

28. April 2017

Faseroptische Temperaturmessungen - zur Detektierung der Hinterfüllungsqualität

Schlussbericht mit UpDate zu Drittmessungen in Deutschland

Inhalt:

- Beispiele von Messungen mit Fehlstellen
- Zusammenfassung der durchgeführten Messungen
- UpDate zu Drittmessungen in Deutschland



Arbeiten in Zürich, Aufnahme vom November 2015

Berichtsnummer.: E1712-01P

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

Sektion Erneuerbare Energien

Mühlestrasse 4

CH-3063 Ittigen

Bearbeiter GTC:

Dipl. Geophys. Philipp Heidinger

Dipl. Geophys. Axel Fabritius

GTC
Kappelmeyer GmbH

Heinrich-Wittmann-Straße 7a
D-76131 Karlsruhe

Tel.+49-721-60008
Fax+49-721-60009

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

1. Zusammenfassung

Der Bericht gliedert sich in drei Abschnitte.

Beispiele von Messungen mit Fehlstellen

Im ersten Abschnitt (Kapitel 5) wird ein Überblick über in der Praxis angetroffene Anomalien der Hinterfüllung gegeben, die mit der hier verwendeten Untersuchungsmethode der Kurz-EGRTs detektiert wurden. Diese Kurz-EGRTs (Enhanced Geothermal Response Test) sind Heizpulse von 1 bis 2 Stunden Dauer in der Erdwärmesonde, anhand welcher aufgrund kürzerer Aufheizdauer und damit geringerer Eindringtiefen als beim regulären EGRT u. a. Informationen zur Wärmeleitfähigkeit aus dem Nahbereich um das Messkabel, v.a. aus dem Bereich der Hinterfüllung gewonnen werden können.

Zusammenfassung der durchgeführten Messungen

Der zweite Abschnitt (Kapitel 6 bis 12) umfasst den Hauptteil dieses Berichts. Die EnergieSchweiz hatte GTC Kappelmeyer beauftragt, eine Serie von Messungen durchzuführen, welche die Qualität der Hinterfüllung von Erdwärmesonden aufzeigen. Die dafür nötigen Testfelder wurden von EnergieSchweiz organisiert. Über die Laufzeit des Projektes von November 2015 bis März 2017 wurden Messungen an insgesamt vier verschiedenen Erdwärmesondenprojekten durchgeführt. Dies waren:

- Raum Zürich, Messungen vom 16.11. bis 19.11.2015. Es wurde in insgesamt 10 Erdwärmesonden eines Bauprojektes Kurz-EGRTs durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei unproblematischen Gegebenheiten eine gleichbleibende Qualität der Hinterfüllung erzielt werden kann.
- Laufen, Messungen vom 21.12. bis 22.12.2015. Dabei wurden in einer Erdwärmesonde zwei Messungen mit unterschiedlichen Sensoren durchgeführt: Ein fest im Hinterfüllmaterial installiertes Messkabel sowie einem mobilen Messkabel welches nur temporär in eines der Erdwärmesondenrohre eingebracht wurde. Beide Messarten erzielen vergleichbare Ergebnisse.
- Wallis, Messung am 11.02.2016 an einer stark von Grundwasser umströmten Erdwärmesonde. Die Ergebnisse zeigen zwei deutlich auffällige Bereiche mit erhöhten Werten, die auf eine mangelhafte Hinterfüllung im betroffenen Bereich von 26 bis 62 m u. OKT deuten.
- Aarau, Messungen vom 9.01.2017 bis 3.03.2017. Hinzugefügt wurden auch die Kurzzeitergebnisse eines EGRT vom Dezember 2015 in einer der Erdwärmesonden. In einem stark von Grundwasserströmung beeinflussten Erdwärmesondenfeld wurden teilweise verschiedene Massnahmen (HDPE-Rohr, Gewebepacker, Gewebestrumpf) zum Schutz der Hinterfüllung getroffen. Die Ergebnisse zeigen in einer der Sonden, die ohne zusätzliche Schutzmassnahmen niedergebracht wurde, deutliche Fehlstellen, die nach einer erneuten Messung ein Jahr später wesentlich stärker ausgeprägt waren. Die EWS mit Schutzmassnahmen hingegen zeigen alle im geschützten Bereich keine

Auffälligkeiten. Von den drei untersuchten Verfahren zeigte der Gewebestumpf das beste Verhältnis von Aufwand zu Nutzen.

Für alle diese Messkampagnen gibt es detaillierte, separate Berichte, die dem BFE vorliegen. Im vorliegenden Bericht wird nur eine Auswahl der Ergebnisse, die für das Verständnis und für die Schlussfolgerungen nötig sind, gezeigt.

Um auch weitere Aussagen über die zeitliche Haltbarkeit von Hinterfüllmaterial zu ermöglichen, wären weitere Messungen, speziell im Erdwärmesondenfeld der Messkampagne im Aarau, zu späteren Zeitpunkten wünschenswert.

Update zu Drittmessungen in Deutschland

Im dritten und letzten Abschnitt (Kapitel 13) wird eine kurze Zusammenfassung des aktuellen Standes der Forschung zum Anmischen, Einbringen und Qualität des Hinterfüllmaterials von Erdwärmesonden, sowie deren Überprüfung gegeben.

2. Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	3
2.	Inhaltsverzeichnis	5
3.	Verzeichnis der Abbildungen	6
4.	Beschreibung des faseroptischen Temperaturmessverfahrens	8
5.	Rückschlüsse auf Fehlstellen des Hinterfüllmaterials durch Bestimmung des Bohrlochwiderstands (Kurz-EGRT) - Beispiele	18
6.	Überblick der durchgeführten Messungen	27
7.	Zürich: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter	29
8.	Lausen: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter	31
9.	Wallis: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter	32
10.	Aargau: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter	33
11.	Zusammenfassung der Ergebnisse	38
12.	Interpretation	40
13.	Update der Situation in Deutschland	42
14.	Literaturhinweise	48
15.	Anhang	50

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 und Bohrung mit Sondenrohren und Hybridkabel, Beispielbilder
- Abb. 6: Mangelhafte Ringraumverfüllung in etwa 15 m
- Abb. 7: Unvollständige Hinterfüllung mit Tonpellets
- Abb. 8: Unvollständige Hinterfüllung mit Tonpellets - Ein Jahr später
- Abb. 9: Mangelhafte Hinterfüllung am Bohrlochtiefsten
- Abb. 10: Anomalie am Bohrlochtiefsten
- Abb. 11: Probleme bei der Hinterfüllung im Karst
- Abb. 12: Fehlende Hinterfüllung
- Abb. 13: Anomalie oberflächennah und im Bohrlochtiefsten

im Anhang:

- Abb. A1: Zürich: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
- Abb. A2: Zürich, B10: Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT
- Abb. A3: Zürich: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A4: Lausen: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
- Abb. A5: Lausen: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A6: Wallis: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
- Abb. A7: Wallis: Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT
- Abb. A8: Wallis: Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Wiederangleich
- Abb. A9: Wallis: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profil in Verbindung mit Geologie
- Abb. A10: Aargau: EWS 10 – Effektive Wärmeleitfähigkeiten des EGRT von Dezember 2015 in Verbindung mit dem geologischen Profil
- Abb. A11: Aargau: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
- Abb. A12: Aargau: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A13: Aargau: EWS 10 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des EGRT

Abb. A14: Aargau: EWS 10 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT

Abb. A15: Aargau: EWS 10 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile

Abb. A16: Aargau: EWS 11 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile

Abb. A17: Aargau: EWS 11 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT

Abb. A18: Aargau: EWS 9, EWS 8, EWS 7, EWS 6 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile

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.

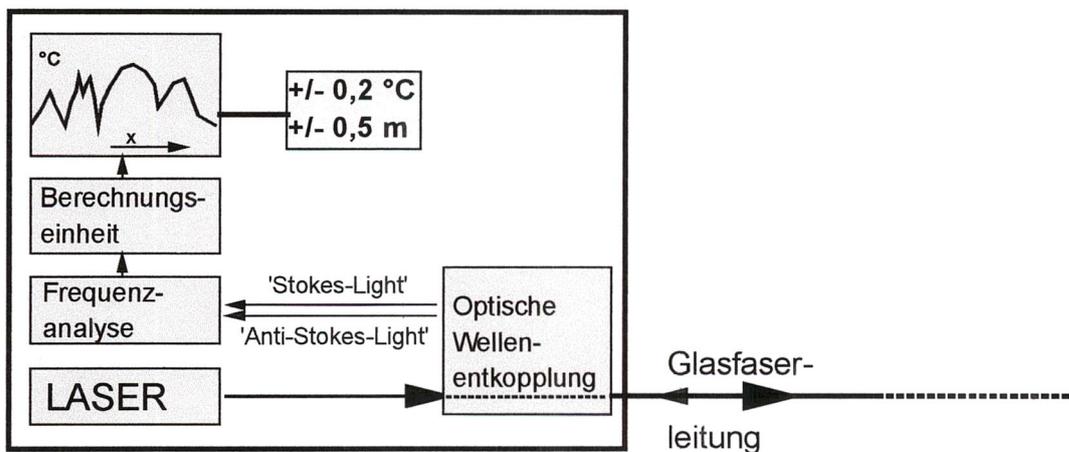


Abb. 1: Messprinzip

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.

