

Innovative Verbesserungen bei Thermal Response Tests

J. Poppei, R. Schwarz, N. Mattson, G. Steinmann, L. Laloui

Kurzfassung

Thermal Response Tests sind in Europa, Nordamerika und Ostasien zu einem Standardverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes geworden. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein wesentlicher Kennwert zur Auslegung von Erdwärmesonden. Zur Durchführung sind in den letzten Jahren Anlagen entwickelt worden, die durch ihre Größe und Performance eine hohe Mobilität und Flexibilität gewährleisten und damit zunehmend zur Anwendung gelangen können.

Bei der Interpretation von Thermal Response Tests wird traditionell die Lösung der Linienquelle genutzt, die nach hinreichend langer Messzeit eine quasi-stationäre Auswertung gestattet. Da die grundlegenden Transportgleichungen für Wärme und inkompressiblen Flüssigkeiten die gleiche Form haben, lassen sich Analogien zur hydraulischen Testinterpretation (im Grundwasser) auch bei Thermal Response Tests heranziehen. Dieser Beitrag zeigt, ausgehend von einer Analyse des gegenwärtigen Standes von Testdurchführung und Interpretation, Möglichkeiten und Beispiele zur Adaption von Methodiken und numerischen Verfahren zu einer erweiterten Interpretation von Thermal Response Tests auf. Das Ziel der Verfahren ist dabei letztlich eine Verkürzung der Messzeiten, Flexibilisierung der thermischen Anregung durch beliebige Zeitverläufe und, wenn möglich, Gewinnung weiterer Informationen (Parameter) des zu nutzenden Untergrundes.

1. State of the art

1.1 Durchführung von Thermal Response Tests

Die erste Idee zur Durchführung von Thermal Response Tests (TRT) wurde von Morgensen (1983) publiziert. Er schlug eine gekühlte Flüssigkeit als Wärmeträger vor. Die ersten mobilen Anlagen zur Durchführung von TRT wurden unabhängig voneinander an der Technischen Universität Luleå in Schweden (Eklöf & Gehlin, 1996) und an der Oklahoma State University in den USA (Austin, 1998) entwickelt (Abbildung 1). Beide Anlagen gehen auf das Konzept von Morgensen zurück, nutzen aber anstelle einer gekühlten Flüssigkeit eine erhitzte als Wärmeträger.



Abbildung 1: Die ersten mobilen Testanlagen: aus Schweden (links) und aus den USA (rechts), aus Sanner et al. (2005)

Ähnliche Anlagen wurden seitdem mit geringfügigen Veränderungen in verschiedenen Ländern entwickelt. Abbildung 4 zeigt als Beispiel die Anlage der EPFL (Laloui & Steinmann, 2002). In Deutschland wurde 1999 erstmals die Anlage der UBeG GbR zur Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes in Langen verwendet (Sanner et al., 2003). In den Niederlanden wurde eine modifizierte Anlage entwickelt, die anstelle der elektrischen Heizung eine Wärmepumpe verwendet (Witte et al., 2002). Dadurch kann wahlweise sowohl Wärme injiziert als auch extrahiert werden.

Mobile Testeinheiten wurden zunächst für Kraftfahrzeuganhänger konzipiert. Abbildung 2 zeigt schematisch eine typische Testeinheit nach (Gehlin, 2002). Jüngere Anlagen, wie z.B. auch das Schweizer Mini-Module der EPFL (Steinmann & Laloui, 2005) oder die kommerziellen Anlagen von Ewbanks & Associates und TriSun Construction (Gehlin, 2002), haben nunmehr die Grösse von Koffern und ermöglichen damit eine hohe Mobilität.

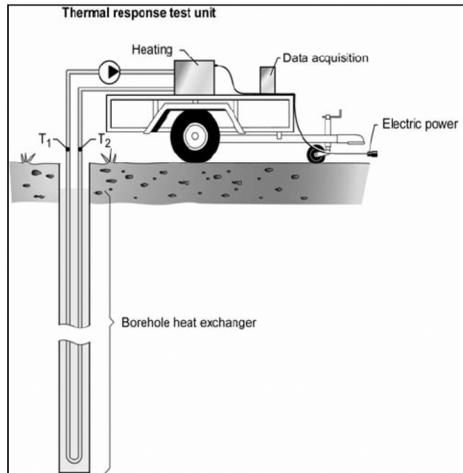


Abbildung 2: Typische Einrichtung zur mobilen Durchführung von Thermal Response Tests (Gehlin, 2002)

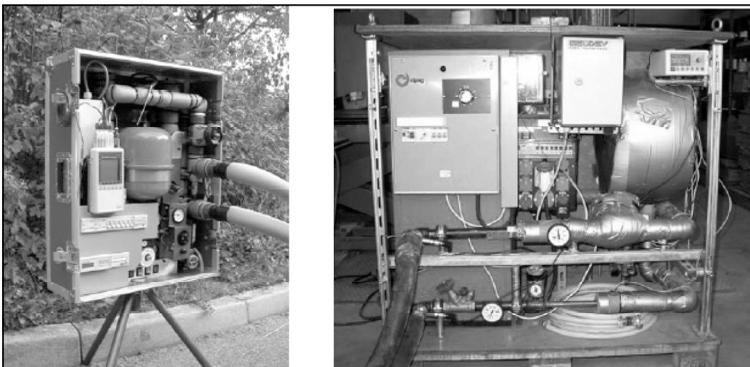


Abbildung 4: Zwei Testanlagen der EPFL: Mini-Module (links) und Originalversion von 2003 (rechts)

Thermal Response Tests werden in Europa, Nordamerika und Ostasien vielfach durchgeführt und haben kürzlich auch Südamerika erreicht, wo im Jahr 2003 in Chile der erste Test durchgeführt wurde (Roth et al., 2004). Die folgende Liste von Ländern, die über operative Anlagen verfügen, wurde von (Sanner et al., 2005) entnommen:

Chile, China, Deutschland, Großbritannien, Kanada, Niederlande, Norwegen, Südkorea, Schweden, Schweiz, Türkei und USA.

