

Zwischenbericht, 19. Januar 2016

Faseroptische Temperaturmessungen - zur Detektierung der Hinterfüllung

Durchführung von zwei kurz Enhanced Geothermal Response Tests in einer Erdwärmesonde in Lausen:
Hybridkabel in Hinterfüllmaterial sowie mobiles Hybridkabel in Sondenrohr

Inhalt:

- Zwei Kurz - EGRTs in einer EWS an der Industriestrasse 19+20 von Laufen. Bericht zu den faseroptischen Temperaturmessungen vom 21.12. bis 22.12.2015



Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

GTC Kappelmeyer GmbH, Heinrich-Wittmann-Strasse 7a, D-76131 Karlsruhe
Tel. +49-721-60008, Fax +49-721-60009, www.gtc-info.de

1. Zusammenfassung

Vom 21.12. bis 22.12.2015 wurden mit dem faseroptischen Messsystem in einer Erdwärmesonde des Bauprojektes in Laufen Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden kurze EGRTs an zwei verschiedenen Hybridkabeln durchgeführt. Ein fest im Hinterfüllmaterial installiertes Kabel der Firma Helukabel sowie ein mobiles Hybridkabel der Firma Brugg welches in eines der Erdwärmesondenrohre eingebracht wurde. Die Messungen erfolgten um Rückschlüsse auf die Qualität der Hinterfüllung der Sonden ziehen zu können.

Zu Beginn der Tests wurde die bestehende Temperatur-Tiefen-Verteilung für beide Messkabel in der Bohrung erfasst. Im Anschluss daran wurde jeweils ein kurzer Heat-Pulse-Test von etwas über 1,5 Stunden Heizdauer durchgeführt. Auf Basis der dabei gemessenen Temperaturdaten konnte die effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes als Funktion der Tiefe ermittelt werden.

Sowohl bei einer Betrachtung der Entwicklung der Absoluttemperaturen als auch über die daraus bestimmte Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes wurden in beiden Kurz-EGRTs keine Hinweise auf mangelhafte Hinterfüllung in der untersuchten Erdwärmesonde detektiert.

2. Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	3
2.	Inhaltsverzeichnis	4
3.	Verzeichnis der Abbildungen	5
4.	Beschreibung des faseroptischen Temperaturmessverfahrens	6
	Faseroptische Temperaturmessungen	6
	Enhanced Geothermal Response Test mittels faseroptischer Temperaturmessungen	7
	Aufheizmethode	8
	Physikalische Grundlagen	9
	Wiederangleich.....	10
	Untersuchungsbereich	10
	Bohrlochwiderstand	11
	Rückschlüsse auf Fehlstellen des Hinterfüllmaterials durch Bestimmung des Bohrlochwiderstands (Kurz-EGRT).....	11
	Terrestrische Wärmestromdichte	12
	Zusätzlicher konvektiver Einfluss, Pécletzahlanalyse.....	12
	EGRT-Mobil	13
	Beispiel.....	14
5.	Einbau der faseroptischen Messeinrichtung.....	16
6.	Durchführung der Messung nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter.....	17
7.	Literaturhinweise.....	19
8.	Anhang	20

3. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Messprinzip – faseroptische Temperaturmessungen
- Abb. 2: Schematische Darstellung unterschiedlicher LWL-Kabeltypen mit schematischer Darstellung der Streuung/Reflexion eines optischen Signals in einer Glasfaser
- Abb. 3: Schema des Aufbaus für einen Enhanced Geothermal Response Test
- Abb. 4: Effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens über die Tiefe der Bohrung und Bestimmung der Filtergeschwindigkeit durch die Pécletzahlanalyse
- Abb. 5: Messaufbau
- Abb. 6: Bohrung mit Sondenrohren und Hybridkabel

im Anhang:

- Abb. 7: Kurz-EGRTs Laufen: ungestörte Ausgangstemperaturen
- Abb. 8a: Kurz-EGRTs Laufen: LWL fix, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Aufheizvorgangs
- Abb. 8b: Kurz-EGRTs Laufen: LWL fix, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Wiederangleichs
- Abb. 9a: Kurz-EGRTs Laufen: LWL mobil, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Aufheizvorgangs
- Abb. 9b: Kurz-EGRTs Laufen: LWL mobil, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Wiederangleichs
- Abb. 10: Kurz-EGRTs Laufen: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11: Kurz-EGRTs Laufen: LWL fix, Bohrlochwiderstand-Tiefen-Profil

4. Beschreibung des faseroptischen Temperaturmessverfahrens

Faseroptische Temperaturmessungen

Mittels moderner Messtechnik ist es möglich die Temperaturverteilung entlang einer Glasfaserleitung unter Verwendung eines Lasers zu bestimmen. Dabei dienen die optischen Fasern im Kabel als Sensoren. Die optischen Eigenschaften der Glasfaser sind unter anderem von der lokalen Umgebungstemperatur abhängig. Eine hochentwickelte Messtechnik, die bisher insbesondere im Bereich der Verfahrenstechnik Anwendung gefunden hat, ermöglicht die Analyse und Auswertung der Veränderungen dieser Eigenschaften und so die zuverlässige Bestimmung der Temperaturverteilung entlang des Lichtwellenleiters.

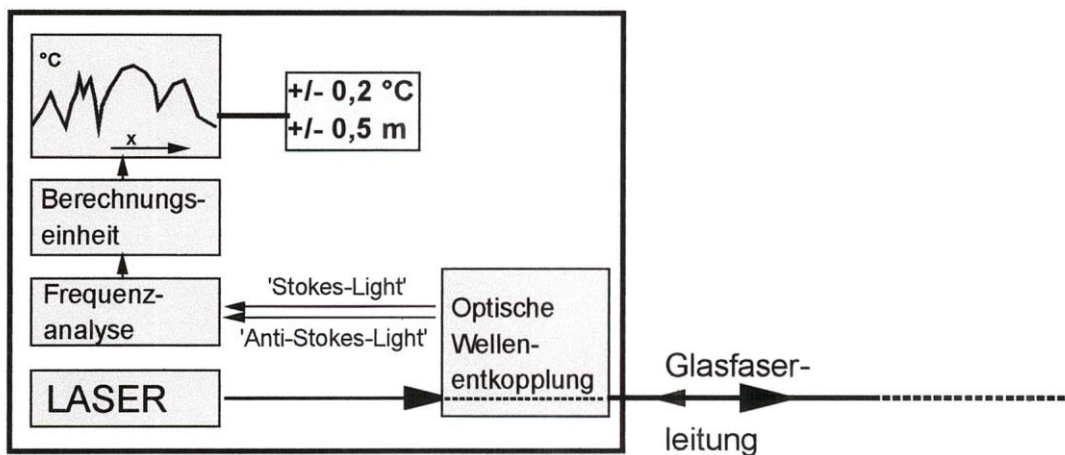


Abb. 1: Messprinzip

Ein energiereicher Laser sendet ein definiertes optisches Signal in eine Glasfaser, das dann entlang seiner gesamten Lauflänge reflektiert wird. Die zurückgestreuten Signale besitzen eine sehr geringe Intensität, können jedoch hinsichtlich ihrer Frequenzverteilung analysiert werden (Abb. 1 und 2). 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 (*Gilmore u.a., 1991*). Eine Frequenzanalyse ermöglicht 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.

Die Methode der verteilten faseroptischen Temperaturmessung wird im Bereich der geothermischen Energiegewinnung zur Dimensionierung und Überprüfung der Effizienz von Erdwärmesonden eingesetzt. Der Wasserbau und die Geotechnik, mit ihren hohen Anforderungen an die Bauwerksüberwachung und Baugrunderkundung, bieten weitere Anwendungen für diese Technologie. So werden faseroptische Temperaturmessungen sowohl zur Lokalisierung von bevorzugten Sickerwegen in Staudämmen und im Baugrund allgemein, als auch zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Massenbeton eingesetzt.

