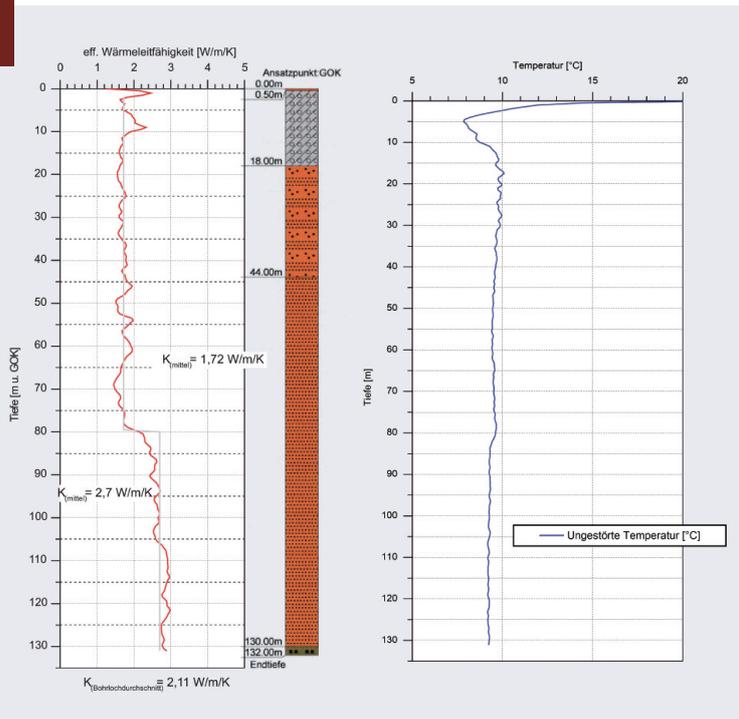


Abb. 9 Messergebnisse eines EGRT
 Links: Tiefenprofil der berechneten Wärmeleitfähigkeit
 Rechts: Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur

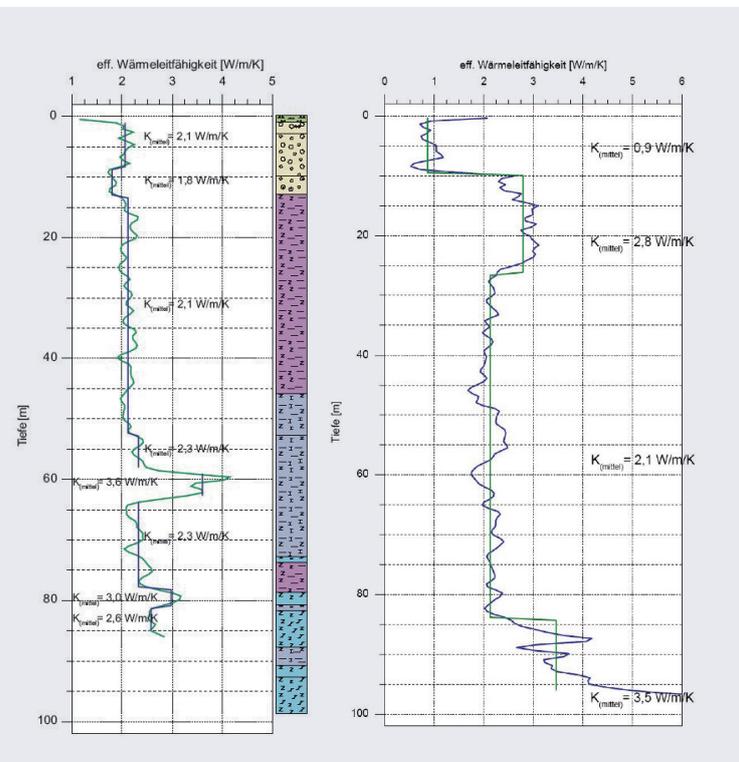


Abb. 10 EGRT Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofile zweier Pilotbohrungen
 Links: Grundwasserführende Kluft bei ca. 60 m uGOK
 Rechts: Unterschiede in der grundwasserungesättigten und -gesättigten Zone bis ca. 27 m uGOK und einer Erhöhung des Quarzgehalts ab ca. 83 m uGOK

wichtige standortsspezifische Temperaturgradient ΔT_{Grad} einfach ableiten. Auch urbane und klimatische Einflüsse (Abb. 9 rechts) auf das Temperaturprofil werden erkannt und sind bei der Anlagenauslegung zu berücksichtigen.