TRT sind mittlerweile Standard zur Bestimmung thermophysikalischer Stoffkennwerte des Untergrundes zur Auslegung grösserer EWS-Anlagen. Mehrere Studien zur in-situ Bestimmung

(z.B. Sanner et al. 2005, Sanner 2001, Reuß et al. 2001, Laloui & Steinmann 2002) bestätigen die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen. Die Notwendigkeit der Standardisierung und Qualitätssicherung gewann zunehmend an Bedeutung. Im "Annex 13 of the Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage of the International Energy Agency" wurden durch eine Gruppe von Experten Richtlinien zur Durchführung von TRT entwickelt (s. auch Eugster & Laloui, 2001). In Deutschland wurde die VDI-Richtlinie 4640 erstellt, die in einer aktuellen Version Eingang in die Europäische (IEA) Norm findet. Die Schweizer EPFL-Anlage wurde mit dem ISO/CEI Standard 17025 zertifiziert, der einen hohen Stellenwert der Qualitätssicherung garantiert.

Eine andere Richtung der TRT entwickelte sich aus den Bohr- und Bohrlochmonitoring-Technologien. Rohne et al. (2005) entwickelten eine drahtlose Sonde (Mikrofisch), die durch das Eigengewicht in komplettierten Bohrungen absinkt und dabei Daten (Temperatur und Druck) aufzeichnet. Eine solche Messung liefert vertikal differenzierte Informationen aus einer installierten Bohrung von 300 m Teufe in weniger als einer Stunde. Gustafsson & Nordell (2006) nutzen den Bohrprozess selbst, bei dem innerhalb des Bohrfortschritts eine thermische Beeinflussung erfolgt, und werten den entsprechenden Temperatur Response aus. Der Vorteil dieser Verfahren ist, dass auch lithologische Grenzen, Klüfte und Grundwasserbewegung detektiert werden können.

1.2 Testinterpretation

Basis der Interpretation von Thermal Response Tests sind fast ausschließlich analytische Lösungen der Linienquelle oder die einer zylindrischen Sonde mit Näherungen für hinreichend grosse Zeiten (z.B. Gehlin, 1998; Gehlin / Hellström, 2003). Die Temperatur T im Abstand r um eine Linienquelle konstanter Heizleistung q in einem unendlichen, homogenen und isotropen Medium mit der Wärmeleitfähigkeit λ und der Temperaturleitfähigkeit (Diffusivität) a ergibt sich zu

$$T(r,t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \cong T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (1)$$

Letzere Näherung ist hinreichend genau für $t > \frac{4r^2}{a}$. Die Temperaturänderung ist demnach

nach hinreichend langer Zeit proportional zu $\ln(t)$ und umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit λ . Diese Beziehung wird zur Bestimmung der "effektiven" Wärmeleitfähigkeit des die Bohrung umgebenden Gesteins genutzt. Einen typischen Temperaturverlauf aus einem TRT zeigt Abbildung 5 (links); rechts der lineare Anstieg der Temperatur über dem Logarithmus der Zeit.

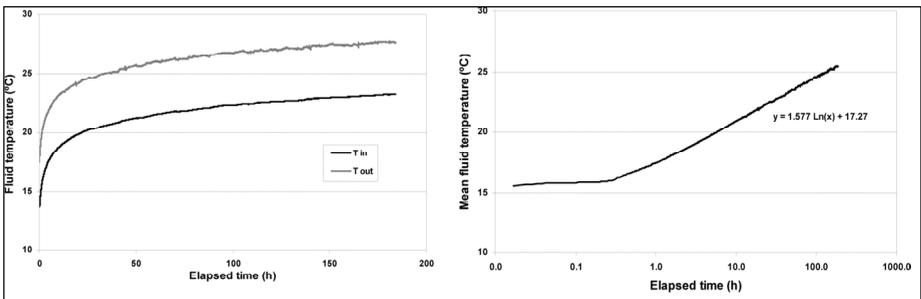


Abbildung 5: Gemessene Temperaturänderungen (links) und mittlere Temperatur (halb-logarithmisch rechts) aus einem Test der EPFL in Genf, 2006

Dieses Messprinzip geht auf ein Laborverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (*hot-wire method*; im deutschen Sprachraum auch "Lambda-Nadelsonde" genannt) zurück, das erstmals 1888 von Schieirmacher beschrieben wurde und 1949 von van der Held und van Druenen zur praktischen Anwendung gelangte (vgl. *Thermophysical property measurement methods*, ed. Maglic et al., 1984). Auch das Laborverfahren stellt bestimmte Voraussetzungen an das Messobjekt und die Durchführung, die u.a. von Blackwell (1953 und 1956) untersucht wurden. Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich teilweise auch auf die TRT übertragen.