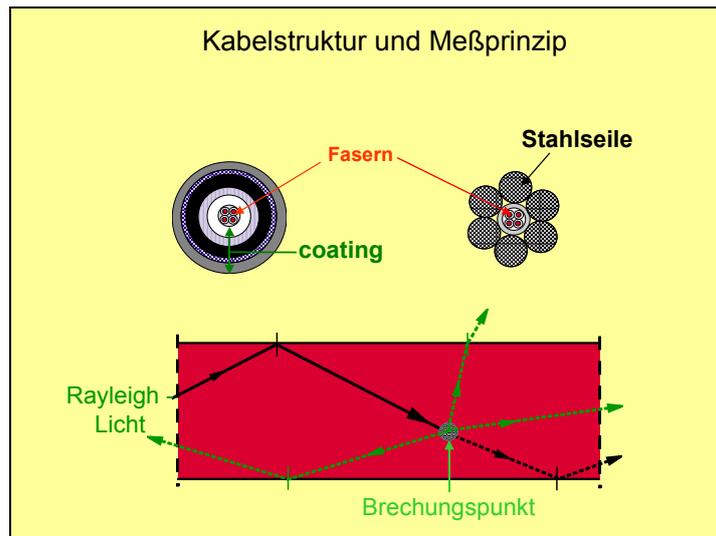


Abb. 2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Kabelaufbauten (oben). Schematische Darstellung der Streuung bzw. Reflexion eines optischen Signals in einer Glasfaser (unten)

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

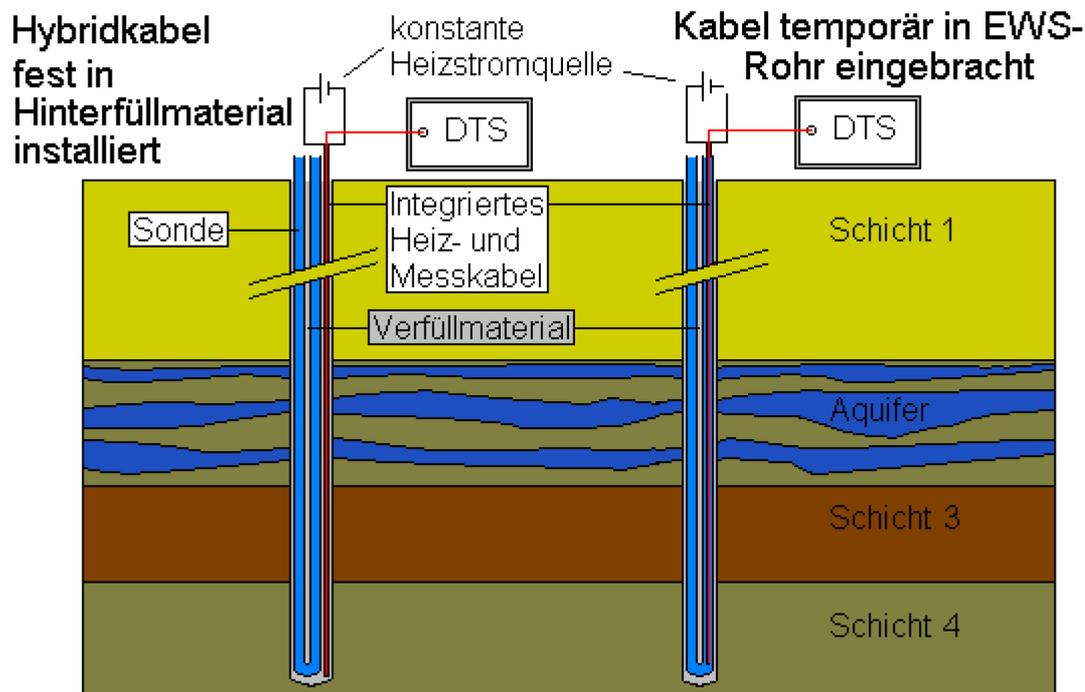


Abb. 3: Schema des Aufbaus für einen Enhanced Geothermal Response Test in einer Erdwärmesonde. Links EGRT, rechts EGRT-Mobil

EGRT: 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. Beim EGRT-Mobil wird das Hybridkabel in ein Sondenrohr eingebracht. Nach Beendigung der Messung wird es wieder gezogen.

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:

$$T(r, t) = \frac{q_L}{4\pi} \left(1 - \frac{\gamma}{\lambda} \frac{4\kappa t}{r^2} \right) + T_0$$

$T(r=r_b, t)$	=	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:

$$T_F(t) = \frac{q_L}{4\pi} \left(1 - \frac{\gamma}{\lambda} \frac{4\kappa t}{r_B^2} \right) + q_L R_B + T_0$$

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

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

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 Erdwärmesonde). Aus dieser wird die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials extrahiert und der Bohrlochwiderstand aus der Geometrie der Erdwärmesonde bestimmt.

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

$$P_e = \frac{\lambda_{kond} + \lambda_{konv}}{\lambda_{kond}} = \frac{\lambda_{kond} + v \cdot d \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_{kond}}$$

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

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

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

$$v_f = \frac{\lambda_{k_{\text{kondukt. d. n.}}}}{l \rho c_p}$$

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]

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

l = charakteristische Länge [m]

Die Pécletzahlanalyse 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.

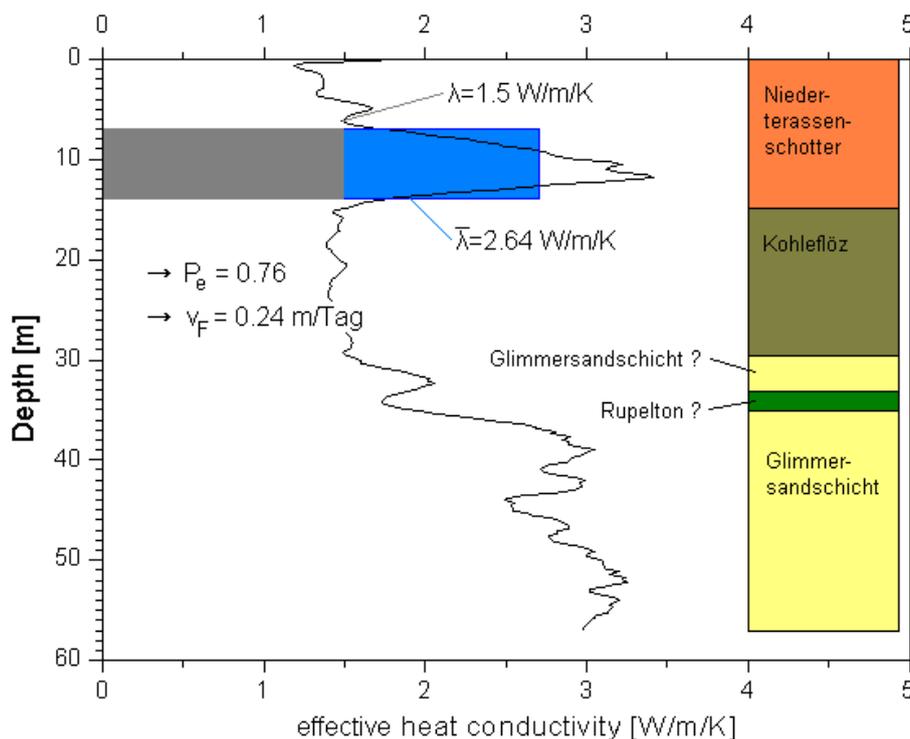


Abb. 4: Effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens über die Tiefe der Bohrung und Bestimmung der Filtergeschwindigkeit durch die Pécletzahlanalyse

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 Péceletzahl 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 Péceletzahlanalyse im Aquifer auch absolut zu bestimmen.

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

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

Werden 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 an Erdwärmesonden im 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 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.

Beispiele

Im Folgenden wird ein Überblick über in der Praxis angetroffene Anomalien der Hinterfüllung gegeben. Das meiste sind Einzelfälle, öfters hingegen sind Hinweise auf mangelhafte Hinterfüllung oberflächennah und im Bohrlochtiefsten zu beobachten:

1. Mangelhafte Ringraumverfüllung in etwa 15 m Tiefe Seite 19
2. Unvollständige Hinterfüllung mit Tonpellets Seite 20
3. Mangelhafte Hinterfüllung am Bohrlochtiefsten Seite 22
4. Anomalie am Bohrlochtiefsten Seite 23
5. Probleme bei der Hinterfüllung im Karst Seite 24
6. Fehlende Hinterfüllung Seite 25
7. Anomalie oberflächennah und im Bohrlochtiefsten Seite 26