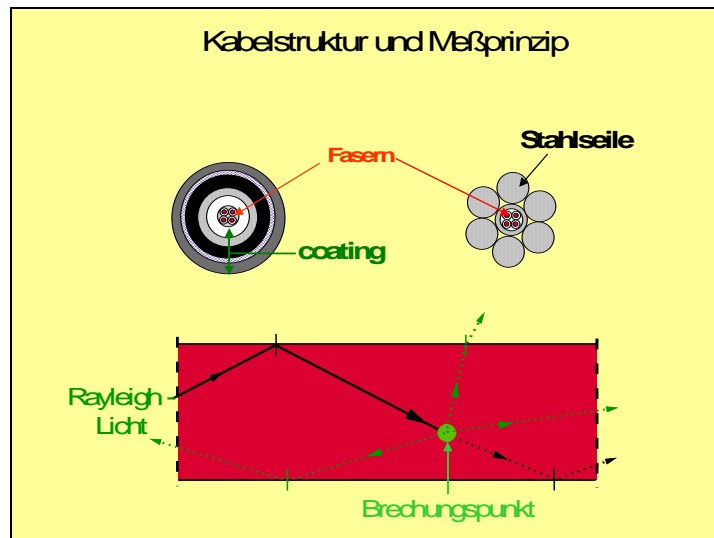


Abb. 2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Kabelaufbauten (oben). Schematische Darstellung der Streuung bzw. Reflexion eines optischen Signals in einer Glasfaser (unten)

Die für die Anwendungen geeigneten Glasfaserleitungen bestehen in der Regel aus einer Zentralader zur Zugentlastung, mindestens einer Glasfaser und mindestens einem elektrischen Leiter (sogenannte Hybridkabel). Die äußere Ummantelung wird entsprechend den gestellten Anforderungen an den mechanischen Schutz gewählt, und kann aus unterschiedlichen Stahl- und Kunststoffschichten aufgebaut sein. Diese Leitungen sind auch unter Baustellenbedingungen äußerst robust und widerstandsfähig gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Zur Durchführung von Temperaturmessungen werden die optischen Fasern mittels Steckverbindungen an den Laser angeschlossen. Die Messungen können sowohl quasi-kontinuierlich, als auch in beliebig festzulegenden Zeitintervallen durchgeführt werden.

Enhanced Geothermal Response Test mittels faseroptischer Temperaturmessungen

Für viele Fragestellungen im Bauwesen ist die Kenntnis der thermischen Parameter von entscheidender Bedeutung. Faseroptische Temperaturmessungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Informationsdichte in besonderem Maße für die Erfassung der Temperaturverteilung, sowie zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeitsverteilung. Durch Anlegen einer Heizspannung an die elektrischen Leiter im Hybridkabel wird eine definierte Heizleistung in den Untergrund eingebracht und gleichzeitig die dadurch erzeugte Temperaturänderung entlang der Glasfasern mit Hilfe der faseroptischen Messtechnik aufgezeichnet. Unter Zugrundelegung der Linien- bzw. Zylinderquellentheorie kann die Verteilung der thermischen Materialparameter entlang des Glasfaserkabels bestimmt werden (EGRT, Heidinger et al., 2004). Die Eindringtiefe der durch das Anlegen der Heizspannung erzeugten Wärmefront ist eine Funktion der Heizdauer. Durch die Auswertung der Temperaturkurven entsprechend kurzer Heizzeiten können auch die thermischen Parameter des Verfüllmaterials von Bohrungen entlang der Messstrecke bestimmt werden. Da das Hybridkabel dauerhaft im Untergrund verbleibt, kann der Enhanced Geothermal Response Test beliebig wiederholt werden. Die Temperaturverteilung im Untergrund und dessen thermische Materialparameter können so auch bei geänderten Randbedingungen bestimmt werden.

Messaufbau

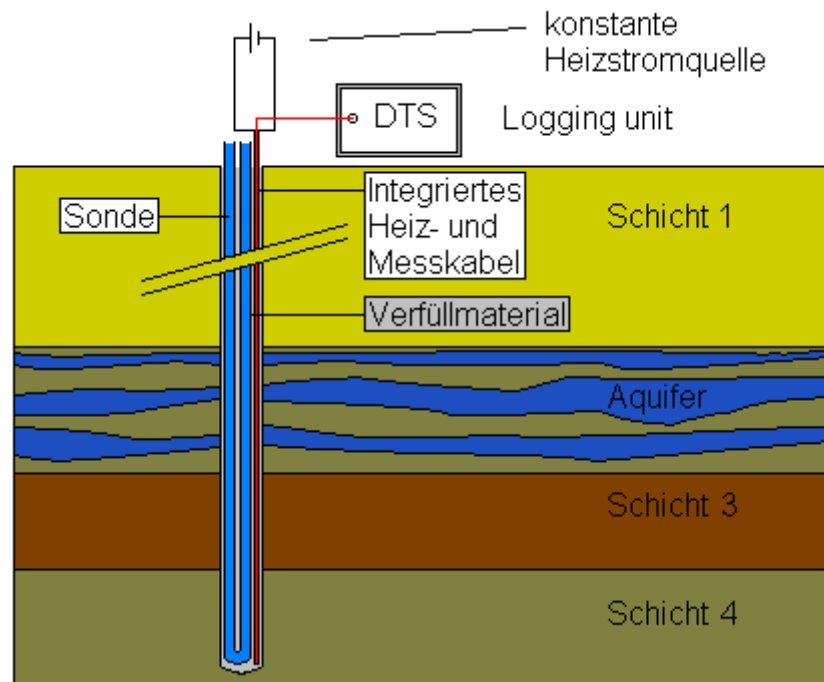


Abb. 3: Schema des Aufbaus für einen Enhanced Geothermal Response Test in einer Erdwärmesonde

Der Aufbau der Messapparatur beschränkt sich im Wesentlichen auf das korrekte Einbringen des Mess- und Heizkabels in den Boden. Dazu wird das Kabel am Verpressschlauch oder am Messstellenausbau befestigt. Das Heizkabel wird an eine Stromquelle mit konstanter Spannung angeschlossen und die Glasfaser mit dem DTS-Gerät (Distributed Temperature Sensing) verbunden.

Die Länge und der Widerstand des Heizkabels müssen gemessen werden, um in der späteren Auswertung zusammen mit der Heizspannung die abgegebene Heizleistung pro Meter (q_L in [W/m]) berechnen zu können. Das DTS-Gerät speichert die Absoluttemperaturen entlang der Glasfaser. Nachdem die Ausgangstemperatur aufgezeichnet wurde, wird der Heat-Pulse-Test durch Einschalten der Heizquelle durchgeführt.

Aufheizmethode

Um die thermischen Parameter eines Materials, in die eine Glasfaserleitung eingebettet ist, zu ermitteln, kommt die Aufheizmethode (Heat-Pulse-Methode) zum Einsatz. Mit Hilfe der elektrischen Leiter im Hybridglasfaserkabel wird eine elektrische Spannung angelegt, so dass ein Kurzschlussstrom fließt. Der daraus resultierende Temperaturanstieg als Funktion der Kabellänge wird mit den Glasfasern gemessen. Zusätzlich zur konduktiven Wärmeleitung des das Kabel umgebenden Materials tritt bei einer Umströmung des Kabels durch ein Fluid, ein zusätzlicher konvektiver Wärmetransport auf, der zu einer deutlich geringeren Erwärmung des Kabels führt. Auf diese Weise können Fließvorgänge nachgewiesen und damit auch Leckagen geortet werden. Durch Berechnungen können sowohl die Fließgeschwindigkeit des Fluids, als auch die thermischen Parameter des Umgebungsmaterials bestimmt werden. Dieses Verfahren

wird als Aufheiz- bzw. Heat-Pulse-Methode (HPM) bezeichnet. Der Vorteil gegenüber der konventionellen Temperaturmessung besteht auch hier in der linienförmigen Temperatureaufnahme. Zusätzlich können die thermischen Materialparameter, wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität *in-situ* gemessen werden.

Physikalische Grundlagen

Die Theorie zur Auswertung der T(t)-Messkurven ist in *Carlslaw & Jaeger (1959)* ausführlich behandelt, deshalb wird hier lediglich die Lösung der Wärmeleitungsgleichung für den Temperaturverlauf einer Linienquelle angegeben:

Für $\frac{\kappa t}{r^2} \gg 1$ oder $\frac{\kappa t}{r^2} \geq 5$ gilt:

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

$T(r=r_b, t)$	=	Temperatur der Linienquelle (LWL-Kabel) [°C] bzw. [K]
r	=	Entfernung zur Linienquelle [m]
t	=	Zeit seit Anschalten der Quelle [s]
q_L	=	Heizleistung pro Längeneinheit [W m ⁻¹]
π	=	Pi (3,14...)
κ	=	Diffusivität des Mediums (Boden) [m ² s ⁻¹]
λ	=	Wärmeleitfähigkeit des Mediums (Boden) [W m ⁻¹ K ⁻¹]
γ	=	Eulersche Konstante (0,577...)
T_0	=	Ungestörte Bodentemperatur [°C] bzw. [K]

Wird diese Gleichung zur Berechnung der Fluidtemperatur 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:

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

r_b	=	Radius der Bohrung [m]
R_B	=	Bohrlochwiderstand [K m W ⁻¹]

In der Praxis berechnet sich die längennormierte Heizleistung zu:

$$q_L = R I^2 / L$$

R	=	Widerstand des Heizdrahtes [Ω]
I	=	konstanter Heizstrom [A]
L	=	Länge des beheizten Kabels [m]

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 *Sattel (1979)* kleiner als $\pm 15\%$ an. In der angegebenen Arbeit erfolgen auch Vergleiche mit anderen in-situ- und Labor-Wärmeleitfähigkeits-Messverfahren.