Die in, als Erdwärmetauscher ausgebauten, Bohrungen durchgeführten Thermal Response Tests verletzen die nachfolgenden Bedingungen der Anwendbarkeit der analytischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung bzw. erfüllen sie nur näherungsweise:

- 1D, radialsymmetrische Wärmeleitung (keine Differenzierung und kein Wärmeaustausch in Teufenrichtung)
- homogene und isotrope Parameter
- ortsunabhängige Anfangsbedingungen
- verschwindender Bohrlochradius ($r_w \rightarrow 0$) für die Linienquelle bzw. perfekter Wärmeleiter für die Zylindersonde ($\lambda_s \rightarrow \infty$) bzw.
- die - für eine einfache Auswertung erforderliche - Näherung des Exponentialintegrals durch den natürlichen Logarithmus für hinreichend kleine Argumente (d.h. hier hinreichend grosse Zeiten) in Gleichung (1) und
- (oftmals technisch bedingt) konstante Raten des Wärmeeintrags oder -entzugs.

Auf ausgewählte Effekte dieser Verletzungen wird weiter unten exemplarisch eingegangen werden.

Eine vollständige Behandlung des dreidimensionalen, instationären Problems ist nur numerisch möglich. Numerische Modelle zur Testinterpretation oder *Parameter Estimation* werden beispielsweise von Spitler et al. (1999, 2000), Shonder und Beck (1999), Wagner et al. (2005) und Gustaffson (2005) beschrieben. Vorteile der Nutzung numerischer Modelle sind die Möglichkeit der Berücksichtigung beliebiger Randbedingungen und räumlich variabler Eigenschaften, sowie die Möglichkeit der Gewinnung weiterer thermophysikalische Kennwerte (Wärmekapazität, Temperaturleitfähigkeit) und ggf. deren räumlicher Verteilung. In der Praxis dominieren aber nach wie vor die auf analytischen Lösungen basierenden Algorithmen.

2. Erfahrungen aus der hydraulischen Testinterpretation

2.1 Analogien und Unterschiede

Hydraulische Tests in verschiedenen Formationen haben eine langjährige Tradition und vielfältige Modifikationen erfahren. Ziel dieser Tests ist hauptsächlich die Bestimmung der hydraulischen Transmissivität ($k_f \cdot H$) mit k_f – hydraulische Leitfähigkeit / Durchlässigkeit, H – effektive Schichtmächtigkeit einer Formation bzw. eines zu testenden Bereiches. Die grundlegenden Verfahren stützen sich auf analytische Lösungen der partiellen Differentialgleichung für den Transport, deren Basis die

$$\text{Darcy-Gleichung } \vec{v} = -k_f \cdot \nabla h \text{ ist.} \quad (2)$$

Die Darcy-Gleichung beschreibt die laminare Strömung eines inkompressiblen Fluids und hat die gleiche Form wie die

$$\text{Fourier-Gleichung } \vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (3)$$

(? – Wärmeleitfähigkeit), der Grundgleichung der Wärmeleitung.

Für zeitabhängige Prozesse führen beide Gleichungen auf die parabolische Differentialgleichung:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}; \quad \text{mit } u \text{ für das hydraulische Potenzial } h \text{ oder die Temperatur } T \text{ (4)}$$

und der Diffusivität a , die für thermische und hydraulische Prozesse unterschiedlich ist.

Entsprechend lassen sich äquivalente Lösungen bestimmter Anfangs-Randwert-Probleme der Differentialgleichung (4) finden, die zur Bestimmung der Stoffkennwerte herangezogen werden können (inverses Problem).

Die Auswertung der zeitabhängigen Absenkung des Grundwasserspiegels in einem Pumpversuch mit konstanter Rate nach Theis (1935) entspricht z.B. exakt dem obigen Verfahren der Linienquelle zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, sowohl im hot-wire Verfahren als auch beim TRT.

Die hydraulische Testinterpretation hat in den vergangenen Jahrzehnten zu Methodiken und Verfahren geführt (z.B. Earlaugher, 1977; Horne, 1995) die teilweise auch in den TRT Verwendung finden können. Bei der Anwendung sind jedoch auch Spezifika der jeweiligen Prozesse zu berücksichtigen. Dies sind beispielsweise:

- Die hydraulische Leitfähigkeit k_f (oder die ihr zugrunde liegende Permeabilität) ist i.A. log-normal verteilt und überstreicht in realen Gesteinsformationen bis zu 10 Größenordnungen; die Wärmeleitfähigkeit variiert in Gesteinsformationen um ca. einen Faktor 3 und ist normal verteilt.
- Der Skin-Faktor in der Hydraulik trägt veränderten hydraulischen Eigenschaften im bohrlochnahen Raum (z.B. infolge des Bohrprozesses) Rechnung. Die "innere Zone" bei thermischen Tests ist eine komplexe Abfolge thermischer Widerstände zwischen dem zirkulierenden Fluid und dem ungestörten Gestein mit (geschwindigkeitsabhängigem) Wärmeübergang im Rohr, Ausbaumaterialien und Hinterfüllung (s.a. Eppelbaum / Kutasov, 2006). Hinzu kommt, dass bei U- oder Doppel-U-Rohren keine radialsymmetrische Geometrie vorliegt.
- Bei Porengrundwasserleitern ist die Diffusivität a (als Quotient von hydraulischer Durchlässigkeit und Speicherkoeffizienten) zumeist relativ hoch, so dass bestimmte Kriterien der