Beispiel 1: Mangelhafte Ringraumverfüllung in etwa 15 m

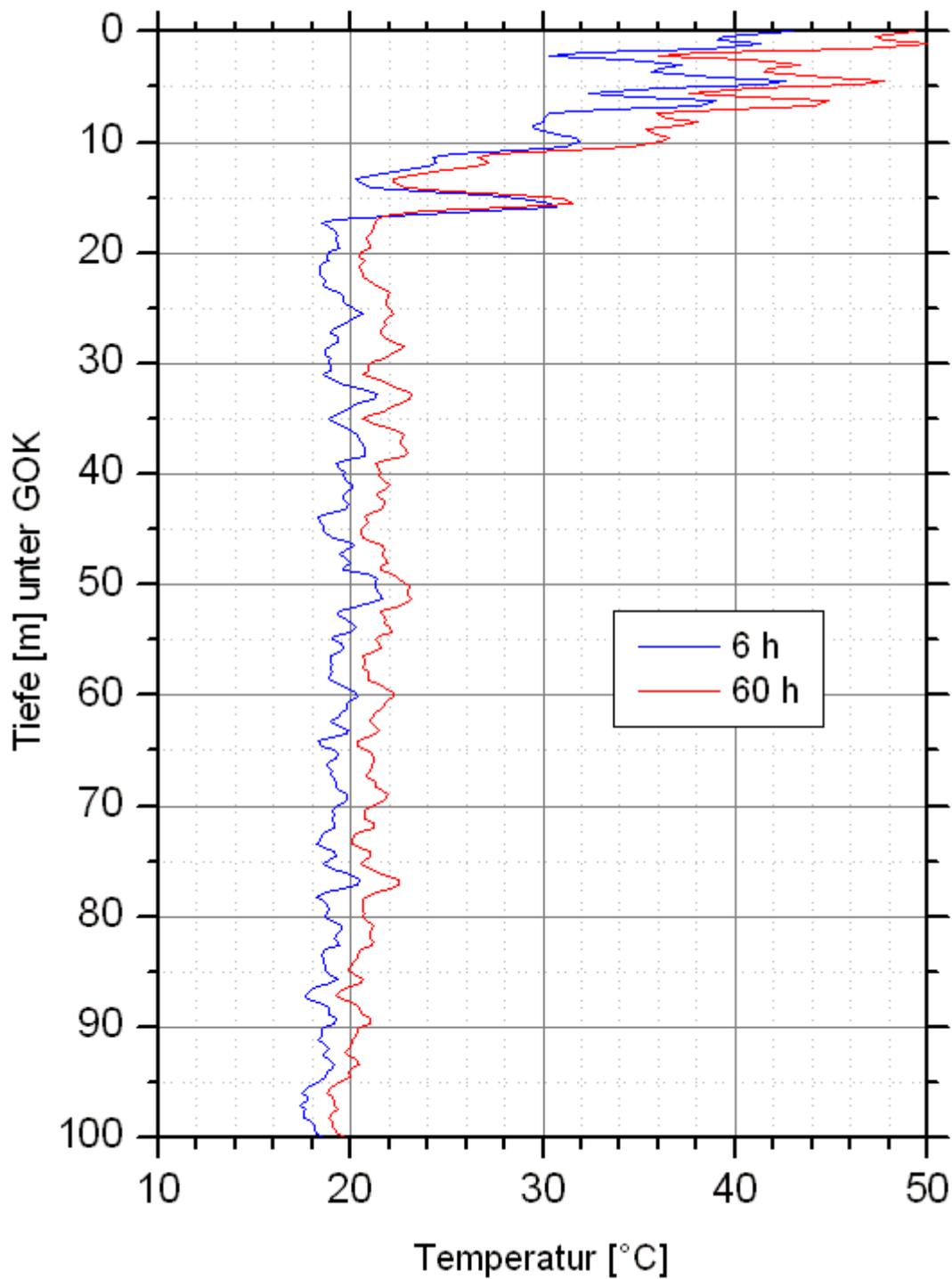


Abb. 6: Temperatur – Tiefenprofile für zwei verschiedene Zeiten ab Heizbeginn. Im luftgefüllten Hohlraum findet eine starke Aufheizung statt.

Beispiel 2: Unvollständige Hinterfüllung mit Tonpellets

Besonderes: Das Hinterfüllmaterial aus Tonpellets wurde bis knapp 60 m Tiefe unvollständig gesättigt und konnte deshalb nicht ausquellen, was zu Lufteinschlüssen führte

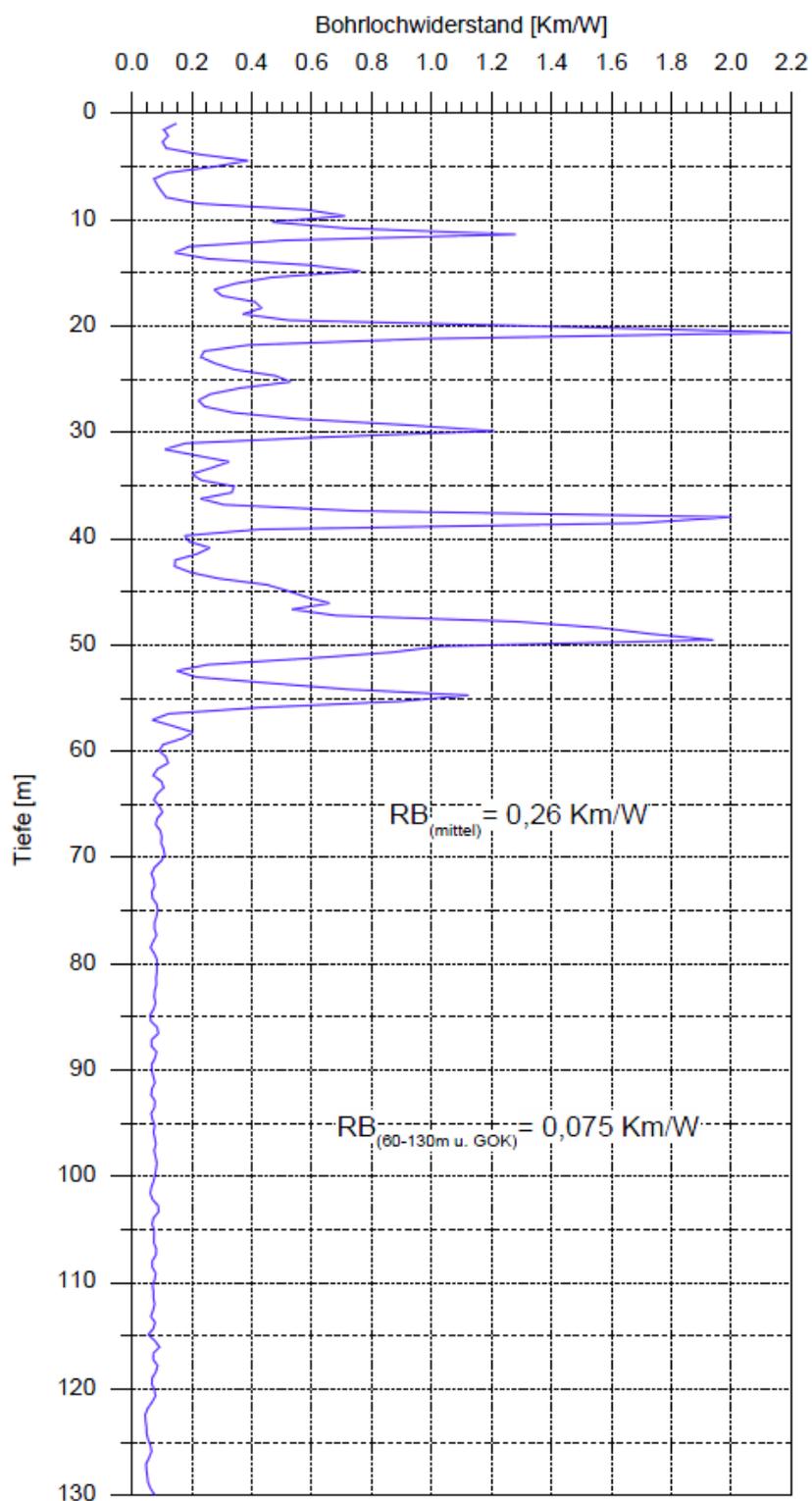


Abb. 7: Bohrlochwiderstand

Die Messung wurde ein Jahr später wiederholt. Wie zu sehen ist, quellen die Tonpellets langsam nach.

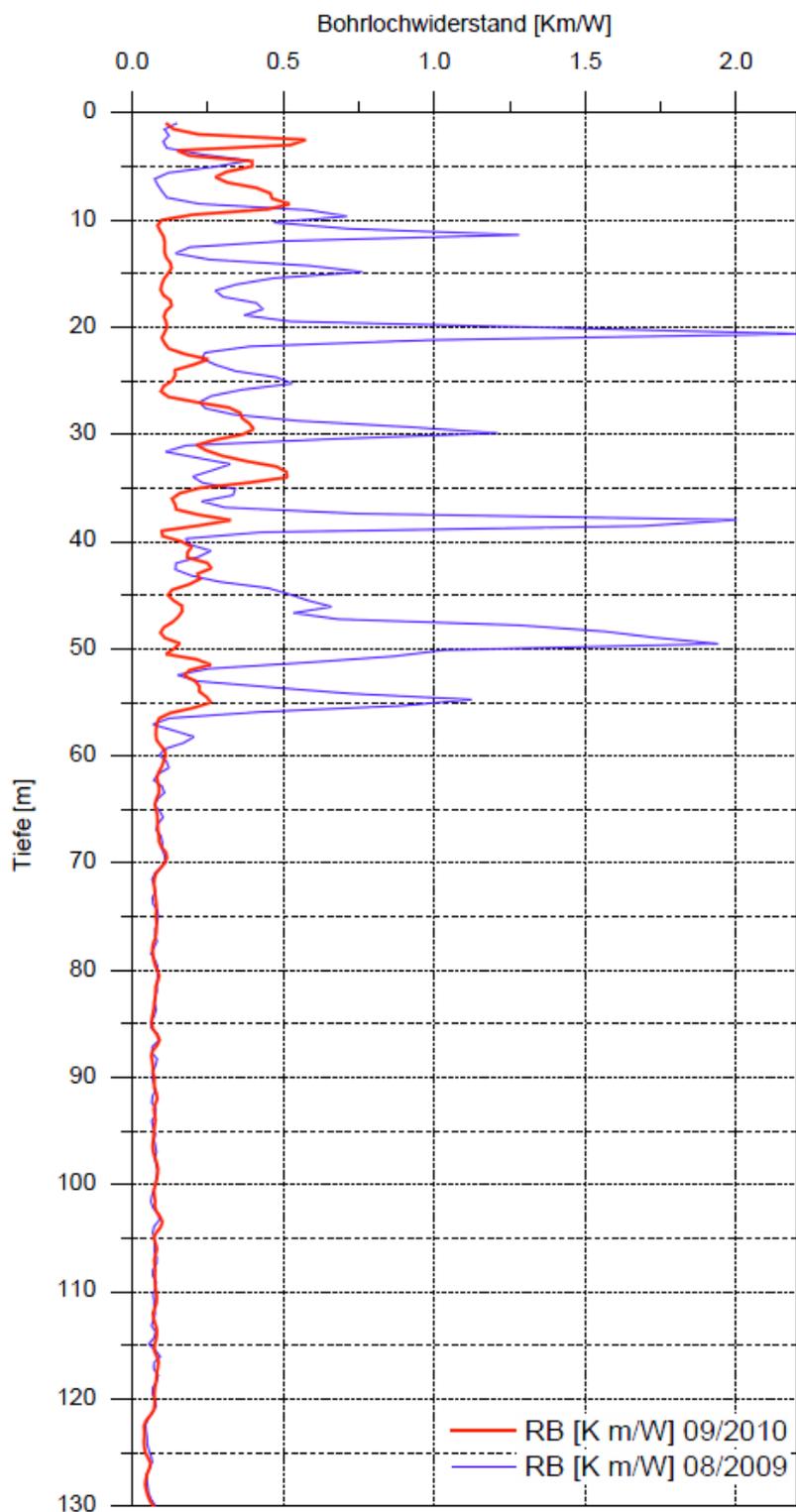


Abb. 8: Bohrlochwiderstand

Beispiel 3: Mangelhafte Hinterfüllung am Bohrlochtiefsten

Besonderes: Nicht anonymisiert, da Forschungsprojekt. Verschiedene Füllmaterialien. Sonde 4 (S1-4 in der Graphik: Charge 1 - Bohrung 4) am Bohrlochtiefsten (ab 28 m bis 30,5 m Tiefe) nicht hinterfüllt, absichtliche Fehlstelle.