Die Wärmeleitfähigkeits-Messungen werden 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:

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

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

mit $t_2 > t_1$

Da die Heizleistung bekannt ist - Heizstrom und Widerstand der Heizwicklung werden gemessen - kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

Wiederangleich

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 Potentialen abgeleitet werden kann, gilt hier das Superpositionsprinzip und die Gleichung für den Relaxationsprozess kann aus der Lösung für den Temperaturverlauf einer Linienquelle entwickelt werden.

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

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

t_h = Länge des Heat-Pulses [s]

Werden die registrierten Temperaturen des Relaxationsvorgangs über $\ln(t/(t-t_h))$ aufgetragen, so kann aus der Steigung dieser Geraden die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden.

Untersuchungsbereich

Der Bereich des Bodens, der von der Temperaturstörung betroffen ist, breitet sich nach folgender Gleichung aus:

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

e = Eulersche Zahl (2,718...)

Bei einer angenommenen Diffusivität 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 6 Tagen sind es bei der angenommenen Diffusivität etwa 1,53 m.

Bohrlochwiderstand

Die Berechnung des Bohrlochwiderstandes erfolgt aus der gemischten Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes (Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials und der Sonde). Aus dieser wird die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials extrahiert und der Bohrlochwiderstand aus der Geometrie der Erdwärmesonde bestimmt. Jüngste Erkenntnisse haben gezeigt, dass die angenommene Geometrie von der Realität, selbst bei der Verwendung von Abstandshaltern, abweicht. Die Ergebnisse des Bohrlochwiderstands sind deshalb bei allen Thermal Response Tests (EGRT und TRT) unter Umständen stark fehlerbehaftet.

Rückschlüsse auf Fehlstellen des Hinterfüllmaterials durch Bestimmung des Bohrlochwiderstands (Kurz-EGRT)

Werden im Unterschied zur Standardauswertung des EGRT die ortsspezifischen Temperaturentwicklungen nicht innerhalb festgelegter Zeitintervalle ausgewertet, sondern über die gesamte Versuchsdauer analysiert, so lassen sich insgesamt drei zeitlich getrennte, nacheinander ablaufende Phasen unterscheiden: So ist in der ersten Phase, die Temperaturänderung der Glasfaser durch die thermischen Eigenschaften des Hybridkabels, in dem sich die Faser befindet, bestimmt. Die zweite Phase durch die thermischen Eigenschaften der Bohrung, anteilig bestehend aus dem wassergefülltem PE-Rohr der Erdwärmesonde und dem Hinterfüllmaterial. Sowie die dritte, zeitlich nicht begrenzte Phase, in der die weitere Temperaturänderung der Glasfaser durch das der Bohrung angrenzende Material (Erdreich, Gestein, eventuell beeinflusst durch Grundwasser) bestimmt ist. Untersuchungen am Erdwärmesonden Versuchsfeld in Crailsheim haben gezeigt, dass die vorgestellte Mess- und Auswertemethode für eine Detektion von Fehlstellen in EWS geeignet ist, wenn die effektive Wärmeleitfähigkeit der Fehlstelle (inkl. ggf. vorhandener Konvektion) von der Wärmeleitfähigkeit der korrekten Verfüllung abweicht (*Riegger u.a., 2012*). Als Nachweisgrenze gilt aktuell, dass die Detektion von Fehlstellen, die kleiner als die derzeit mögliche Messauflösung von 0,5 m sind, kaum möglich sind. Allerdings werden vollständig unverfüllte, wassergefüllte Bereiche mit einer Größe von 1 Meter oder mehr sicher durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit auf Grund der sich im Wasser einstellenden Konvektion nachgewiesen (*Riegger, 2011*). Es können aber kleinere Fehlstellen als die Messauflösung dann detektiert werden, wenn sehr starke Kontraste in der Wärmeleitfähigkeit existieren. So z.B. durch stark strömendes Wasser oder wenn sich die Fehlstellen oberhalb des Grundwasserspiegels befinden. Diese Fehlstellen sind dann nicht mit Wasser, sondern mit Luft gefüllt und deshalb durch unnatürlich hohe Werte des Bohrlochwiderstandes gekennzeichnet.

Terrestrische Wärmestromdichte

An einer genügend tiefen Bohrung, deren Temperaturprofil nicht durch Konvektion (strömendes Grundwasser), thermische Angleichvorgänge oder paläoklimatische Effekte gestört ist, kann mithilfe der Wärmeleitfähigkeit die terrestrische Wärmestromdichte berechnet werden. Dazu wird eine Tiefe bestimmt, ab der die gemessenen Bodentemperaturen nicht mehr von der Oberfläche und durch die anderen genannten Effekte gestört sind. Für homogene Bereiche unterhalb dieser Tiefe werden die Mittelwerte des Temperaturgradienten und der Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Wärmestromdichte berechnet sich dann aus dem Produkt beider Werte (*Fourier, 1822*).

Zusätzlicher konvektiver Einfluss, Péclétzahlanalyse

Die nach der Heat-Pulse Methode gewonnene Wärmeleitfähigkeit ist nicht allein dem die Bohrung umgebenden Material zuzuordnen, sondern sie wird durch die darin stattfindende Grundwasserbewegung mit beeinflusst. Die durch dieses Verfahren gewonnene Größe λ beschreibt damit nicht nur die konduktive Wärmeleitung, sondern auch die konvektive (hervorgerufen durch Wasserströmung) und wird deshalb als effektive Wärmeleitfähigkeit bezeichnet.

Durchströmte Bodenbereiche zeichnen sich durch besonders hohe Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus. In Verbindung mit der Kenntnis der geologischen Schichten sind in manchen Fällen mittels Péclétzahlanalyse nicht nur relative Geschwindigkeitsunterschiede, sondern auch die absolute Filtergeschwindigkeiten (Darcy-Geschwindigkeiten) des durchströmten Bodens tiefenabhängig bestimmbar.

Die Péclétzahlanalyse ist ein eindimensionaler Ansatz, um die Filtergeschwindigkeit (Darcygeschwindigkeit) des Grundwassers zu ermitteln. Die Péclétzahl P_e beschreibt das Verhältnis zwischen konvektivem und konduktivem Wärmetransport. Dieses Verhältnis muss aus den effektiven Wärmeleitfähigkeiten bestimmt werden. Es können Bereiche mit hohen effektiven Wärmeleitfähigkeiten als Aquifere (konduktiver und konvektiver Wärmetransport) identifiziert werden und Bereiche mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten als Schichten ohne Grundwasserbewegung (rein konduktiver Wärmetransport). Wenn bei beiden Schichten von einer gleichen Wärmeleitfähigkeit der Bodenmatrix ausgegangen wird, ist in der Schicht ohne Grundwasserbewegung die Wärmeleitfähigkeit λ_{kond} proportional dem konduktivem Wärmetransport und in der Schicht mit Grundwasserbewegung die scheinbare Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{kond+konv}$ proportional der Summe des konvektiven und konduktiven Wärmetransports. Die Péclétzahl ist somit durch

$$P_e = \frac{\lambda_{kond+konv} - \lambda_{kond.}}{\lambda_{kond.}} = \frac{\lambda_{kond+konv.}}{\lambda_{kond.}} - 1$$

bestimmbar und die Filtergeschwindigkeit kann über die Definition der Péclétzahl ausgerechnet werden (*Zschocke, 2003*):

$$P_e = \frac{q_a}{q_c} = \frac{\rho c_p v_f \Delta T}{\lambda \left(\frac{\Delta T}{l} \right)}$$

$$v_f = \frac{P_e \lambda}{l \rho c_p}$$

$$v_f = \frac{\lambda_{\text{kond.}+\text{konv.}} - \lambda_{\text{kond.}}}{l \rho c_p}$$

mit:

q_a = konvektiver Wärmestrom [W/m²]

q_c = konduktiver Wärmestrom [W/m²]

ρ = Dichte des Fluids [kg/m³]

c_p = spezifische Wärmekapazität des Fluids bei konstantem Druck [J/kg/K]

v_f = Filtergeschwindigkeit des Fluids [m/s]

ΔT = Temperaturdifferenz [K]

$\lambda = \lambda_{\text{kond.}}$ = Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/m/K]

l = charakteristische Länge [m]

Die Péceletzahlanalyse ist eine schnelle und direkte Möglichkeit Filtergeschwindigkeiten durch die Heat-Pulse Methode zu bestimmen. Allerdings ist die Genauigkeit der Ergebnisse nur dann gewährleistet, wenn der lithologische Aufbau des Untergrunds durch geologische Ansprachen bekannt ist, da ansonsten der konduktive Anteil des Wärmestroms in dem durchströmten Aquifer durch einen möglicherweise heterogenen Schichtaufbau falsch bestimmt wird. Je nach Heterogenität kann der daraus resultierende absolute Fehler der Darcygeschwindigkeit 100 % oder mehr betragen. Relative Änderungen sind jedoch gut auflösbar.