Fourierzahl (dimensionslose Zeit), $FO = \frac{a \cdot t}{r_w^2}$, z. B. zur Näherung des Exponentialintegrals

durch den Logarithmus, relativ schnell erreicht sind. Bei Thermal Response Tests ist die Diffusivität a (hier auch "Temperaturleitfähigkeit" genannt) das Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität und erreicht in etwa Größenordnungen ($10^{-7} \dots 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$), deren Äquivalent bei hydraulischen Tests sehr gering-durchlässigen Formationen entspricht. Entsprechend nimmt die Eindringtiefe eines thermischen Signals nur sehr langsam zu und sind hinreichend lange Messzeiten zur Sicherung bestimmter Kriterien erforderlich. Dies begründet auch die Tatsache, dass TRT's nicht beliebig verkürzt werden können.

2.2 Diagnostic plots als Instrument der Testinterpretation

Ein wesentliches Hilfsmittel bei der Charakterisierung von Reservoiren und Testen sind bei der hydraulischen Testauswertung sog. *Diagnostic plots*. Diese stellen den "response" in halb-logarithmischer und in doppelt-logarithmischer Form dar. Durch bestimmte Charakteristiken lassen sich aus dem zeitlichen Verlauf der Messung charakteristische Merkmale des Reservoirs evaluieren (Abbildung 7).

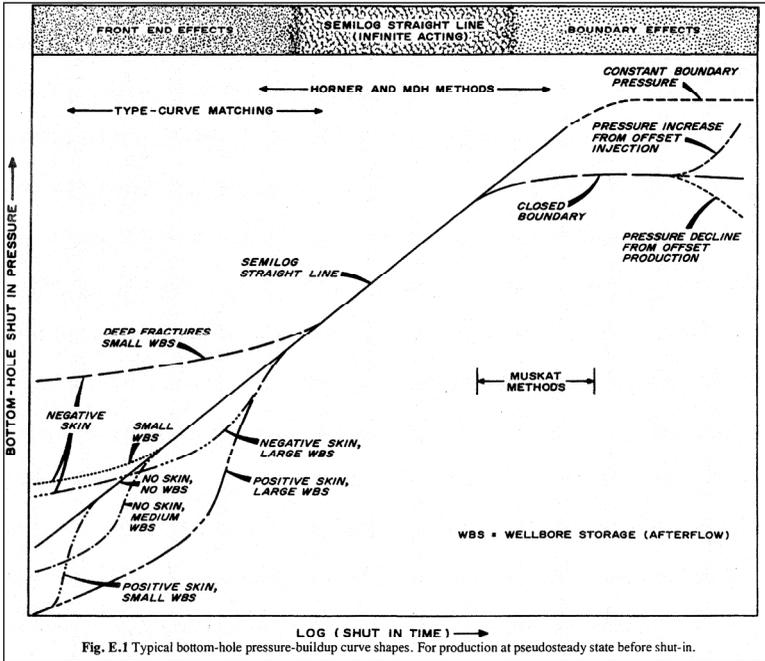


Fig. E.1 Typical bottom-hole pressure-buildup curve shapes. For production at pseudosteady state before shut-in.

Abbildung 7: diagnostische Plots aus der hydraulischen Testinterpretation nach Earlougher, 1977

Zusätzliche Informationen zur Reservoircharakterisierung sind häufig durch doppelt-logarithmische Darstellungen des responses (in der Hydraulik des Spiegel- oder Druckanstiegs bzw. der – absenkung) und dessen zeitlicher Ableitung $t \cdot \frac{dh}{dt}$ erkennbar (Abbildung 9).

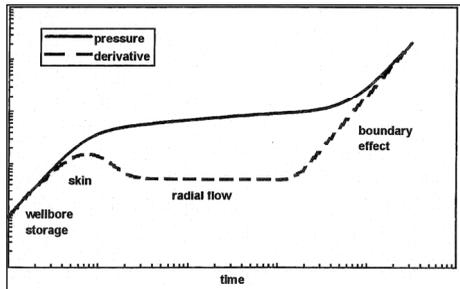


Abbildung 9: Prinzip der doppelt-logarithmischen Darstellung: $\log(u)$ und $\log\left(t \cdot \frac{du}{dt}\right)$ als Funktion von $\log(t)$

Horne (1995) lieferte eine ganze Reihe derartiger Darstellungen zur Bestimmung bestimmter Reservoircharakteristika (z.B. bevorzugter Fließwege, double-porosity-Verhalten u.v.a.m.).

Exemplarisch werden diese Darstellungen für thermische Eigenschaften bzw. TRT's diskutiert. Abbildung 11 zeigt die entsprechenden (hier dimensionslosen) Verläufe der Temperaturänderung bzw. dessen zeitlicher Änderung bei verschiedenen Randbedingungen ausserhalb der Bohrung:

eine *constant temperature boundary* charakterisiert beispielsweise einen Aquifer (mit hinreichend grosser Grundwasserbewegung), eine *no-flow boundary* eine Materialgrenze zu einem sehr gering wärmeleitenden Material (z.B. ruhende Luft).