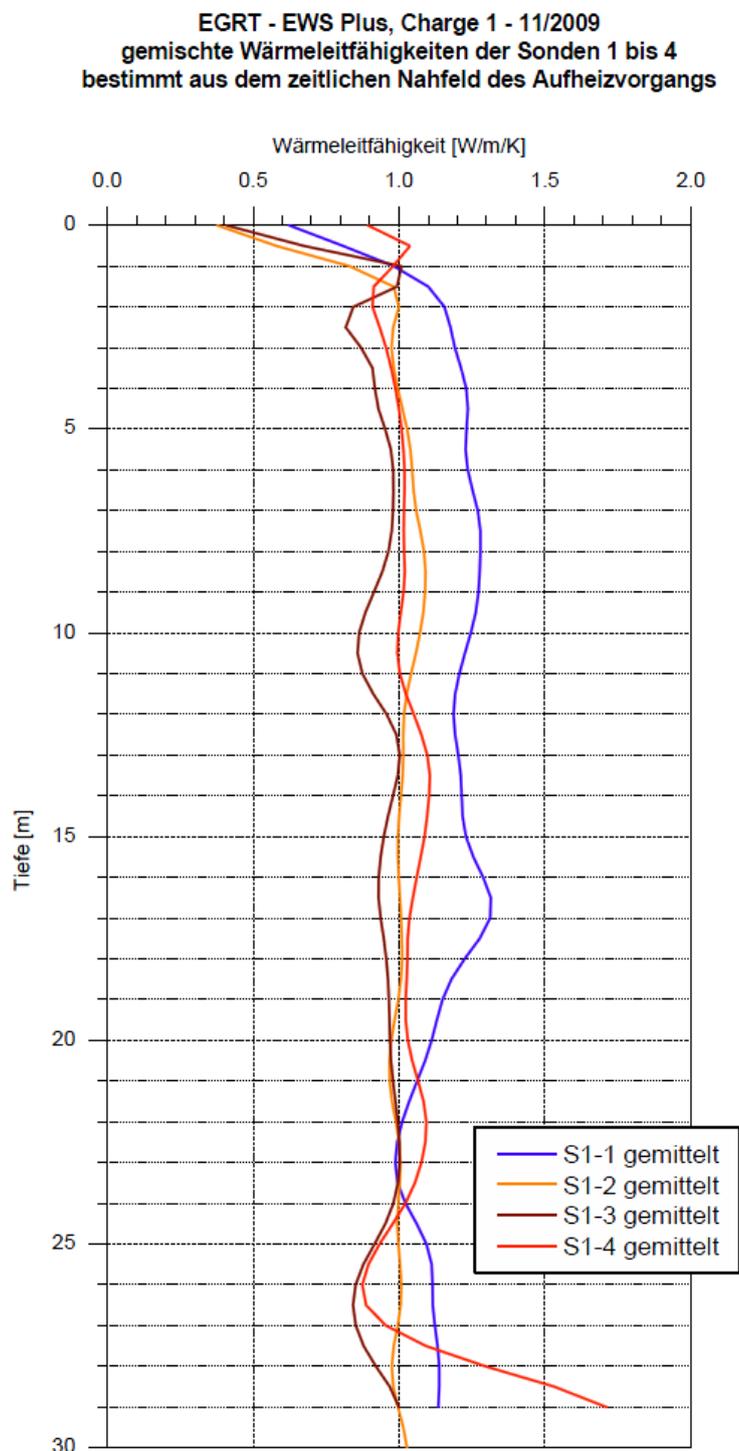


Abb. 9: Effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes

Beispiel 4: Anomalie am Bohrlochtiefsten

Besonderes: Dargestellt ist die effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes, hier Bohrungseigenschaft genannt. Die Anomalie am Bohrlochtiefsten deutet dort auf eine mangelhafte Hinterfüllung.

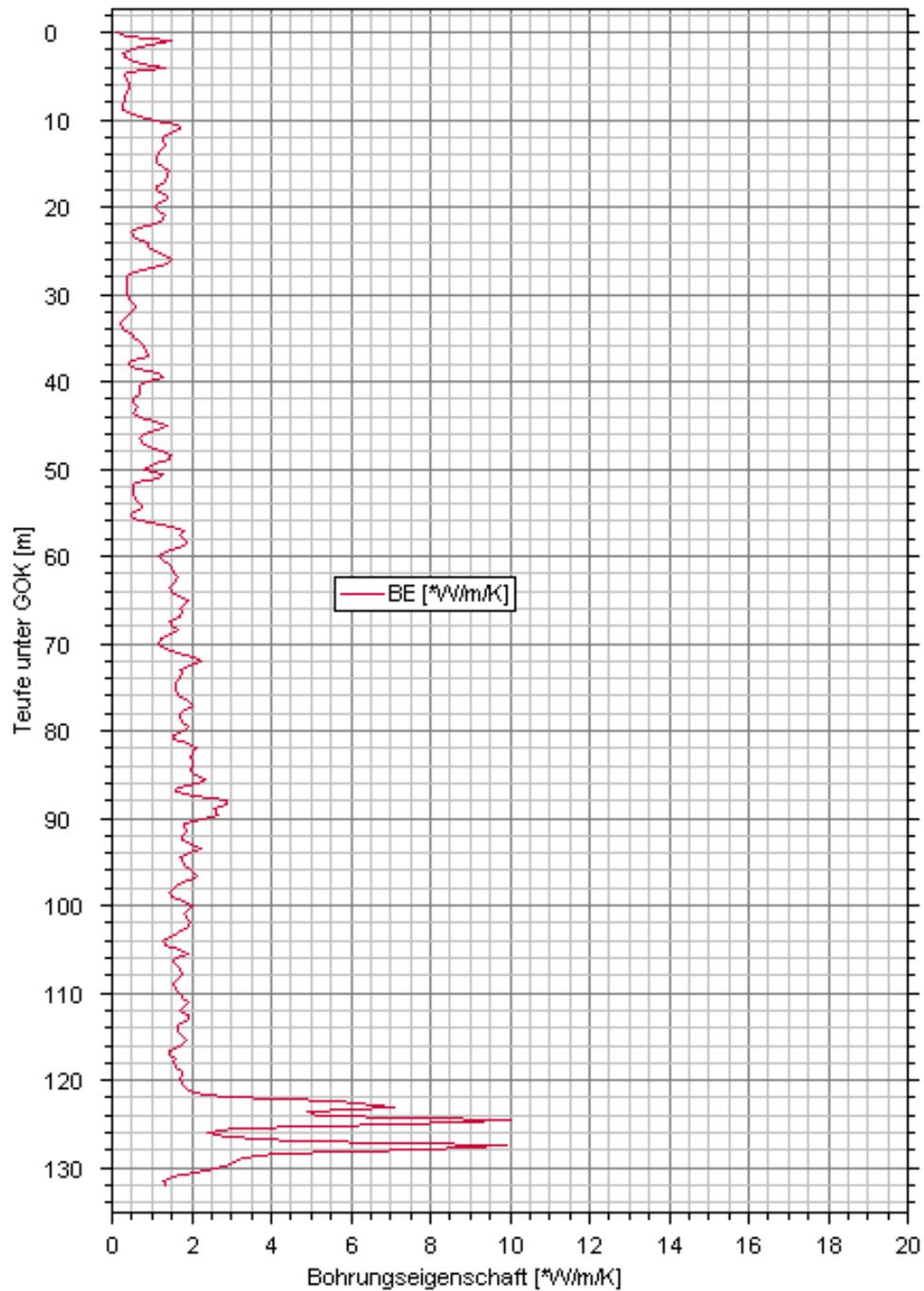


Abb. 10: Effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes

Beispiel 5: Probleme bei der Hinterfüllung im Karst

Besonderes: im oberen Bereich erfolgte keine Hinterfüllung da die Hohlräume im Karst alles eingebrachte Füllmaterial „schluckten“.