EGRT-Mobil

Ziel der Neuentwicklung war es einen mobilen Messaufbau mit wiederverwendbaren Messkabeln zu entwickeln, der zum einen eine tiefenaufgelöste Messung der Wärmeleitfähigkeiten in bestehenden Erdwärmesonden ermöglicht und darüber hinaus in der Lage ist, mögliche Fehler in der Verpressung von Erdwärmesonden im Zuge von Qualitätssicherungsmaßnahmen zu detektieren. Hierfür wurde eine glasfaserbasierte Messsonde, ähnlich der Methode des EGRT entwickelt, welche allerdings im Gegensatz zu diesem nicht im Außenbereich der Sonde fest verbaut, sondern ins Innere einer bestehenden Sonde eingeführt wird. Diese kann nach der Messung wieder entfernt und weiterverwendet werden.

Der EGRT-mobil besteht aus drei Bausteinen: Dem eigens entwickelten EGRT-mobil-Spezialkabel (Glasfaser-Kupfer-Hybridkabel), einem DTS-Temperaturmessgerät, sowie einem Labornetzteil, welches die abgegebene Heizleistung des Kabels mit einer Abweichung kleiner 1% konstant hält. Das Hybridkabel wird in ein Rohr der fertig ausgebauten Erdwärmesonde eingeführt und im Rohr bis zur Sondenspitze abgelassen. Auch hier werden die Kupferkomponente des Hybridkabels zum Heizen und die Glasfaserkomponente zum Messen des Temperaturprofils verwendet. Das weitere Messprinzip und die mathematische Beschreibung erfolgen analog des normalen EGRT.

Die Entwicklung dieser Messapparatur erfolgte 2014. Sie wurde erfolgreich unter realen Bedingungen getestet und die Ergebnisse konnten mit unabhängigen Vergleichsmessungen sowie durch Ergebnisse von Modellierungen validiert werden.

Bei weiteren Einsätzen hat sich zusätzlich die Verwendbarkeit auch bei schon bestehenden Erdwärmesondenanlagen gezeigt, so konnte das Spezialkabel auch bei mehreren Meter horizontal verlaufenden Zuleitungen nachträglich in die Erdwärmesonden eingebaut werden.

Beispiel

Als Fallbeispiel eines EGRT wird im Folgenden eine 57 m tiefe Grundwassermessstelle herangezogen. Aus abgeteuften Bohrungen in der Nähe ist bekannt, dass der Untergrund aus Niederterrassenschotter, einem Kohleflöz und einer darunter liegenden Glimmersandschicht besteht. In den Niederterrassenschotter und die Glimmersandschicht eingestreut können gering mächtige Rupeltone liegen. Oberhalb und unterhalb des Flözes liegt jeweils ein Grundwasserleiter. Im oberen GWL wurde durch die Isohypsen das Grundwassergefälle bestimmt (0,3 %). Bei dem dort vorhandenen durchschnittlichen Durchlässigkeitsbeiwert von $1,0 \cdot 10^{-3}$ m/s entspricht das einer Filtergeschwindigkeit von ca. 25 cm/Tag.

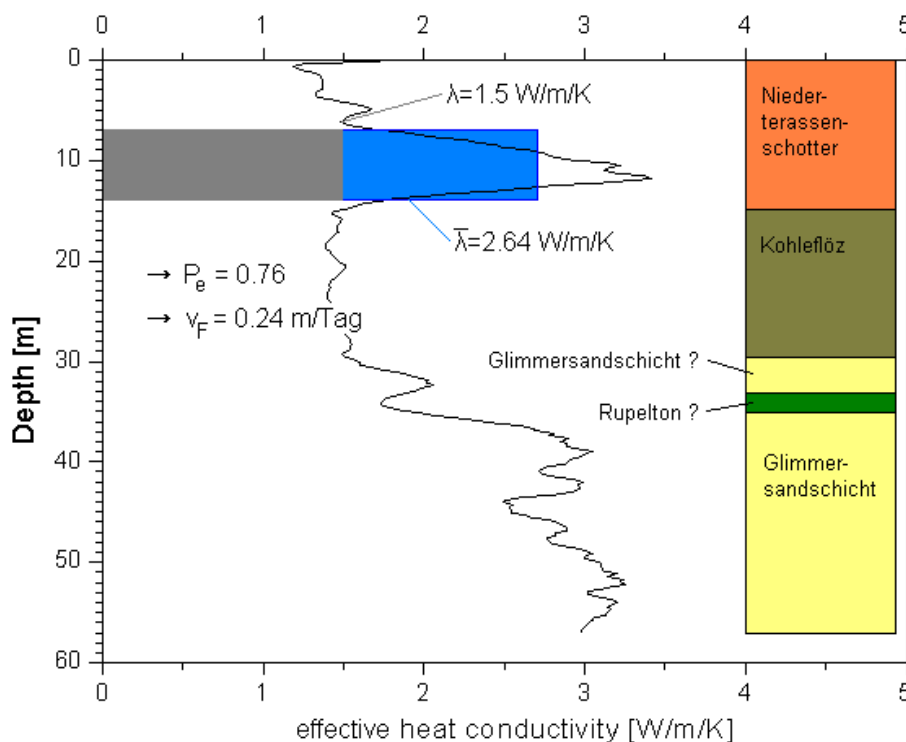


Abb. 4: Effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens über die Tiefe der Bohrung und Bestimmung der Filtergeschwindigkeit durch die Pécletzahlanalyse

Das Ergebnis der Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist in Abbildung 4 dargestellt. Die lithologischen Schichten sind in der Kurve der effektiven Wärmeleitfähigkeit eindeutig identifizierbar. Es ist deutlich erkennbar, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit keine konstante Größe ist, sondern mit der Tiefe variiert.

Der obere Grundwasserleiter ist durch die großen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit identifizierbar und befindet sich in einer Tiefe von ca. 7 m bis 14 m unter GOK. In diesem Tiefenbereich wird die Wärme konduktiv und konvektiv transportiert. Die durchschnittliche effektive Wärmeleitfähigkeit in diesem Bereich beträgt 2,64 W/m/K. Als reine konduktive Wärmeleitfähigkeit dieser Schicht wird der obere Minimalwert von 1,5 W/m/K (bei 6 m unter GOK) angenommen. Die Pécelzahl hat damit einen Wert von $P_e = 0,76$. Für die Dichte von Wasser wurden 1000 kg/m^3 angesetzt und für die spezifische Wärmekapazität ein Wert von 4180 J/kg/K. Die durchschnittliche Filtergeschwindigkeit in dieser Schicht berechnet sich damit nach Gleichung (4) zu 0,24 m/Tag. Dieses Ergebnis steht in sehr guter Übereinstimmung mit der durch die Isohypsenauswertung bestimmten Filtergeschwindigkeit (0,25 m/Tag).

Das schlecht durchlässige und schlecht wärmeleitende Kohleflöz liegt in einer Tiefe von 14 m bis ca. 29 m. Darunter liegt die quartäre Glimmersandschicht, die den unteren Grundwasserleiter bildet.

Es konnte gezeigt werden, dass die effektiven Wärmeleitfähigkeiten im Untergrund tiefenabhängig bestimmt werden können. Es können lokale Variationen dieses Wertes nachgewiesen werden. Sind Aquifere mit fließendem Grundwasser und Schichten mit geringem Durchlässigkeitsbeiwert nah beieinander, lassen sich diese über den starken Kontrast in der effektiven Wärmeleitfähigkeit identifizieren. Darüber hinaus ist es möglich unter bestimmten Voraussetzungen die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers über die Pécelzahlanalyse im Aquifer auch absolut zu bestimmen.

Dieses Verfahren wurde seit 2005 an weit mehr als 100 Standorten erfolgreich angewendet.

5. Einbau der faseroptischen Messeinrichtung

Die Erdwärmesonde, in der die beiden Kurz-Enhanced-Geothermal-Response-Tests (Kurz-EGRT-Mobil) durchgeführt wurden, befindet sich auf dem Gelände der Industriestrasse 19+20 in Laufen. Die Tests wurden an zwei verschiedenen Hybridkabeln durchgeführt. Das fest im Hinterfüllmaterial installierte Kabel der Firma Helukabel wurde durch die Bohrfirma EBL Wärmesysteme AG schleifenförmig an der Erdwärmesonde befestigt und mit in das Bohrloch bis in eine Tiefe von ca. 147 m unter OKT eingebracht. Das mobile Hybridkabel der Firma Brugg wurde in eines der Erdwärmesondenrohre bis in eine Tiefe von knapp 146 m u. OKT hineingeschoben.