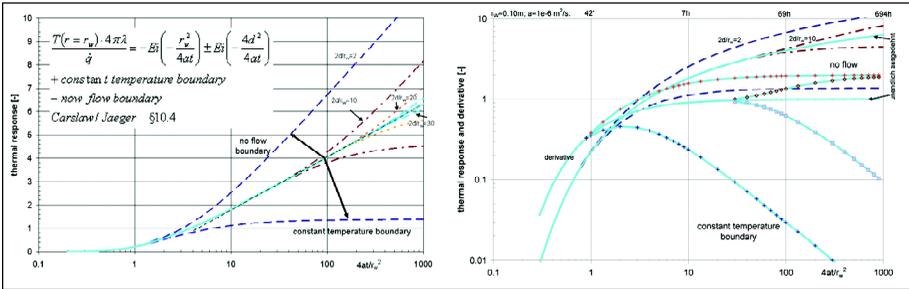


Abbildung 11: halb-logarithmische (links) und doppelt-logarithmische Darstellung (rechts) zur Diagnostik von Randbedingungen im Abstand $2d$ – Temperatur und Zeit dimensionslos

Aus der Abbildung 11 wird neben der charakteristischen Zu- oder Abnahme der Ableitung die Wirksamkeit in bestimmten Abständen deutlich. Beim TRT werden Randbedingungen nur in extrem langen Messzeiten "erkennbar" sein oder wenn sie in geringen Abständen von der Bohrung anzutreffen sind. So wird beispielsweise eine Randbedingung im Abstand von $2d=20 \cdot r_w$, also mit $r_w=0.1\text{m}$ in einem Abstand von 2m, erst bei Testzeiten (bei $a=10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$) von ca. 150 Stunden oder 6 Tagen (!) "sichtbar".

Den Einfluss von, von der Formation (λ_1) abweichenden Wärmeleitfähigkeiten der Hinterfüllung (λ_2) zeigt exemplarisch Abbildung 13. Die Anwendung des *straight-line* Verfahrens auf den Response

ab $Fo = \frac{a \cdot t}{r_w^2} = 4$ ergibt für Abweichungen der beiden Wärmeleitfähigkeiten von ca. 50%

($\lambda_1=0.5 \cdot \lambda_2$) Fehler bei der Interpretation der Formationseigenschaften von ca. 12%, während eine höhere Wärmeleitfähigkeit im Bohrungsbereich ($\lambda_1=1.5 \cdot \lambda_2$) im Anstieg und damit in der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Formation nicht wirksam wird. Ähnliche Schlussfolgerungen lassen sich auch bezüglich abweichender Wärmekapazitäten (und/oder Temperaturleitfähigkeiten) ableiten. Auch die Auswertung lateraler Heterogenitäten durch Schichten unterschiedlicher thermophysikalischer Eigenschaften (oder deren Sensitivität bei der Auswertung integraler Temperaturänderungen) lässt sich durch derartige Charakteristika beschreiben.

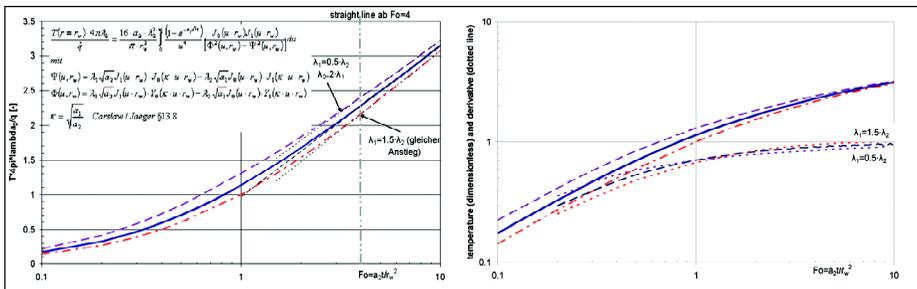


Abbildung 13: Thermal Response als Funktionen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten der "inner zone" λ_1 und der Formation λ_2 (hier $a_1=a_2$)

3. Adaption eines hydraulischen Testinterpretationsprogramms auf thermische Verhältnisse

3.1 Möglichkeiten und Umsetzung

Es wurden in den vergangenen Jahrzehnten viele numerische Simulatoren zur Auswertung hydraulischer Bohrlochversuche kodiert. Bei Colenco wurde ein numerischer Simulator entwickelt, der speziell auf die Bedürfnisse einer Testdurchführung in geringdurchlässigen Gesteinen ausgerichtet ist. Er ist daher sehr gut geeignet, um auf seiner Grundlage einen numerischen Simulator zur Auswertung thermischer Bohrlochtests zu entwickeln. Ausgenutzt wird dabei die mathematische Ähnlichkeit der beiden zugrunde liegenden Transportgleichungen (2) und (3).

Das Programm basiert auf einer Finite-Volumen-Formulierung des räumlichen und zeitlichen Zusammenhanges. Die räumliche Diskretisierung folgt einer zylindersymmetrischen Aufteilung mit dem Testintervall, der Bohrung, im Zentrum. Die zeitliche Diskretisierung orientiert sich an der Testdurchführung. Das Gleichungssystem wird aufgestellt und numerisch gelöst, wobei man zu Rechenzeiten von einigen Sekunden kommt. Das Programm ermöglicht dadurch schnelle Parametervariationen zur Evaluierung des Einflusses von Parametern und die Lösung des inversen Problems, die Parameterbestimmung, in nur wenigen Minuten.