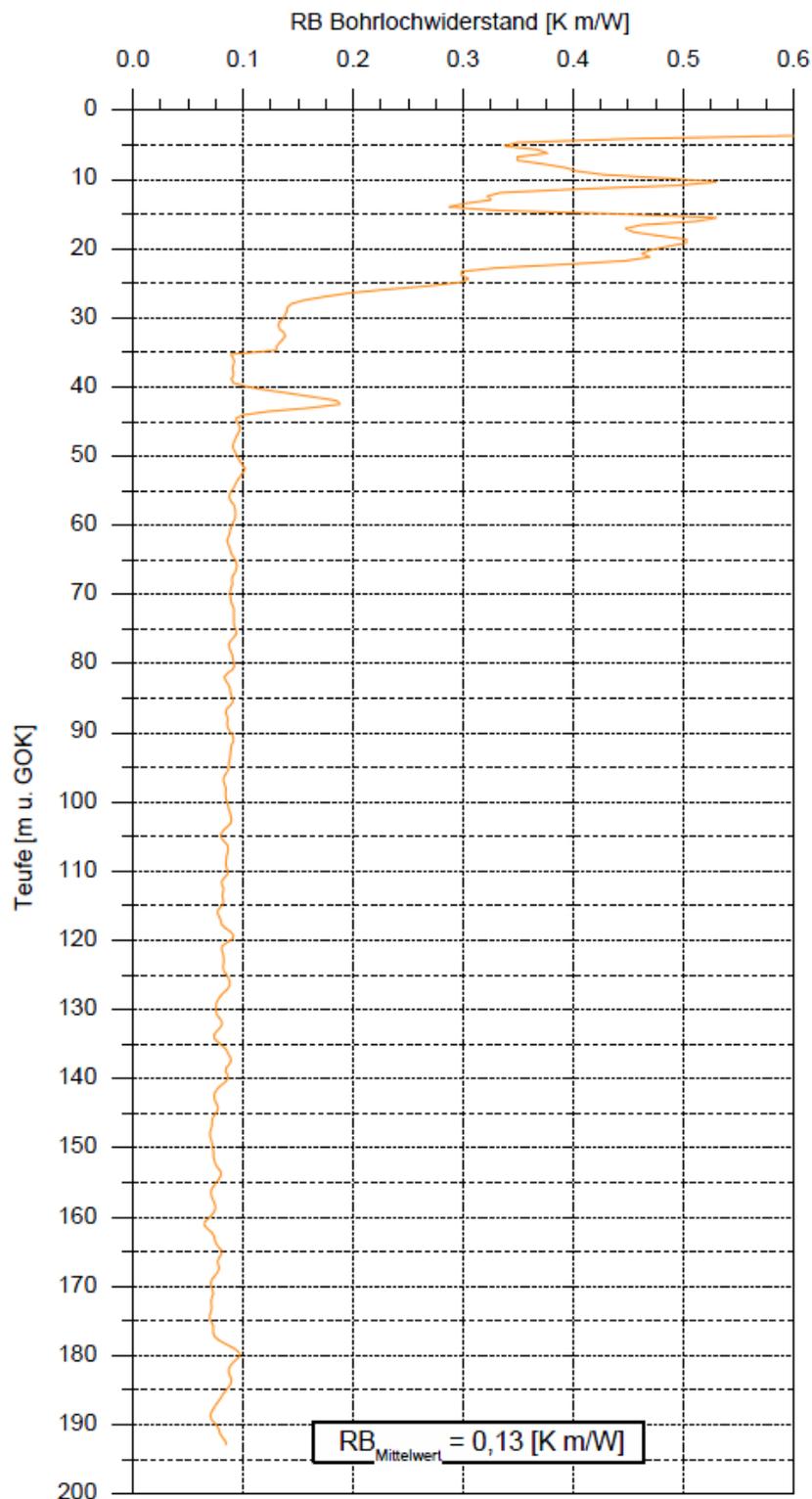


Abb. 11: Bohrlochwiderstand

Beispiel 6: Fehlende Hinterfüllung

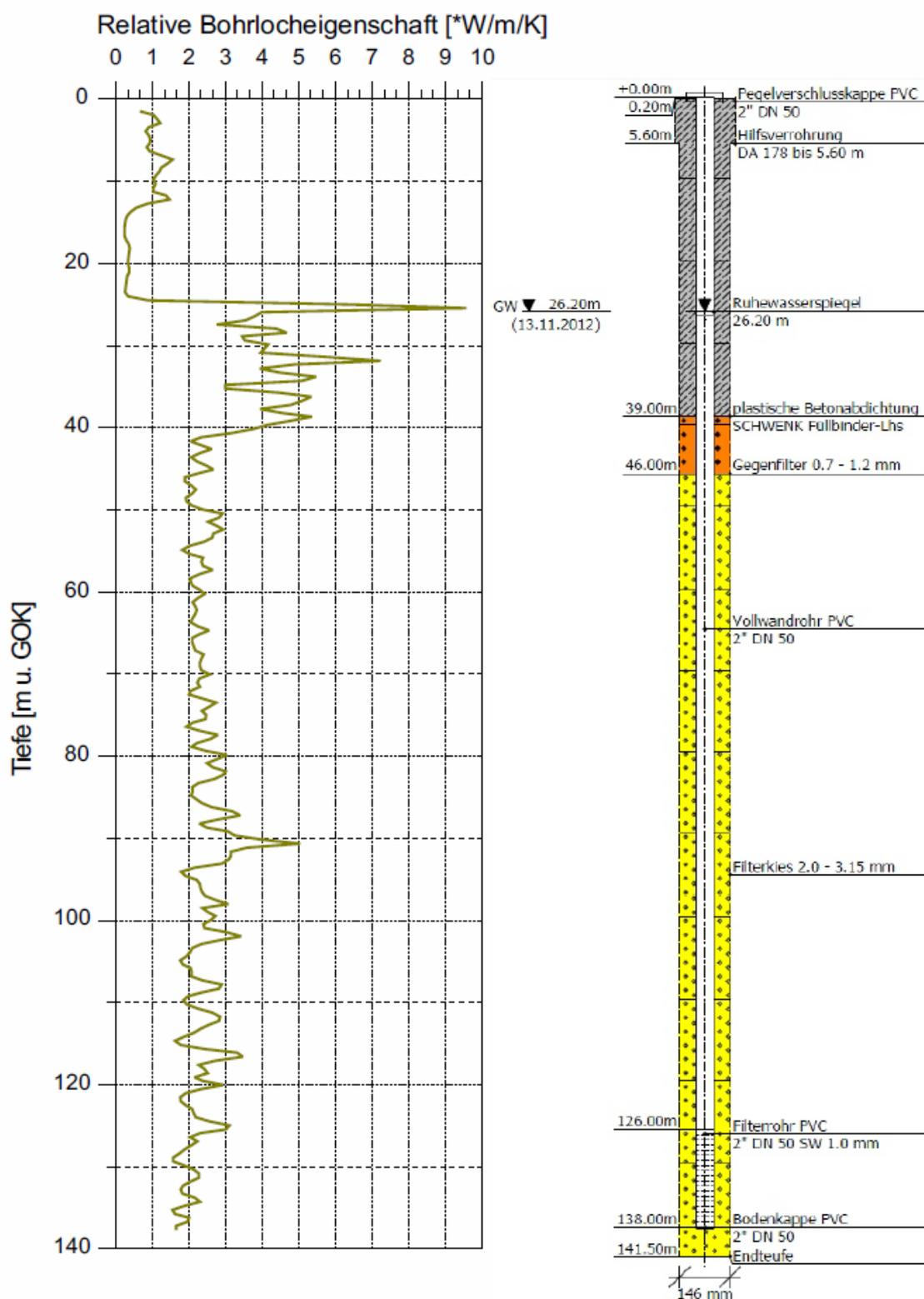


Abb. 12: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes. Deutlich zu erkennen das Verhalten bei fehlender Hinterfüllung: in Luft geringe Wlf und in Wasser sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten.