In Verbindung mit der Geologie sind in manchen Fällen mittels Péceletzahlanalyse auch die Filtergeschwindigkeiten (Darcygeschwindigkeit) des Grundwassers zu ermitteln [11, 12]. Des Weiteren ist eine qualitative Bewertung der Ringraumverfüllung anhand des ermittelten Bohrlochwiderstands R_b möglich. Der EGRT lässt sich zu jedem beliebigen Zeitpunkt auch nach Inbetriebnahme der Erdwärmesonden-Anlage ohne bauliche Veränderungen wiederholen. Das Glasfaserkabel kann optional auch zur Temperaturüberwachung (Monitoring) des Erdwärmesonden-Feldes verwendet werden.

Der EGRT als Planungs- und Optimierungstool

Der EGRT bietet gegenüber dem klassischen GRT einen entscheidenden Zugewinn an standortsspezifischen Daten, die bei der Auslegung des Erdwärmesonden-Feldes mehr Planungssicherheit bieten und für die Optimierung der Anlage hinsichtlich Gesamtbohrmeter, Bohrtiefe und Anordnung der Erdwärmesonden erforderlich sind. Unter Berücksichtigung geologischer, technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte ist eine Optimierung der Bohrtiefe des Erdwärmesonden-Feldes möglich, ohne dass hierfür ein zweiter Versuch erforderlich wird, da die Tiefenprofile des EGRT bereits alle erforderlichen Daten beinhalten.

Häufig liegen dem Planer des Erdwärmesonden-Feldes nur unzulängliche Bohrprofile der Pilotbohrung und damit auch unzulängliche Angaben zur Geologie und Hydrogeologie vor. Die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofile des EGRT ermöglichen eine qualitativ bessere Bewertung des Untergrunds und bewahren den Planer vor gravierenden Fehlentscheidungen. In Abbildung 9 sind die Messergebnisse eines EGRT in Norddeutschland dargestellt. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit, wie sie auch mit einem klassischen GRT bestimmt worden wäre, beträgt über die 130 m Bohrtiefe ca. 2,1 W/m/K. Eine Reduzierung der Bohrtiefe gegenüber der Pilotbohrung im Rahmen der Ausführungsplanung hätte an diesem Standort gravierende negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Erdwärmesonden-Feldes gehabt, da die Wärmeleitfähigkeit erst bei ca. 80 m uGOK von nur ca. 1,7 W/m/K sprunghaft auf ca. 2,7 W/m/K ansteigt. Das Temperatur-Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur legt den Schluss nahe, dass ab ca. 80 m Tiefe ein Grundwasserleiter vorhanden sein muss, der die früheren klimatischen Bedingungen widerspiegelt (Abb. 9 rechts).

Messungen an anderen Standorten zeigen aber auch unerwartet hohe geothermische Gradienten. Dies muss im Rahmen einer Variantenstudie bei der Ermittlung der optimalen Bohrtiefe berücksichtigt werden, da in fast allen Neubauten der Kühlanteil eine erhebliche Rolle spielt und bei freier Kühlung über das Erdwärmesonden-Feld bestimmte Vorlauftemperaturen nicht überschritten werden dürfen.