Durch die numerisch gestützte Auswertung kann z.B. die Abbildung der inneren Randbedingung (der Erdwärmesonde) wesentlich verbessert werden, durch

- die Einbeziehung von zeitlich sich ändernden Temperaturverhältnissen (direkte Einbeziehung der Messungen),
- die Berücksichtigung von zeitlich variablen Leistungsaufnahmen oder -abgaben (direkte Nutzung der Messdaten und dadurch implizierte Superpositionierung von Testphasen unterschiedlicher Leistungsabgabe)
- die Simulation der zeitlichen und räumlichen Ausdehnung der durch den Test indizierten Temperaturfeldstörung
- ggf. die Berücksichtigung von zeitlichen Änderungen von Materialkennwerten z.B. von Ausbaumaterialien, usw.

Ebenso kann durch die Anwendung des Barker-Modells die Dimension der Wärmeausbreitung - d.h. der Effekt einer linearen, radialen und sphärischen Wärmeausbreitung im Gestein - variiert und deren Einfluss evaluiert werden. Es können räumliche Änderungen / Zonierungen, die Lage von Störungen und Begrenzungen variiert und deren Einfluss abgeschätzt und so die Qualität des Ergebnisses verbessert und dessen Bandbreite bestimmt werden.

Als Ergebnis der Simulationen erfolgen die Ausgabe des Temperaturverlaufes und der Leistungsaufnahme / -abgabe im Testintervall, sowie die Ausgabe von Temperaturprofilen zu beliebigen Zeitpunkten, bzw. des zeitlichen Temperaturverlaufes an Punkten in beliebiger Entfernung vom Intervall.

Nicht zuletzt erlaubt die numerische Behandlung die Lösung des inversen Problems, der Parameterbestimmung, durch den Einsatz eines Gradientenverfahrens (Levenberg-Marquardt Algorithmus) und die Prognose der Temperaturfeldentwicklung.

3.2 Beispiel einer Testinterpretation

An einem Thermal Response Test (TRT) der EPFL Lausanne sollen einige Möglichkeiten demonstriert werden. Der TRT wurde über einen Zeitraum von ca. 168 Stunden durchgeführt (Abbildung 15). Die Leistungsabgabe schwankte deutlich. Dies zeigt sich auch im gemessenen Temperaturverlauf.

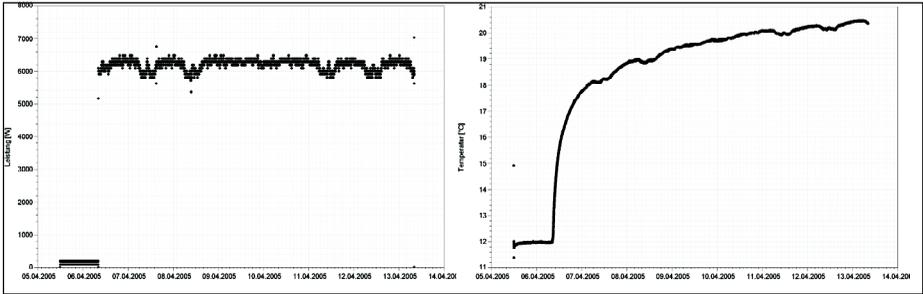


Abbildung 15: Versuchsdurchführung: Leistungsabgabe (links) und Temperaturverlauf (rechts)

Aus der halb-logarithmischen Darstellung des TRT (Abbildung 17, links) lässt sich nicht ableiten, in wie weit er sich im späten Zeitverlauf des Testes verändernde Anstieg zur Auswertung mittels des *straight-line* Verfahrens herangezogen werden kann. Verwendet man lediglich den Anstieg im Zeitraum zwischen 2 und 20 Stunden, lässt sich mittels des *straight-line* Verfahrens eine Wärmeleitfähigkeit für die Formation von 2.5 W/mK ermitteln. Die doppelt-logarithmische Darstellung der Temperaturänderung während des TRT zeigt auch nach der anfänglichen Stabilisierung starke Störungen (Abbildung 17, rechts). Es lässt sich jedoch trotz der Störungen erkennen, dass eine Stabilisierung der Ableitung bis zum Ende des TRT vorhanden ist, was das Wirksamwerden von Randbedingungen oder Zonierungen ausschließt.