Beispiel 7: Anomalie oberflächennah und im Bohrlochtiefsten

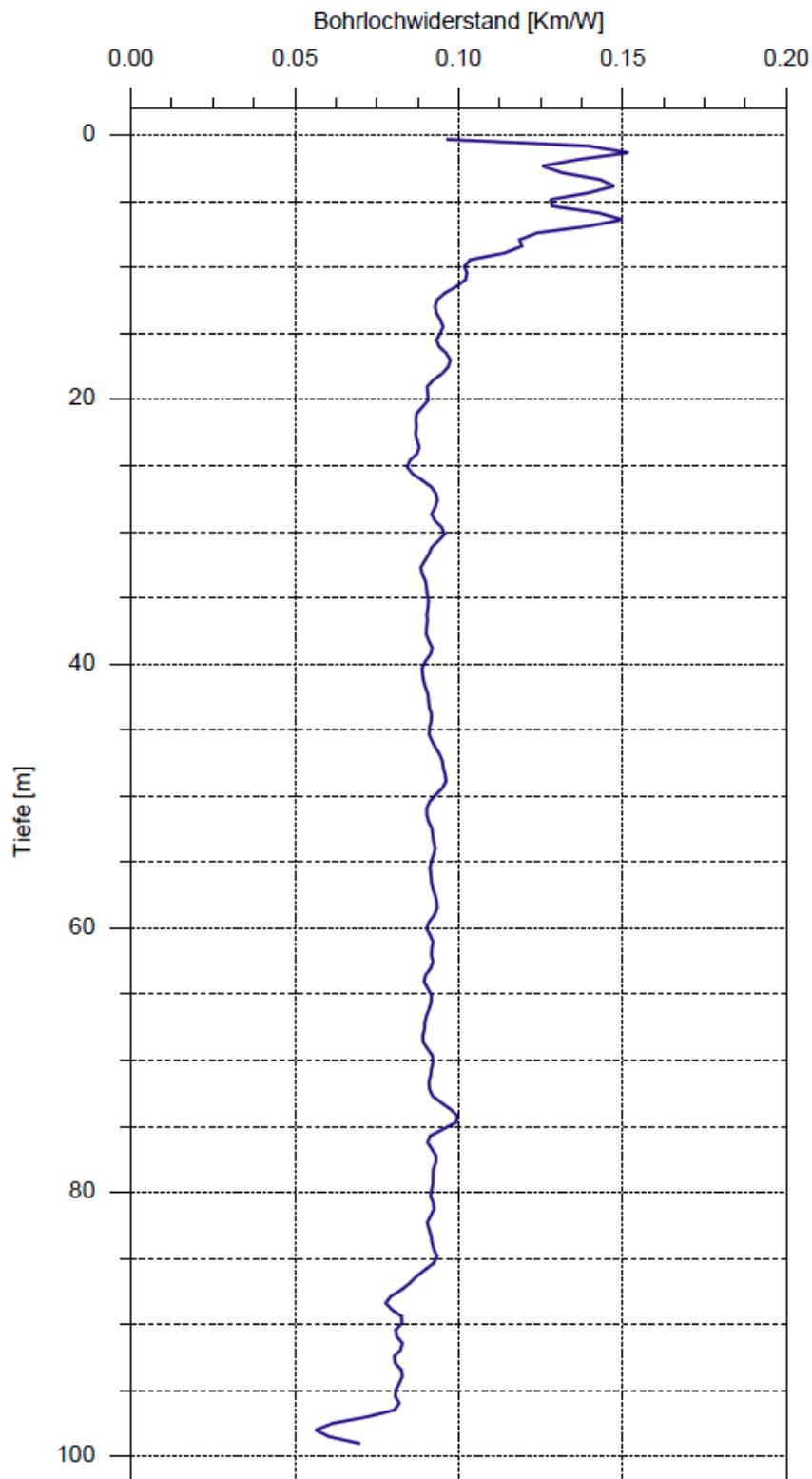


Abb. 13: Bohrlochwiderstand. Die Anomalien deuten auf fehlende bzw. mangelhafte Hinterfüllung im oberflächennahen Bereich und am Bohrlochtiefsten. Hier ist bekannt, dass im Bohrlochtiefsten eine stark Grundwasser führende Schicht erbohrt wurde.

6. Überblick der durchgeführten Messungen

Die Erdwärmesonden, in denen die mobilen Kurz-Enhanced-Geothermal-Response-Tests (Kurz-EGRT-Mobil) durchgeführt wurden, befanden sich auf insgesamt vier unterschiedlichen Bauprojekten in der Schweiz. Die meisten Messungen waren sogenannte mobile Messungen, bei denen ein Hybridkabel temporär in ein Rohr des Erdwärmetauschers eingebracht wird. Hybridkabel sind Messsonden, die zusätzlich zu den optischen Fasern (Temperaturmessungen) Kupferleiter enthalten, die durch Anlegen von Spannung als Heizkabel dienen. Die Hybridkabel wurden jeweils bis zum Sondentieftsten in die Erdwärmesonde oder aber so tief als möglich eingebracht, ohne den Wiederausbau des Kabels zu gefährden.



Abb. 5: Messaufbau (links) und EWS-Sondenrohr mit mobilem Hybridkabel (rechts), Beispielbilder

Bei zwei Messungen hingegen wurde das Hybridkabel fest im Hinterfüllmaterial installiert. Dafür wird beim Einbringen der Sondenrohre durch die Bohrfirma das Kabel aussen an den Sondenrohren befestigt und mit in die Bohrung eingebracht. Das Kabel befindet sich dann im Hinterfüllmaterial, verbleibt dort und kann für spätere Messungen wiederverwendet werden.

Vor der Durchführung der Tests wurde jeweils die Integrität der optischen Fasern und der Widerstand der Kupferleiter überprüft, so dass eine reguläre Durchführung der Messungen 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.

Die vier Messkampagnen dienten teilweise unterschiedlichen Fragestellungen, hier eine Übersicht der durchgeführten Messungen:

- Die erste Messkampagne fand vom 16.11. bis 19.11.2015 statt. Dabei wurden in insgesamt 10 Erdwärmesonden eines Projektes in Zürich Kurz-EGRTs durchgeführt.
- Die zweite Messkampagne fand vom 21.12. bis 22.12.2015 statt. Dabei wurden in einer Erdwärmesonde eines Projektes in Laufen zwei Messungen mit unterschiedlichen Sensoren durchgeführt. Die verwendeten unterschiedlichen Hybridkabel bestanden aus einem fest im Hinterfüllmaterial installiertes Kabel sowie einem mobilen Hybridkabel welches nur temporär in eines der Erdwärmesondenrohre eingebracht wurde.

- Die dritte Messkampagne bestand nur aus einer Messung, die am 11.02.2016 an einer stark von Grundwasser umströmten Erdwärmesonde im Wallis durchgeführt wurde.
- Die sieben Messungen der vierten und letzten Messkampagne fanden von 9.01. bis 3.03.2017 statt. Hinzugefügt wurden auch die Kurzzeitergebnisse eines EGRT vom Dezember 2015 in einer der Erdwärmesonden, so dass insgesamt acht Messungen ausgewertet werden konnten. Auch hier sind die Erdwärmesonden stark vom Grundwasser beeinflusst. Zur Trennung des oberen Grundwasserleiter wurden verschiedene Schutzmassnahmen des Hinterfüllmaterials eingesetzt.

Für alle diese Messkampagnen gibt es detaillierte Berichte, die dem BFE vorliegen. Im vorliegenden Bericht wird nur eine Auswahl der Ergebnisse, die für das Verständnis und für die Schlussfolgerungen nötig sind, gezeigt.

7. Zürich: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter

Vom 16.11. bis 19.11.2015 wurden in insgesamt 10 Erdwärmesonden des Bauprojektes in Zürich Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Zu Beginn der Tests wurde die bestehende Temperatur-Tiefen-Verteilung in den Bohrungen erfasst. Im Anschluss daran wurde die Aufheizung, die der Bestimmung der thermischen Parameter dient, durchgeführt.

Alle untersuchten Erdwärmesonden erreichen eine Tiefe von etwas über 190 m. Die Bodentemperaturen vor Beginn des Heizens der untersuchten Erdwärmesonden B2, B3, B4, B5, B6, B8, B9, B10, B11 und B12 sind in Abhängigkeit der Tiefe in der Abbildung A1 (siehe Anhang) zusammengefasst. 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. Alle 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. Danach, bis in etwa 55 m Tiefe verharren sie bei einer – im Rahmen der Messgenauigkeit - konstanten Temperatur von 11,4 bis 11,7 °C. Anschließend steigen die Temperaturen kontinuierlich bis zum Bohrlochtiefsten an, wo knapp 15 °C erreicht werden. Ab etwa 90 bis 100 m Tiefe zeichnet sich ein konstanter thermischer Gradient von 0,027 K/m ab.

Die Aufheizungen dauerten jeweils mindestens 1,5 Stunden, danach wurde jeweils für mindestens eine halbe Stunde der anschließende Wiederangleich aufgezeichnet. Den Erdwärmesonden wurde jedes Mal eine konstante Heizleistung von 13,38 W/m zugeführt. Um den Aufheizevorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A2 für die erste untersuchte Erdwärmesonde B10 die Temperaturprofile von verschiedenen Phasen des zweistündigen Aufheizevorgangs abgebildet. 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 ausgewertet. Während dieses kurzen Zeitraumes wird die Temperaturentwicklung von einem integralen Verhalten der thermischen Eigenschaften der Erdwärmesondenrohre, 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 der untersuchten Erdwärmesonden sind in Abhängigkeit der Tiefe in Abbildung A3 in einer Graphik abgebildet. Die Bohrlocheigenschaft zeigt für alle untersuchten Erdwärmesonden ab einer Tiefe von 6,5 m u. OKT den gleichen Verlauf. Im Rahmen der Messgenauigkeit wird für jede Bohrung eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt:

- B2: $1,23 \pm 0,10$ W/m/K
- B3: $1,12 \pm 0,10$ W/m/K
- B4: $1,25 \pm 0,12$ W/m/K
- B5: $1,27 \pm 0,12$ W/m/K
- B6: $1,11 \pm 0,10$ W/m/K

- B8: $1,06 \pm 0,11$ W/m/K
- B9: $1,10 \pm 0,09$ W/m/K
- B10: $1,15 \pm 0,13$ W/m/K
- B11: $1,21 \pm 0,12$ W/m/K
- B12: $1,18 \pm 0,17$ W/m/K

Diese Werte stimmen mit einer angegebenen Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials von 2 W/m/K überein, da die geringen Wärmeleitfähigkeiten der Sondenrohre und des Wassers in den Sondenrohren das Ergebnis beeinflussen.

Im oberflächennahen Bereich bis 6,5 m u. OKT sind teilweise geringere Wärmeleitfähigkeiten bestimmt worden (Erdwärmesonden B10 und B12). Dies kann auf mangelhafte Hinterfüllung, bzw. Lufteinschlüsse in diesem Bereich deuten. Etwas weniger ausgeprägt und auch nur bis in eine Tiefe von knapp 4 m u. OKT gilt dies auch für die Erdwärmesonden B05, B06 und B08.

8. Lausen: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter

Vom 21.12. bis 22.12.2015 wurden in einer Erdwärmesonde des Bauprojektes in Laufen zwei Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden Kurz-EGRTs an zwei verschiedenen Einbauweisen des Hybridkabels durchgeführt. Ein fest im Hinterfüllmaterial installiertes Kabel sowie ein mobiles Hybridkabel welches in eines der Erdwärmesondenrohre eingebracht wurde. Die Messungen erfolgten um Rückschlüsse auf die Qualität der Hinterfüllung der Erdwärmesonden ziehen zu können.

Die untersuchte Erdwärmesonde erreicht eine Tiefe von knapp 150 m u. OKT. Zu Beginn der Tests wurde die bestehende Temperatur-Tiefen-Verteilung für beide Messkabel in der Bohrung erfasst. Die beiden Profile sind in Abbildung A4 gezeigt. 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.