Abb. 5: Messaufbau

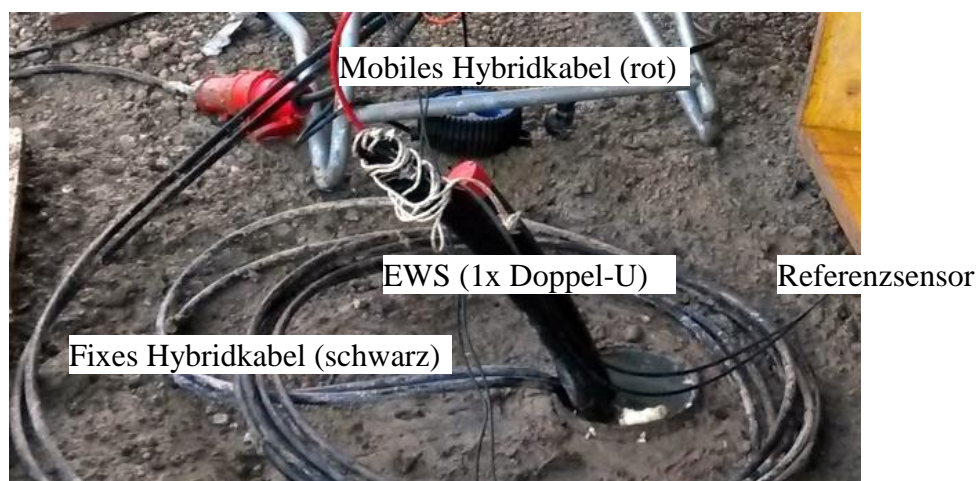


Abb. 6: EWS-Sondenrohre mit Hybridkabel

Vor der Durchführung der Tests wurden jeweils die Integrität der optischen Fasern und der Widerstand der Kupferleiter überprüft, so dass eine reguläre Durchführung des mobilen Kurz-EGRTs vorgenommen werden konnte. Die Steckverbindungen für die faseroptischen Temperaturmessungen wurden mit dem DTS verbunden und die elektrischen Anschlüsse für die Aufheizung des Kabels mit dem Konstantleistungs-Netzteil verbunden.

6. Durchführung der Messung nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter

Vom 21.12. bis 22.12.2015 wurden mit dem faseroptischen Messsystem in einer Erdwärmesonde des Bauprojektes in Laufen Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden kurze EGRTs an zwei verschiedenen Hybridkabeln durchgeführt. Ein fest im Hinterfüllmaterial installiertes Kabel der Firma Helukabel sowie ein mobiles Hybridkabel der Firma Brugg welches in eines der Erdwärmesondenrohre eingebracht wurde. Die Messungen erfolgten um Rückschlüsse auf die Qualität der Hinterfüllung der Sonden ziehen zu können. Die Temperaturentwicklung im Glasfaserkabel wurde während der gesamten Dauer des Tests quasikontinuierlich (Abtast-/Mittelungsrate 2 min) aufgezeichnet.

Ungestörte Ausgangstemperaturen

Zu Beginn jeder Heat-Pulse Messung wurde die bestehende Temperaturverteilung in der Bohrung über einen Zeitraum von mindestens 15 Minuten erfasst. Die Bodentemperaturen vor Beginn des Heizens der untersuchten Sonde sind in Abhängigkeit der Tiefe in der Abbildungen 7 (siehe Anhang) dargestellt. Kleinere Schwankungen der Temperaturen im Dezimeterbereich um bis zu maximal 0,2-0,3 K sind nicht real, sondern dem Messverhalten des DTS (Rauschen), geschuldet.

Beide Temperaturprofile zeigen den gleichen Verlauf: Im oberen Bereich, bis in knapp 20 m u. OKT, stellen die Temperaturen den normalen, der Jahreszeit entsprechenden Temperatur-Tiefenverlauf dar. In 6 m Tiefe wird ein lokales Maximum, eine Folge des vorangegangenen Sommers, von 13,8 °C erreicht. In 12 bis 16 m Tiefe befindet sich ein lokales Minimum von 12,5 °C. Danach steigen die Temperaturen kontinuierlich bis zum Bohrloch tiefsten an, wo 17,7 °C erreicht werden. Über die gesamte Länge lassen sich zwei Bereiche mit konstantem Temperaturgradienten ausmachen:

- Von etwa 20 bis 60 m u. OKT: 0,031 K/m
- Von etwa 85 bis 140 m u. OKT: 0,044 K/m

Der Gradient des oberen Bereichs impliziert eine Jahresdurchschnittstemperatur am Ort der Bohrung von 12,1 °C.

Heat-Pulse Messung (EGRT)

Am 21.12.2015 um 22:11 Uhr wurde mit der Aufheizung des fest installierten Hybridkabels begonnen. Die Aufheizung dauerte etwas über 1,5 Stunden mit einer konstanten Heizleistung von 32,89 W/m. Bis zum nächsten Morgen konnte die Bohrung anschließend wieder einen ungestörten Ausgangszustand annehmen. Am 22.12.2015 um 9:09 Uhr wurde mit dem mobilen Hybridkabel die Erdwärmesonde für über 1,5 Stunden mit einer konstanten Heizleistung von 18 W/m aufgeheizt.

Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung 8a für das fest installierte Hybridkabel Temperaturprofile von verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs abgebildet. Der anschließende Wiederangleich ist in Abbildung 8b dokumentiert. Für das mobile Hybridkabel sind diese Phasen in den Abbildungen 9a und 9b dargestellt. In allen vier Abbildungen ist ein paralleles Verhalten, d.h. gleichförmiges Aufheizen und gleichförmiger

Wiederangleich der Temperaturentwicklung zu beobachten. Es sind hier keine Einflüsse durch stark strömendes Grundwasser oder Fehlstellen in der Hinterfüllung erkennbar.

Mit fortschreitender Heizdauer dringt, die durch das Heizen hervorgerufene Temperaturstörung, in das das Kabel umgebende Material ein. Aus dem Temperaturverhalten nach großer Zeit kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins nach dem in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Hier, bei einem Kurz-EGRT werden die Temperaturen des zeitlichen Nahfeldes nach Beginn des Heizens ausgewertet. Während dieses kurzen Zeitraumes wird die Temperaturentwicklung von einem integralen Verhalten der thermischen Eigenschaften der Sondenrohre, Rohrinhalts (hier Wasser), Verfüllmaterials und je nach Geometrie, bzw. Lage des Hybridkabels u. U. auch schon teilweise des angrenzenden Erdreichs bestimmt. Die so bestimmten Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes für beide Tests sind in Abbildung 10 dargestellt. Der Mittelwert der Ergebnisse des fest installierten Hybridkabels beträgt $1,35 \pm 0,26$ W/m/K, der des mobilen $1,14 \pm 0,14$ W/m/K.

Hier zeigen die Ergebnisse der beiden Tests nicht den gleichen Verlauf, es sind kleinere Unterschiede erkennbar: Für das fest im Hinterfüllmaterial angebrachte Hybridkabel werden größere Schwankungen im Tiefenverlauf und von etwa 10 bis 126 m u. OKT tendenziell höhere Werte angezeigt. Diese Schwankungen sind zwar größer als die Schwankungen der Ergebnisse des mobilen Kurz-EGRT, aber noch im Rahmen wie sie bei normalen EGRTs angetroffen werden. Sie sind durch das Messgerät und unterschiedliche Positionen des Hybridkabels und der Sondenrohre im Tiefenverlauf der Bohrung verursacht. Liegt zum Beispiel das Hybridkabel am Bohrlochrand an, so beeinflusst dort auch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, die sehr oft höher ist als die des Hinterfüllmaterials, das Ergebnis. Die tendenziell höheren Werte des festen Kurz-EGRT sowie die größeren Schwankungen sind durch die unterschiedliche Lage des Hybridkabels in der Bohrung erklärbar und kein Zeichen von mangelhafter Hinterfüllung. Insgesamt sind also auch hier keine Fehlstellen in der Hinterfüllung erkennbar.

Bohrlochwiderstand

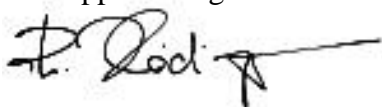
In Abbildung 11 ist der Bohrlochwiderstand, bestimmt aus den Daten des fest installierten Hybridkabels dargestellt. Der Durchschnittswert des Bohrlochwiderstands für die Sonde beträgt $0,065$ K m/W. Für eine Bestimmung des Bohrlochwiderstandes mit dem mobilen Hybridkabel fehlen noch Untersuchungen zu den thermischen Übergangswiderständen Fluid-Sondenrohr um gesicherte Aussagen treffen zu können.