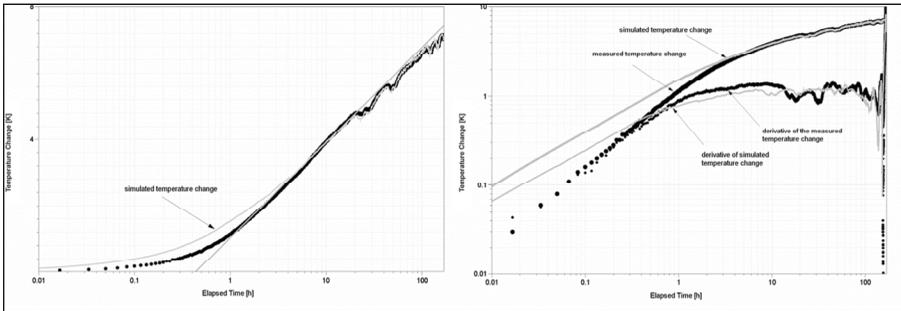


Abbildung 17: Ergebnis der inversen Simulation in der diagnostischen Darstellung

Unter der Verwendung des numerischen Tools zur Auswertung ist eine Berücksichtigung der variierenden Leistungsabgabe möglich, so dass die daraus resultierenden Ungewissheiten in der Auswertung eliminiert werden können. Jedoch kann der Beginn des TRT (etwa die erste Stunde) mittels der herkömmlichen Verfahren nicht interpretiert werden, da die Temperaturänderung am Ausfluss der Sonde noch nicht der Leistungsaufnahme durch die Formation entspricht. Die Schwierigkeiten in der anfänglichen Ausbildung des Temperaturverlaufes wirken sich zwar über einen langen Zeitbereich des Testverlaufs aus (siehe Abbildung 17), können jedoch innerhalb der Simulation berücksichtigt werden. Dazu werden die Temperatur-Messungen dieser anfänglichen Phase in der numerischen Simulation als Randbedingung benutzt, d.h. dem Modell "vorgeschrieben". Erst für den anschließenden Zeitraum wird die gemessene Leistungsabgabe als Randbedingung verwendet und die Temperaturentwicklung simuliert. Die thermischen Materialparameter werden dabei so lange variiert, bis der simulierte Temperaturverlauf dem gemessenen weitgehend entspricht.

Mit einem Zwei-Zonen Modell (einer inneren Zone für die Verfüllung des Bohrlochs) wurde die Wärmeleitfähigkeit der Formation zu 2.63 W/mK bestimmt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit der inneren Zone wurde zu 3.37 W/mK bestimmt. Abbildung 19 zeigt den Vergleich der gemessenen mit der, unter der Verwendung der invers bestimmten Materialparameter, berechneten Temperatur.

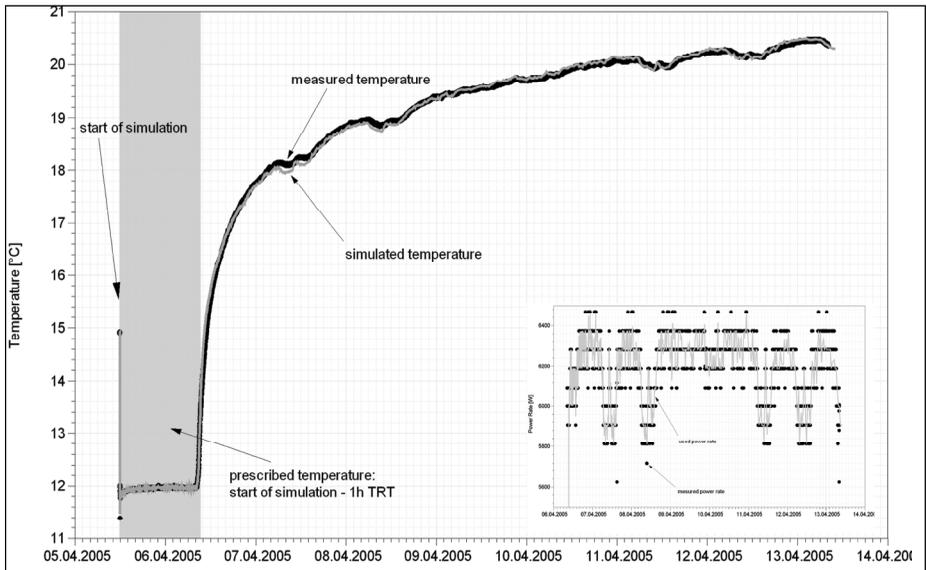


Abbildung 19: Ergebnis der inversen Simulation unter Berücksichtigung der gemessenen Leistungsschwankungen (rechts unten)

In Abbildung 17 sind neben den Messkurven zur Diagnostik auch die Ergebnisse der inversen Simulation dargestellt.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in jüngster Zeit realisierte Erstellung von mobilen Anlagen zur Testdurchführung gestattet eine zunehmende Anwendbarkeit des Verfahrens auch bei vergleichsweise kleineren und/oder schwer zugänglichen Anlagen. Dies könnte zu einer verstärkten Anwendung von Thermal Response Tests führen. Die relativ hohen Messzeiten und aufwendigen technischen Verfahren machen nunmehr auch Fortschritte in der Interpretation der Tests erforderlich.

Unter Berücksichtigung der Spezifika von hydraulischen Tests und thermischen Tests lassen sich Methodiken und Verfahren adaptieren und anwenden, die bei den Thermal Response Tests Verbesserungen bei der Durchführung und Interpretation erschliessen:

- Mit Hilfe der diagnostischen Verfahren (*diagnostic plots*) lassen sich bereits im Testverlauf charakteristische Informationen zu den Verhältnissen im bohrungsnahen Raum ableiten. So können Einflüsse der Bohrung und ihres Ausbaus selbst und ggf. Berandungen detektiert werden und der Messvorgang begründet abgebrochen werden, wenn hinreichende Informationen zur Auswertung vorliegen.
- Durch geeignete numerische Verfahren lassen sich - im Prinzip beliebige - thermische Anregungen zur Auswertung und zur Bestimmung thermophysikalischer Kennwerte nutzen. Auf die aufwendige Stabilität der Leistungszufuhr oder -entnahme im Testverlauf kann dadurch verzichtet werden.
- Mit Hilfe der numerischen Simulation lassen sich nicht nur beliebige Anregungen heranziehen, sondern auch statistisch gesicherte Aussagen zur Zuverlässigkeit und Sensitivität der Parameter gewinnen. Dazu stehen Verfahren aus der hydraulischen

Testinterpretation gering durchlässiger Aquifere zur Verfügung, die lediglich auf die Anwendung für thermische Tests adaptiert werden müssen.