Im Anschluss daran wurde jeweils ein kurzer Heat-Pulse-Test von etwas über 1,5 Stunden Heizdauer durchgeführt. Die Aufheizung des fest installierten Hybridkabels erfolgte mit einer konstanten Heizleistung von 32,89 W/m. Bis zum nächsten Morgen konnte die Bohrung anschließend wieder einen ungestörten Ausgangszustand annehmen. Die Erdwärmesonde wurde dann mit dem mobilen Hybridkabel mit einer konstanten Heizleistung von 18 W/m aufgeheizt. Die so bestimmten Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes für beide Tests sind in Abbildung A5 dargestellt. Die Mittelwerte der Ergebnisse betragen:

- fest installiertes Messkabel: $1,35 \pm 0,26$ W/m/K,
- mobiles Messkabel: $1,14 \pm 0,14$ 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.

9. Wallis: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter

Am 11.02.2016 wurden in einer Erdwärmesonde im Kanton Wallis, Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt.

Die untersuchte Erdwärmesonde besitzt eine maximale Teufe von 150 m u. OKT, wovon das Messkabel wurde bis in eine Tiefe von 140 m eingebracht wurde. Zu Beginn der 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 Erdwärmesonde sind in Abhängigkeit der Tiefe in Abbildung A6 (siehe Anhang) dargestellt. Das Temperaturprofil zeigt einen atypischen Verlauf: Nur auf den obersten Metern herrschen, der Jahreszeit entsprechende, kalte Temperaturen. Ab einer Tiefe von 10 m bis 52 m u. OKT wird ein erhöhtes konstantes Temperaturniveau von etwa 12,2 °C gemessen. Auf einer Strecke von ca. 21 m folgt dann ein negativer Temperaturgradient, die Werte fallen bis auf etwa 11 °C in 73 m Tiefe. Ab dort bleiben sie bis zum Ende der Messstrecke in knapp 140 m Tiefe konstant bei diesem Wert.

Die anschliessende Aufheizung dauerte etwas über 1,5 Stunden mit einer konstanten Heizleistung von 17 W/m. Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A7 Temperaturprofile von verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs abgebildet. Der anschließende Wiederangleich ist in Abbildung A8 dokumentiert. Im Aufheizvorgang ist der Bereich von etwa 26 m bis 62 m u. OKT auffällig. Dort findet ab dem T-Profil von 18,5 Minuten nach Beginn der Aufheizung nur noch eine geringe, bzw. zum Teil sogar gar keine weitere Aufheizung statt. In der Graphik des Wiederangleichs ist der gleiche Bereich ebenfalls auffällig, dort erreichen die Temperaturen bereits 27 Minuten nach Abschalten der Heizung fast schon das Niveau des Temperaturprofils das vor dem Test aufgenommen wurde. Solche Auffälligkeiten sind durch stark strömendes Grundwasser erklärbar.

Die aus dem Heat-Pulse bestimmten Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes für sind in Abbildung A9 in einer Montage mit dem bereitgestellten geologischen Schichtenprofil dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die Anomalien sehr deutlich. Sie passen auch gut zum geologischen Schichtenprofil. Es lassen sich dabei insgesamt 3 auffällige Tiefenbereiche unterscheiden:

- Von 0 bis 2,5 m u. OKT: geringe Bohrungseigenschaft von unter 0,5 W/m/K
- Von 26 bis 45 m u. OKT: sehr hohe Werte, im Mittel 6,5 W/m/K
- Von 45,5 bis 62 m u. OKT: erhöhte Werte, im Mittel 1,9 W/m/K

Der mächtigste auffällige Tiefenbereich von 26 bis 45 m u. OKT zeigt sehr hohe Werte der Bohrungseigenschaft wie sie für stark strömendes Grundwasser charakteristisch sind. Auch der unterhalb anschliessende Bereich bis insgesamt 62 m u. OKT zeigt noch erhöhte Werte, wie sie durch strömendes Grundwasser verursacht werden. Diese stark erhöhten Werte sind bei solch kurzen Heizzeiten, wie sie hier angewendet wurden, nur dann möglich, wenn die Sondenrohre entweder genau am Rand der Bohrung liegen und dort dem strömenden Grundwasser ausgesetzt sind oder wenn die Hinterfüllung mangelhaft ist und die Sondenrohre mehr oder weniger direkt umströmt werden können. Der insgesamt sehr mächtige gestörte Bereich von 36 m Länge macht eine mangelhafte Hinterfüllung wahrscheinlicher.

10. Aargau: Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter

Vom 9.01.2017 bis 3.03.2017 wurden in sechs Erdwärmesonden des Bauprojektes sieben Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Die erste Erdwärmesonde wurde schon 2015 als Pilotsonde erstellt. An dieser Erdwärmesonde EWS 10 wurde damals bereits ein EGRT durchgeführt, um das Erdwärmesondenfeld auf den Wärmebedarf auszulegen. Die Ergebnisse der Bohrlocheigenschaft aus dem Jahr 2015 zeigen bereits lokale Anomalien. Die Resultate der erneuten Messung im Rahmen dieser Studie im Januar 2017 konnten somit mit den Ergebnissen aus dem Jahr 2015 verglichen werden.

Mit der Kurzeit-Auswertung des EGRT aus dem Jahr 2015, der in der Pilotbohrung durchgeführt wurde, stehen insgesamt acht Messungen zur Auswertung zur Verfügung.

Die anvisierte Tiefe der Erdwärmesonden beträgt jeweils 200 m u. OKT. In der Erdwärmesonde EWS 10 aus dem Jahr 2015 wurde ein Messkabel bis zum Bohrlochtiefsten fix im Hinterfüllmaterial installiert. Bei den anderen Erdwärmesonden, die mit dem mobilen Messkabel untersucht wurden, wurde dies temporär jeweils bis in eine Tiefe von knapp 170 m in eines der Sondenrohre eingebracht.

Geologie und Grundwassersituation

Die Geologie am Ort der Erdwärmesonde EWS 10 lässt sich grob in zwei unterschiedliche Hauptschichten unterteilen: Bis in 48 m u. OKT sandige, kiesige Lockergesteine (obere Schicht) und darunter Festgestein (untere Schicht). Eventuell befindet sich in der oberen Schicht zwischen 22 und 35 m u. OKT ein Grundwasserstauer eingelagert, denn in der Geologie sind tonige Anteile angegeben.

Schon in der Probebohrung, und aber auch in den weiteren Bohrungen wurden zum Teil sehr starke Wasserzutritte beobachtet. In der Probebohrung EWS10 waren dies mindestens 170 L/min zwischen 100 bis 106 m Tiefe. Eine Abschätzung mittels Airlift-Verfahren ergab bei Bohrung EWS 11 eine Wasserzutrittsmenge von sogar 300 L/min aus dem Tiefenbereich von ca. 84 bis 106 m.

In Abbildung A10 des Anhangs sind die Ergebnisse des EGRTs in EWS 10 aus dem Jahre 2015 gezeigt. Dies sind die Gesteinswärmeleitfähigkeiten in Verbindung mit der Geologie der Bohrung. Die Bereiche: 17 bis 25 m, 35 bis 41 m und 45 bis 100 m u. OKT zeigen erhöhte Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die auf zusätzlichen konvektiven Wärmetransport (Grundwassereinfluss) schliessen lassen.

Der Grundwasserspiegel beginnt bei etwa 10 m. Vermutet werden für die Situation vor Ort bis zu drei, unterschiedlich stark voneinander getrennte GW-Leiter:

- Oberflächennah bis in 25 m u. OKT
- Von etwa 36 bis 40 m u. OKT. Gering mächtig, aber vermutlich lateral hohe Geschwindigkeiten. Möglicherweise vom oberen GWL getrennt
- Von etwa 45 bis mindestens 100 m u. OKT. Mächtige Schicht, beginnend schon etwas oberhalb des Festgesteins. Möglicherweise auch vertikale Fließrichtungen. Wahrscheinlich nicht vom mittleren GWL getrennt.

Im Hinblick auf den Schutz des Lockergesteinsgrundwasservorkommens verlangte das AfU (Amt für Umweltschutz) für die weiteren Erdwärmesonden, dass eine geeignete Hinterfüllungsart zum Einsatz kommt und gegebenenfalls zusätzliche Massnahmen zum Grundwasserschutz getroffen werden, so dass die Verbindung verschiedener, grundwasserführender Schichten (v.a. zwischen Lockergestein und Felsgestein) möglichst vermieden werden. In den weiteren Bohrungen kamen verschiedene Techniken für die Hinterfüllung und deren Schutz zum Einsatz.

Sonde	Messung	Typ	Hinterfüllmaterial	Schutzmassnahme
EWS 10	26.12.2015 und 11.01.2017	Messkabel in Hinterfüllmaterial	FLOW & FILL	-
EWS 11	9.01.2017 und 2.03.2017	Messkabel in Sondenrohr	K ZEOTHERM 2.0	-
EWS 9	6.02.2017	Messkabel in Sondenrohr	K ZEOTHERM 2.0	HDPE-Rohr von 0 - 55 m Tiefe
EWS 8	2.03.2017	Messkabel in Sondenrohr	K ZEOTHERM 2.0	Gewebepacker von ca. 10 - 55 m Tiefe
EWS 7	3.03.2017	Messkabel in Sondenrohr	K ZEOTHERM 2.0	Gewebestrumpf von ca. 10 - 55 m Tiefe
EWS 6	3.03.2017	Messkabel in Sondenrohr	K ZEOTHERM 2.0	Gewebestrumpf von ca. 10 - 55 m Tiefe

Tabelle 1: Charakteristika der untersuchten Erdwärmesonden

Ergebnisse der Messungen

Die Bodentemperaturen vor Beginn des Heizens der untersuchten Erdwärmesonden sind in Abhängigkeit der Tiefe in Abbildungen A11 (siehe Anhang) dargestellt. Im oberen Bereich, bis in etwa 15 m u. OKT, stellen die Temperaturen den normalen, der Jahreszeit entsprechenden Temperatur-Tiefenverlauf dar. Ab einer Tiefe von etwa 110 m u. OKT weisen sie den gleichen Temperaturgradienten auf. Dieser, aus der Messung vom 11.01.2017 an EWS 10 bestimmte Wert beträgt 3,0 K pro 100 m. Dazwischen weisen die Temperaturprofile nur geringe Unterschiede auf.