Sowohl bei einer Betrachtung der Entwicklung der Absoluttemperaturen als auch über die daraus bestimmte Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes wurden in beiden Kurz-EGRTs keine Hinweise auf mangelhafte Hinterfüllung in der untersuchten Erdwärmesonde detektiert.

Karlsruhe, den 20. Januar 2016

GTC Kappelmeyer GmbH

Philipp Heidinger



Axel Fabritius



7. Literaturhinweise

- Carlslaw, H.S. & Jaeger, I.C. (1959): Conduction of heat in solids, Oxford University Press, London, 2nd ed.
- Fourier, J.B.J. (1822): Théorie Analytique de la Chaleur: Paris, Firmin Didot, Père et Fils, 639 p.
- Gilmore, M. (1991): Fibre optic cabling – Theory, design and installation practice, Oxford Newness
- Heidinger, P. et al.(2004): EGRT – Enhanced Geothermal Response Tests, in: Die neue Rolle der Geothermie, Tagungsband GTV, 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau i.d.Pf. 10. -12.11.04
- Riegger, M. (2011): Qualitätsuntersuchung von Erdwärmesonden im Realmaßstab, Tagungsband des 11. Internationales Anwenderforum oberflächennahe Geothermie 2011, Verlag: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, ISBN / Nr.: 978-3-941785-62-5
- Riegger, M., Heidinger, P, Lorinser, B, Stober, I. (2012): Auswerteverfahren zur Kontrolle der Verfüllqualität in Erdwärmesonden mit faseroptischen Temperaturmessungen, Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, doi:10.1007/s00767-012-0192-2
- Sattel, G. (1979): Aufbau einer Messapparatur zur Bestimmung thermischer Parameter von Gesteinen und Messungen an tertiären Sedimenten, Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe
- Zschocke A. (2003): Software für die Anwendung der Pécletzahlanalyse auf Temperaturlogs in einem geschichteten Untergrund. GGA-Institut, Hannover

8. Anhang

Abbildung 7

Kurz-EGRTs Laufen: ungestörte Ausgangstemperaturen

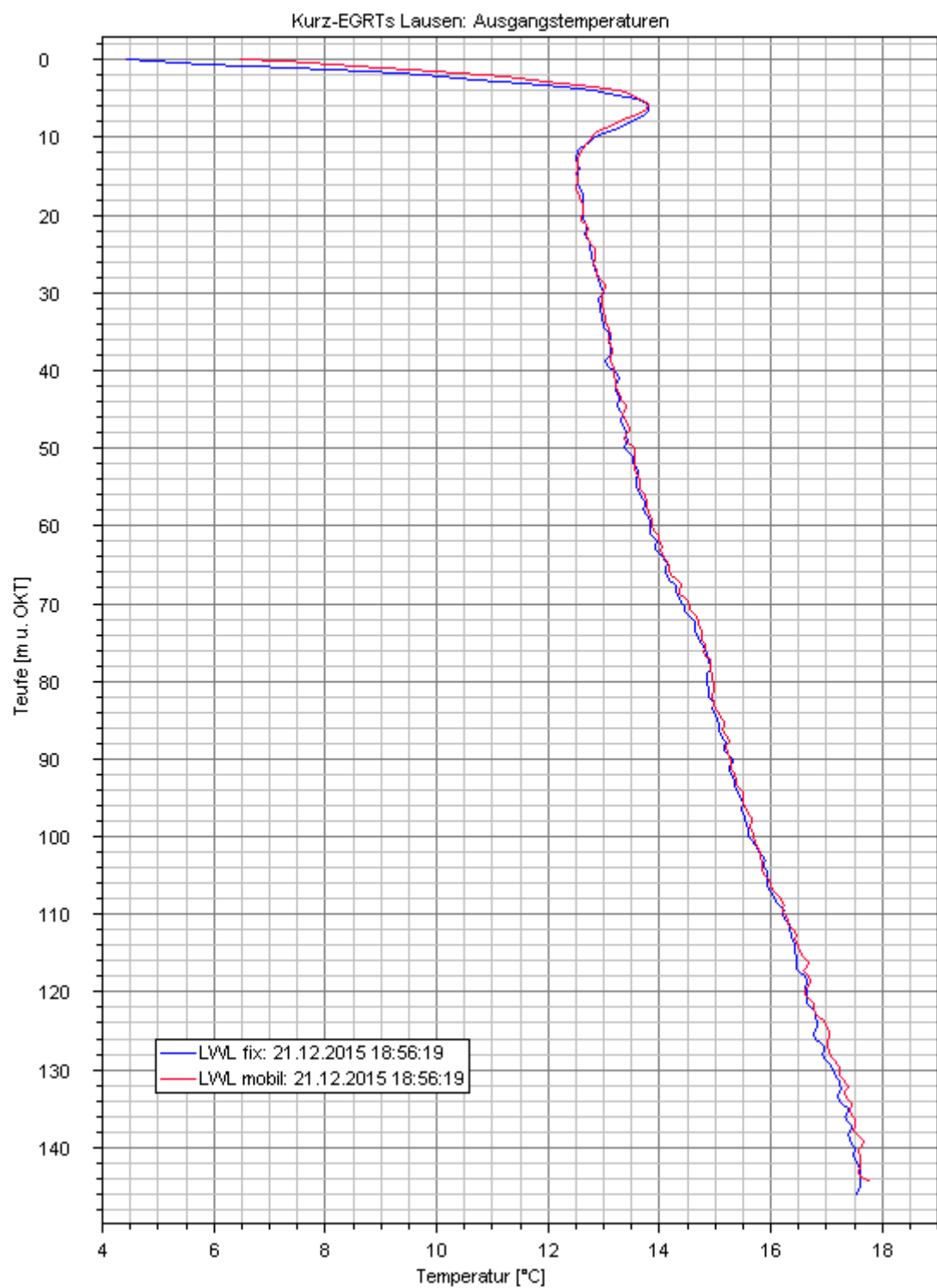


Abbildung 8a

Kurz-EGRTs Laufen: LWL fix, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Aufheizvorgangs