- Unter Einbeziehung moderner Techniken im Bohrloch (z.B. des Mikrofischs) lassen sich vertikale Informationen gewinnen, die mit Hilfe von Interpretationsverfahren auch zur Bestimmung vertikal differenzierter thermophysikalischer Kennwerte führen können. Diese Verfahren stehen im Prinzip zur Verfügung und lassen in den kommenden Jahren eine deutlich höhere Informationsgewinnung aus den Thermal Response Tests erwarten, die die Prognosefähigkeit bei der Auslegung von Anlagen erhöhen.

Danksagung

Dieses Vorhaben wurde vom Schweizerischen Bundesamt für Energie im Projekt 101'690 unterstützt.

Literatur

Austin, W. (1998): Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties, MSc Thesis, OSU, 164 p., 1998.

Blackwell, J. H. (1953): Radial-axial heat flow in regions bounded internally by circular cylinders; Can. J. Phys. 31(1953) 472-479.

Blackwell, J. H. (1956): The axial-flow error in the thermal-conductivity probe; Can. J. Phys., 34(1956) 412-417.

Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. (1946): Conduction of Heat in Solids; Oxford University Press, 1946.

Earlougher, R.C. (1977): Advances in Well Test Analysis; Soc. Petrol. Eng. AIME, 1977

Eklöf, C.; Gehlin, S. (1996): TED - a mobile equipment for thermal response test, MSc Thesis 1996:198E, Lulea University of Technology, 62 p., 1996.

Eppelbaum, L.V.; Kutasov, I.M. (2006): Pressure and temperature drawdown well testing: similarities and differences; Journ. Geophys. Eng. 3(2006) 12-20

Eugster, W.J.; Laloui, L. (2001) eds.: Proc. Workshop Geothermische Response Tests Lausanne, GtV, 132 p., 2001.

Gehlin, S. (1998): Thermal Response Test – In-Situ Measurement of Thermal Properties in Hard Rock, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, 1998:37

Gehlin, S. (2002): Thermal response test – Method development and evaluation, Doctoral Thesis 2002:39, Lulea University of Technology

Gehlin, S.; Hellström, G. (2003): Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation; ASHRAE Trans. Res. 109(2003) 131-142

Gustafsson, A.M.; Nordell, B. (2006): Thermal Response Test While Drilling, presentation from Ecostock conference on thermal energy storage, May 31st - June 2nd 2006.

Gustafsson, A.M. (2006): Thermal Response Test – Numerical simulations and analysis; Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, 2006:14

Horne, R. (1995): Modern Well test Analysis – A Computer-Aided Approach; Petroway Inc., Palo Alto, Ca., 1995

Laloui, L.; Steinmann, G. (2002): Finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponses, ENET_Swiss Energy, N°220188.

Maglic, K.D. et al. eds. (1984): Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods; Survey of Measurement Techniques, Plenum Press, New York, 1984

Mogensen, P. (1983): Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages, Proc. Int. Conf Subs Heat Storage, 652-657.

Reuß, M.; Busso, A.J.; Müller, J.-P. (2001): Thermal Response Test – Experimente und Auswertungen, Proc. Workshop Geothermische Response Tests, Lausanne 2001, Eugster & Laloui (Ed.), GtV, pp 21-29.

Rohner, E.; Rybach, L.; Schärli, U. (2005): A new, small, wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design, Proc. World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey.

Roth, P.; Georgiev, A.; Busso, A.; Barazza, E. (2004): First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America, Renewable Energy no 29 (2004) pp 1947-1963, Elsevier.

Sanner, B. et al. (1999): Thermal Response Test – eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden, Geothermische Energie 24/25, 7. Jahrgang/Heft 1/2, März/September 1999.

Sanner, B. (2001): Entwicklung und Stand des mobilen Thermal Response Test, Proc. Workshop Geothermische Response Tests, Lausanne 2001, GtV, pp 11-20.

Sanner, B.; Mands, E.; Sauer, M.K. (2003): Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany, Geothermics 32 (2003) pp 589-602, Elsevier.

Sanner, B.; Hellström, G.; Spitler, J.; Gehlin, S. (2005): Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application, Proceedings World Geothermal Congress, Turkey, 2005.

Shonder, J.A.; Beck, J.V. (1999): Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique; ASHRAE Trans. Symposia, CH-99-2-4 458-466.

Spitler, J.D. et al. (1999): Refinement and Validation of In Situ Parameter Estimation Models, Short Report, OSU 03/10/99.

Spitler, J.D. et al. (2000): In Situ Measurement of Ground Thermal Properties, Terrastock, Stuttgart, 2000.

Steinmann, G.; Laloui, L. (2005): Thermal response tests; in-situ determination of geothermal characteristics of soils, IGA News, N°62, pp.7-10.

Wagner, R.; Clauser, C. (2005): Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity, Journal of geophysics and engineering no 2 (2005), pp 349-356.

Witte, H.J.L.; van Gelder, G.J.; Spitler, J.D. (2002): In-situ measurement of ground thermal conductivity: The Dutch Perspective, ASHRAE Transactions 108(1).