Anhand der Messergebnisse können grundwasserführende Klüfte (Abb.10 links) erkannt und Grundwasserleiter von Grundwassernichtleitern oder Grundwassergeringleitern unterschieden werden. In **Abbildung 10 rechts** reicht die ungesättigte Zone bestehend aus sandigen Lockergesteinen bis ca. 10 m uGOK, bis ca. 27 m uGOK ist ein Grundwasserleiter ausgebildet, darunter folgen bis ca. 83 m uGOK Wechselagerungen aus Sedimentgesteinen. Ab 83 m uGOK nimmt der Quarzgehalt der sedimentären wassergesättigten Ablagerungen deutlich zu.

Literatur

- [1] VDI-Richtlinie 4640 Teil 1: Thermische Nutzung des Untergrundes. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. 06.2010
- [2] VDI-Richtlinie 4640 Teil 2: Thermische Nutzung des Untergrundes. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. 09.2001
- [3] Blackwell J.H., (1954): A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk, Part 1 – Theory. J. Phys., 25: 137-144
- [4] Jaeger J.C., (1956): Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cylinder of a perfect conductor. Aust. J. Phys., 9: 167-179
- [5] Gehlin, S. (2002): Thermal response test – Method development and evaluation, Doctoral Thesis 2002:39, Lulea University of Technology
- [6] Clauser C., (2006): Geothermal Energy, In: K. Heinloth (ed), Landolt-Börnstein, Group VIII "Advanced Materials and Technologies", Vol. 3 "Energy Technologies", Subvol. C "Renewable Energies", Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 480-595.
- [7] Gilmore, M. (1991): Fibre optic cabling – Theory, design and installation practice, Oxford Newness.
- [8] Carlslaw, H.S. & Jaeger, I.C. (1959): Conduction of heat in solids, Oxford University Press, London, 2nd ed.
- [9] Sattel, G. (1979): Aufbau einer Messapparatur zur Bestimmung thermischer Parameter von Gesteinen und Messungen an tertiären Sedimenten, Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe.
- [10] Huber, A. (10.2008): Benutzerhandbuch zum Programm EWS, Version 4.0, Berechnung von Erdwärmesonden. 60 S.; Huber Energietechnik AG, Zürich.
- [11] Dornstädter, F.; Heidinger, P. & Heinemann-Glutsch, B. (2008): Erfahrungen aus der Praxis mit dem Enhanced Geothermal Response Test (EGRT). – Geothermietagung GtV in Karlsruhe
- [12] Zschocke, A. (2003): Software für die Anwendung der Pécletzahl-analyse auf Temperaturlogs in einem geschichteten Untergrund. GGA-Institut, Hannover

Abbildungen: CDM/GTC

Autoren:

Dr. Claus Heske
Oliver Kohlsch
CDM Consult GmbH
Am Umweltpark 3-5
44793 Bochum
Tel.: 0234 68775-0
Fax: 0234 68775-10
E-Mail: bochum@cdm-ag.de
Internet: www.cdm-ag.de

Dipl.-Geophys. Jürgen Dornstädter
Dipl.-Geophys. Philipp Heidinger
GTC-Kappelmeyer GmbH
Heinrich-Wittmannstr. 7a
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721-60008
Fax: 0721-60009
E-Mail: gtc@gtc-info.de
Internet: www.gtc-info.de



Leistungsstarke Schmutzwasserpumpen für Tiefbau und Geothermie vom Weltmarktführer

Power auf Dauer!

VORTEILE

- 24 h Dauerbetrieb
- trockenlaufsicher
- härteste Materialien
- zuverlässiger Thermoschutz
- doppelte Gleitringdichtung
- wirksamer Kriechwasserschutz
- auch für Wasserschutzgebiete
- einfache Wartung in Eigenregie

Umfangreich erweiterbar, auch mit Rührwerk und Niveausteuern.
Neu: Pumpen zum Mieten!

TSURUMI PUMP
Tel.+49 (0)211-417 937 450
vertrieb@tsurumi.eu
www.tsurumi.eu

Messe geoTHERM, Offenburg, 24.-25. Februar