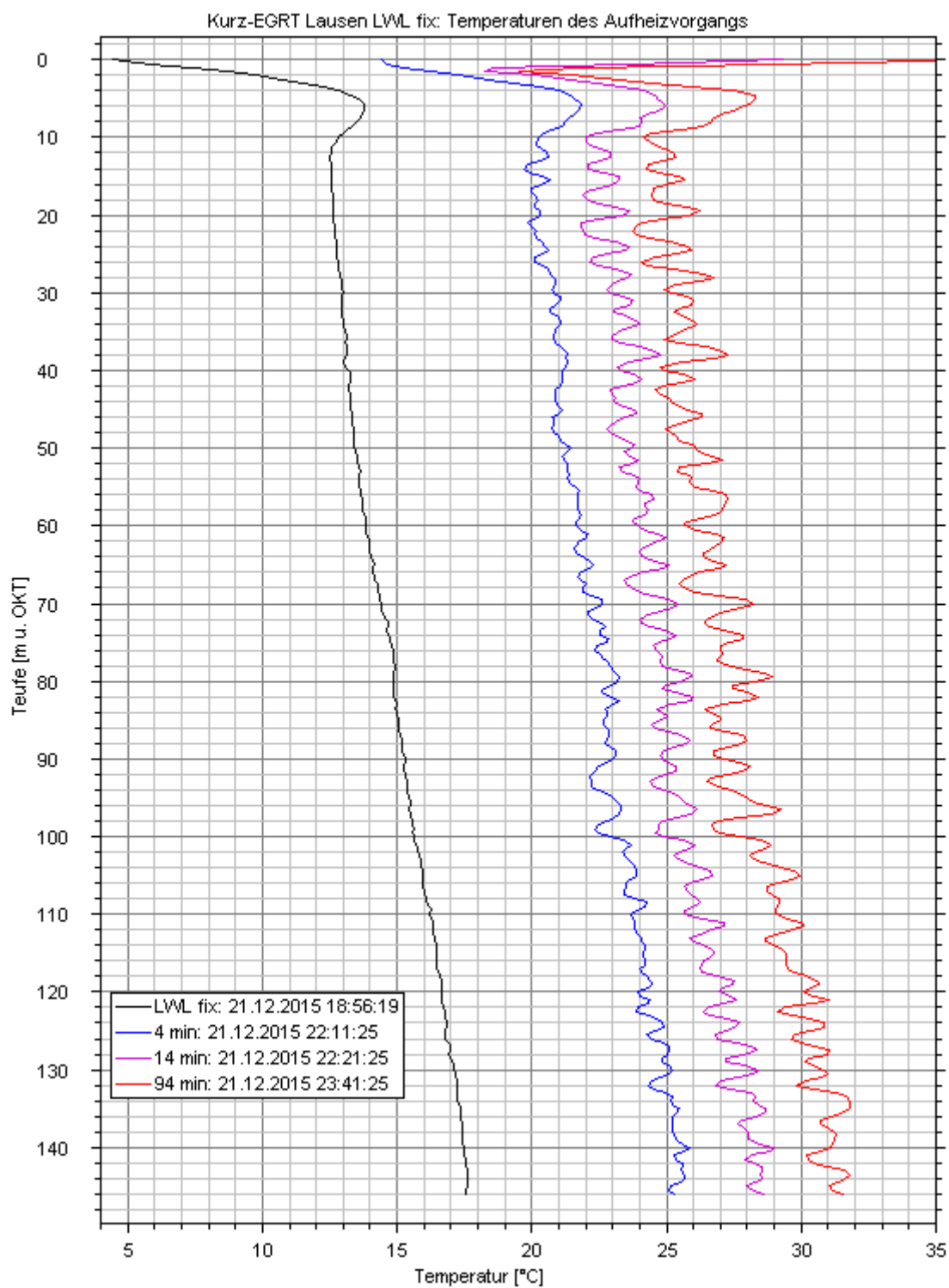


Abbildung 8b

Kurz-EGRTs Laufen: LWL fix, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Wiederangleichs

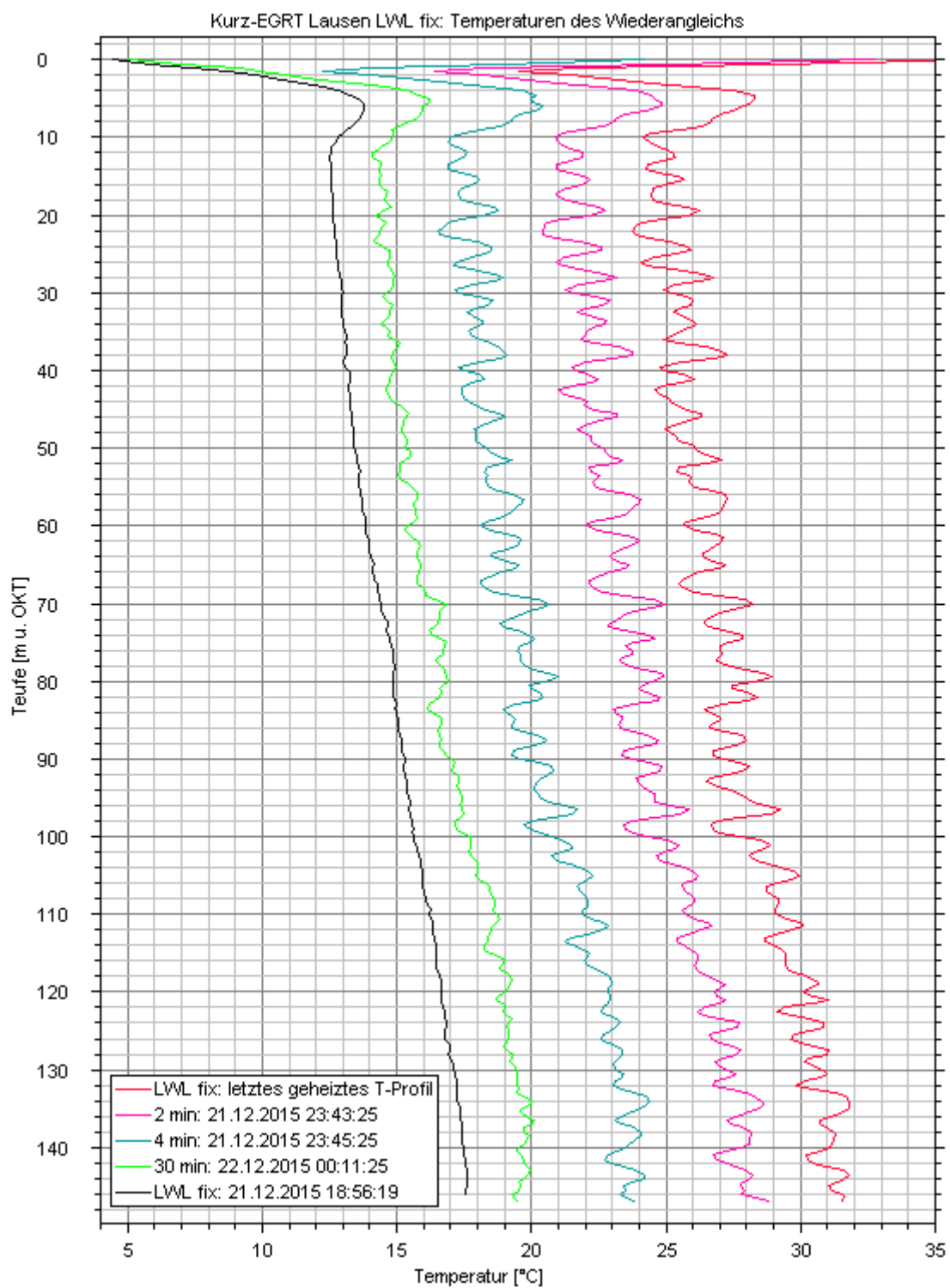


Abbildung 9a

Kurz-EGRTs Laufen: LWL mobil, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Aufheizvorgangs

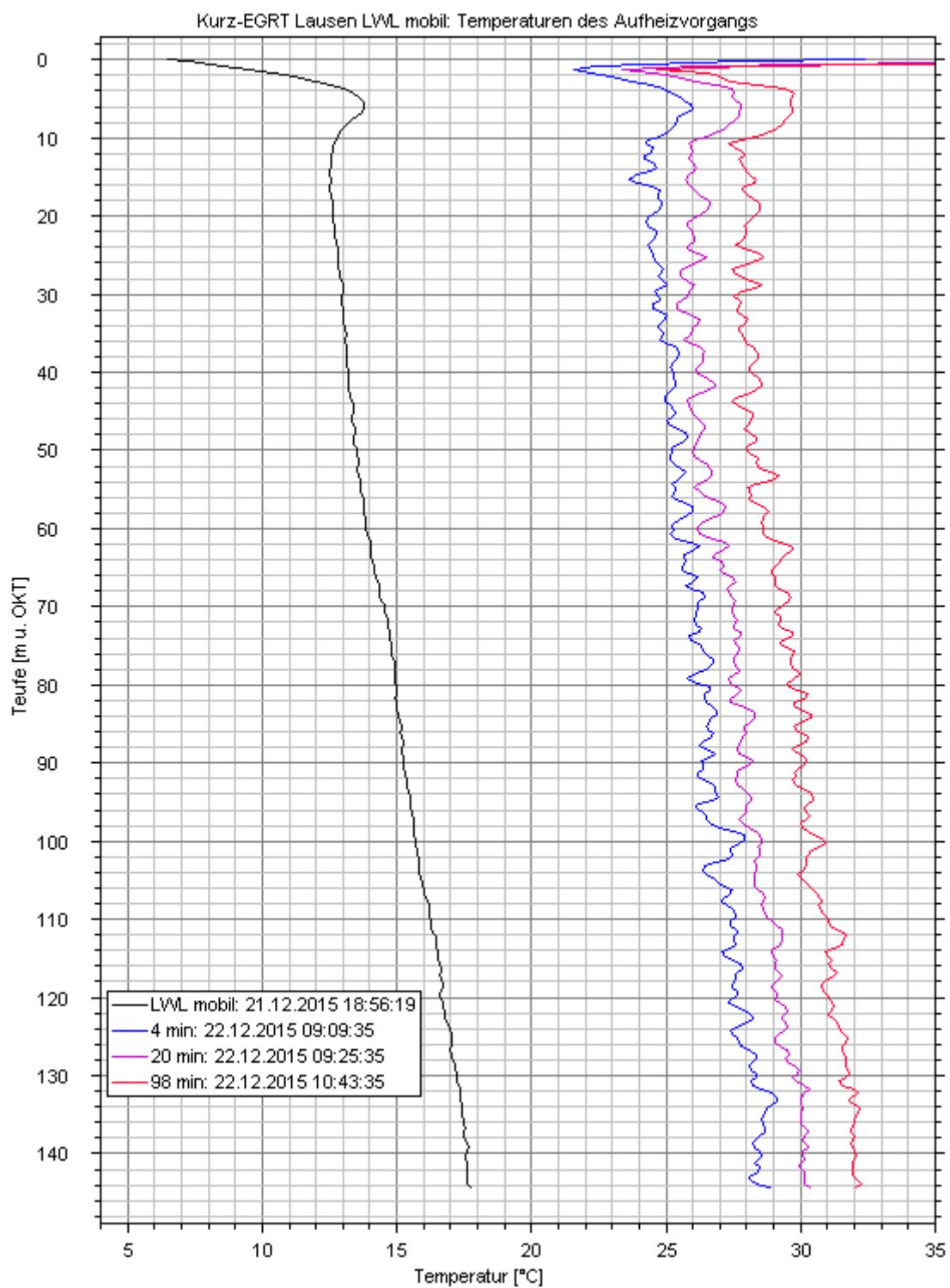


Abbildung 9b

Kurz-EGRTs Laufen: LWL mobil, ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile des Wiederangeleichts

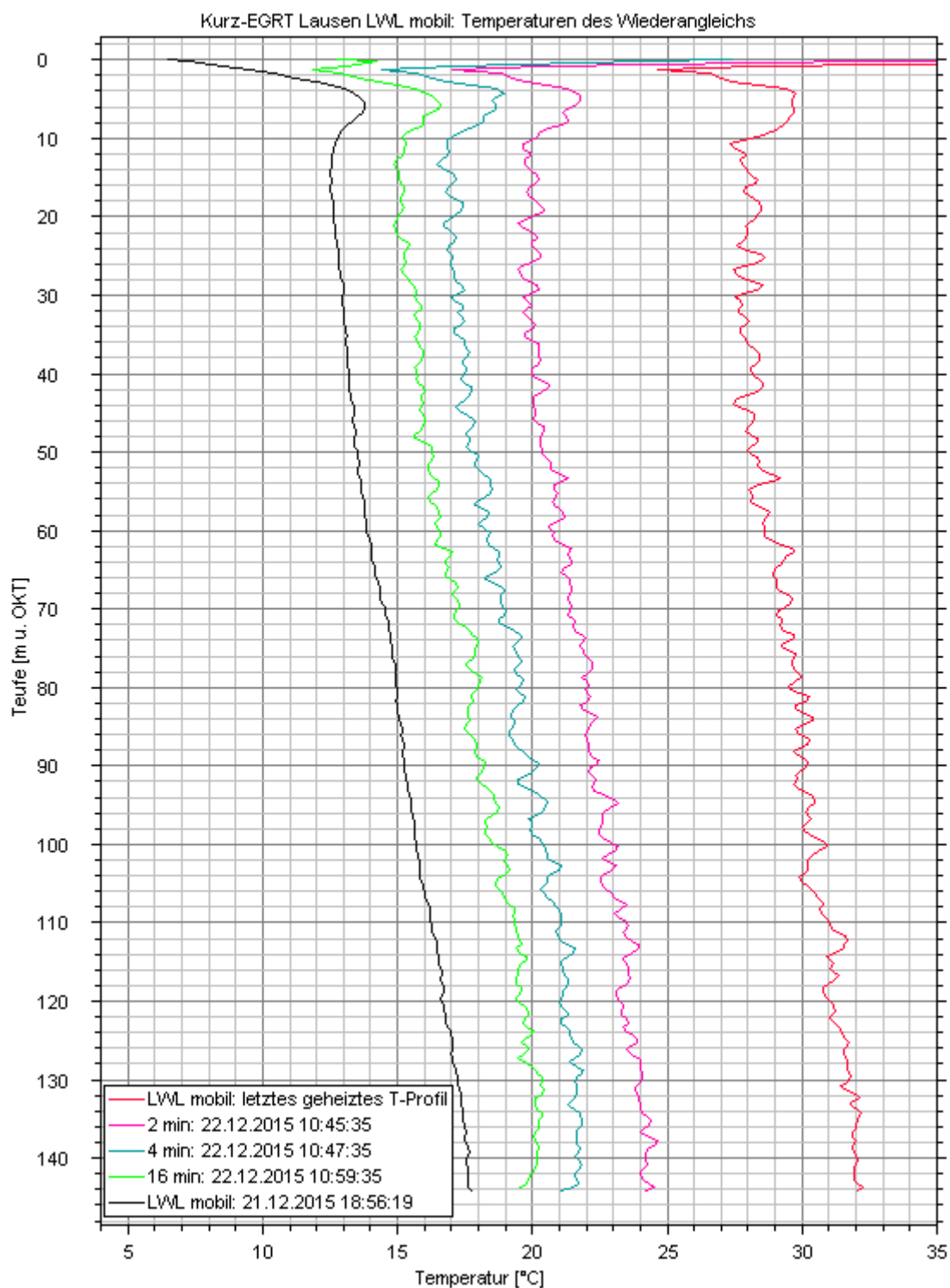


Abbildung 10

Kurz-EGRTs Lausen: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

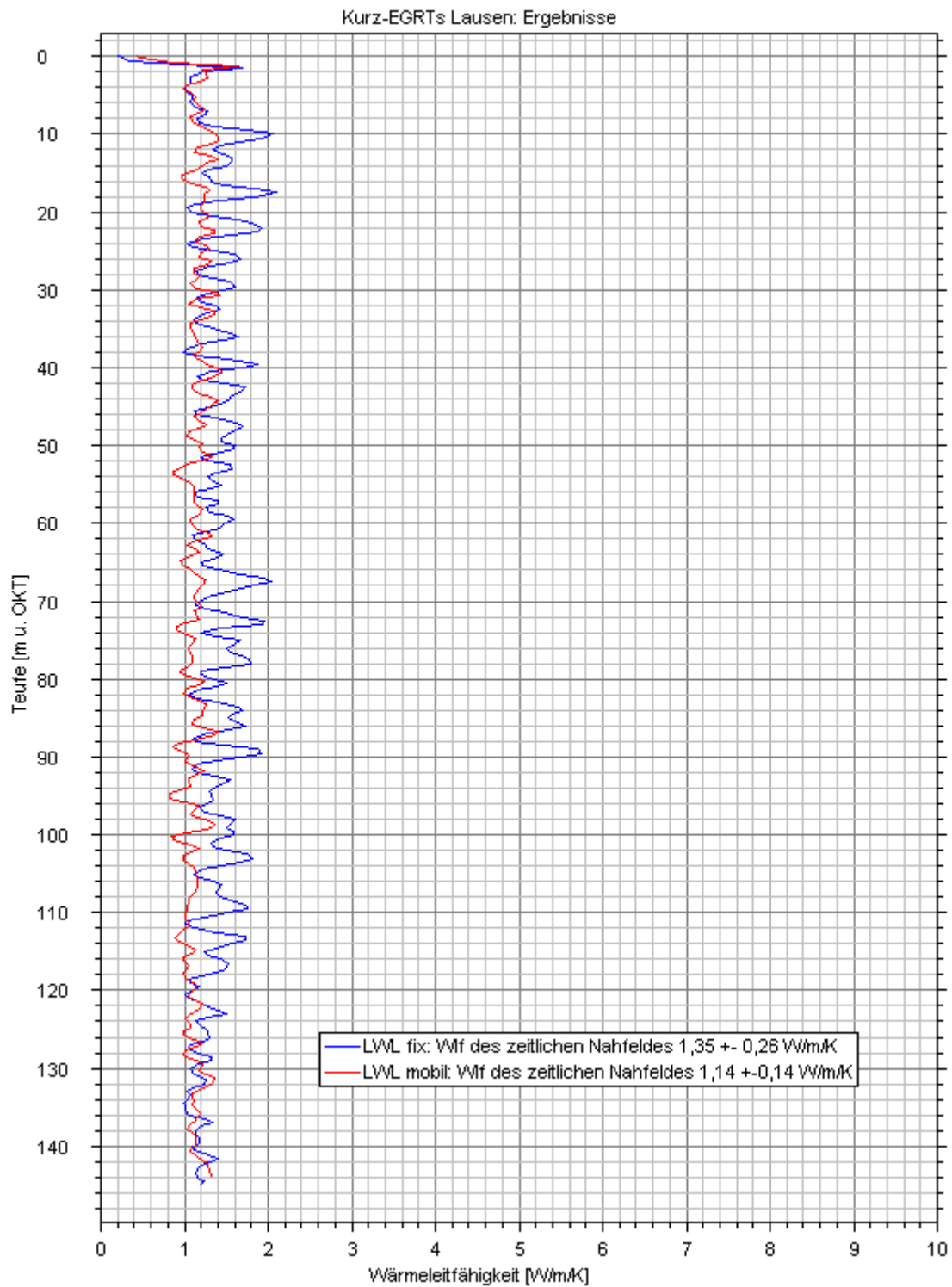


Abbildung 11

Kurz-EGRTs Lausen LWL fix, Bohrlochwiderstand-Tiefen-Profil