Die aus den Daten des Heat-Pulses berechneten Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes (Bohrlocheigenschaft) sind in Abbildung A12 gezeigt.

Um die Entwicklung der verwendeten Schutzmethoden des Hinterfüllmaterials besser nachvollziehen zu können, bleibt die chronologische Bearbeitung der Erdwärmesonden bestehen.

1. Untersuchte Erdwärmesonde EWS 10

Diese Erdwärmesonde wurde zweimal gemessen, im Dezember 2015 im Rahmen eines EGRT zur Bestimmung der thermischen Untergrundparameter. Das Hybridkabel der Messung ist fix im Hinterfüllmaterial eingebracht und wurde im Januar 2017 erneut für eine Messung verwendet.

2015 wurde über einen Zeitraum von 84 Stunden dem Boden eine konstante Heizleistung von 25,97 W/m zugeführt. Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A13 die Temperaturprofile von drei verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs abgebildet (1 h, 3 h und 84 h nach Heizbeginn). Im Tiefenbereich von 38 bis 40 m u. OKT liegen die Temperaturen übereinander; das ist ein Indiz für starke Grundwasserströmung.

Am 11.01.2017 wurde für eine Dauer von 1,5 Stunden dem Heizkabel eine konstante Heizleistung von 27,13 W/m zugeführt. Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A14 die Temperaturprofile von drei verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs abgebildet (2 min, 17 min und 85 min nach Heizbeginn).

Die Bohrlocheigenschaften beider Messungen sind in Abbildung A15 dargestellt. Der Mittelwert der Messung vom Dezember 2015 beträgt $1,89 \pm 1,06$ W/m/K, der von der Messung vom Januar 2017: $2,80 \pm 2,46$ W/m/K. Die Erdwärmesonde EWS 10 zeigt schon bei der Messung des EGRT vom Dezember 2015 zwei Anomalien:

- von 17 bis 19 m u. OKT mit Werten bis über 5 W/m/K
- von 22 bis 24 m u. OKT mit Werten bis über 10 W/m/K

Diese Anomalien deuten auf eine unvollständige Hinterfüllung in Teilen der Bohrung schon kurz nach Fertigstellung der Erdwärmesonde hin. Der Rest der Bohrung zeigte unauffällige Ergebnisse. Die Ergebnisse des Kurz-EGRT vom 11. Januar 2017 zeigen an diesen beiden Stellen noch höhere Werte an. Diese deuten auf eine erweiterte Lückenbildung des Hinterfüllmaterials, kann aber auch durch erhöhte Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers erklärt werden. Waren die Fehlstellen 2015 nur lokal ausgeprägt, so weisen in der aktuelleren Messung zusätzlich weite Bereiche bis in etwa 115 m u. OKT der Erdwärmesonde erhöhte Werte auf, die auf eine mögliche generelle Degradation des Hinterfüllmaterials hindeuten. In diesem ausgedehnten Tiefenbereich zeigen auch die Temperaturen in Abbildung A14 zwischen 17 und 85 Minuten nach Heizbeginn nur eine geringe Veränderung.

2. *Untersuchte Erdwärmesonde EWS 11*

Diese Erdwärmesonde wurde ebenfalls zweimal gemessen. Die Bohrlocheigenschaften, die bei den Messungen bestimmt wurden, sind in Abbildung A16 dargestellt. Der Mittelwert der Messung vom Januar 2017 beträgt $1,43 \pm 0,28$ W/m/K, der von der Messung vom März 2017: $1,25 \pm 0,24$ W/m/K. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Erdwärmesonde EWS 10 sind diese unauffällig. Auf Grund der problematischen Untergrundverhältnisse wurde besonders „sorgfältig“ gearbeitet. Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A17 die Temperaturprofile von drei verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs der zweiten Messung vom 2.03. abgebildet (2 min, 15 min und 90 min nach Heizbeginn). Diese zeigen eine gleichmässige, parallele Aufheizung. Grössere Anomalien sind in beiden Abbildungen nicht zu erkennen. Geringe Unterschiede der Bohrlocheigenschaften in Abbildung A16 rühren teilweise daher, dass verschiedene Rohre der EWS gemessen wurden. Die Variation der Ergebnisse lässt sich dann durch eine unterschiedliche Lage der Rohre innerhalb der Bohrung erklären. Auffällig hingegen sind zwei kleinere, wiederholte lokale Anomalien von 17 bis 19 und von 32 bis 34 m u. OKT. Dort können Fehlstellen in der Hinterfüllung nicht ausgeschlossen werden. Jedoch weist der Bereich zwischen diesen beiden Bereichen normale Werte auf, so dass von einer dichten, funktionierenden Hinterfüllung zwischen den beiden Schichten auszugehen ist.

Restliche untersuchten Erdwärmesonden EWS 9, EWS 8, EWS 7 und EWS 6

Diese Erdwärmesonden wurden alle bis zum Beginn des Festgesteins mit z.T. unterschiedlichen Schutzmassnahmen versehen, siehe Tabelle 1. Jede Erdwärmesonde wurde einmal gemessen, die Heizleistungen betragen zwischen 16,5 und 18 W/m. Die Bohrlocheigenschaften dieser 4 Messungen sind gesammelt in Abbildung A18 gezeigt. Die Mittelwerte der Bohrlocheigenschaft betragen:

- EWS 9: $1,26 \pm 0,27$ W/m/K
- EWS 8: $1,02 \pm 0,15$ W/m/K
- EWS 7: $1,05 \pm 0,23$ W/m/K
- EWS 6: $1,06 \pm 0,19$ W/m/K

In allen vier Messungen zeigen die Ergebnisse über die geschützte Strecke absolut kompakte homogene Werte. Auch unterhalb der geschützten Bereiche bis zum Festgestein sind keine grösseren Anomalien erkennbar. Die einzelnen Schutzmassnahmen lassen sich dann wie folgt bewerten:

EWS 9: HDPE-Rohr

Das HDPE-Rohr führt zu einem sehr guten Schutz des Hinterfüllmaterials innerhalb des Rohres. Die Verfüllung des Bereiches ausserhalb, also zwischen Rohr und angrenzendem Gestein erfolgte von oben mit verdünntem Hinterfüllmaterial. Es ist denkbar, dass dieser Bereich durch das Grundwasser ausgewaschen werden kann. Ein schmaler wassergefüllter Bereich zwischen HDPE-Rohr und Gestein wäre bei starker Grundwasserströmung in den Bohrlochwiderständen durch positive Anomalien erkennbar. Ausgeprägte Strömung in vertikaler Richtung würde zusätzlich zu einer Störung der Ausgangstemperaturen führen. Beides ist nicht erkennbar. Die Untersuchung der Erdwärmesonde EWS 9 ergibt im Bereich bis zum Beginn des Festgesteins daher keine Hinweise auf Mängel in der Hinterfüllung. Eine kleine Anomalie in 84 m Tiefe ist weder relevant für die Trennung der Grundwasserleiter und auch nicht signifikant für den Betrieb der Anlage.

EWS 8: Gewebepacker

Die Bohrlocheigenschaft ist über die ganze Tiefe der Erdwärmesonde im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Diese Erdwärmesonde wurde bis etwa 55 m Tiefe mit einem Gewebepacker versehen. Es sind bei der Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes keine Fehlstellen in der Hinterfüllung erkennbar. Da keine Hinweise auf Fehlstellen vorliegen, ist von der erfolgreichen Funktion des Gewebepackers als Schutz des Hinterfüllmaterials auszugehen. Das Einbringen des Gewebepackers über eine solch grosse Länge wurde aber als mühsam beschrieben.

EWS 7 und EWS 6: Gewebestrumpf

Die Bohrlocheigenschaften von EWS 7 und EWS 6 sind bis in 47 m Tiefe der Erdwärmesonde im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Von 47 bis etwa 110, bzw. 80 m u. OKT sind tendenziell leicht höhere Werte erkennbar, die aber noch nicht als

Anomalie¹ gelten. Unterhalb davon bis zum Ende der Messstecke treten wieder, wie im oberen Teil, konstante Werte auf. Beide Erdwärmesonden wurden bis etwa 55 m Tiefe mit einem Gewebestrumpf versehen. Es sind bei der Betrachtung der Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes keine Fehlstellen in der Hinterfüllung erkennbar. Ein Gewebestrumpf ist verformbar und kann sich durch das Einbringen des Hinterfüllmaterials an den Bohrlochrand anschmiegen. Das Hinterfüllmaterial wird durch den Strumpf zu einem grossen Teil vor Grundwassereinfluss geschützt und die Hinterfüllung kann abbinden und festwerden. Die Messergebnisse deuten auf eine gleichmässige kompakte und dichte Hinterfüllung, die keinen Einfluss von Grundwasserbewegung zeigt. Dies wiederum deutet auf eine gute Anpassung des flexiblen Gewebestrumpfes an den Bohrlochrand.

¹ Als Anomalie gelten Werte ab 3 W/m/K, der Übergang ist aber fließend.

11. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zürich

Generell sind alle untersuchten Erdwärmesonden (B2, B3, B4, B5, B6, B8, B9, B10, B11 und B12) ab einer Tiefe von 6,5 m u. OKT unauffällig und zeigen keine Anomalien die auf Fehlstellen oder mangelhafte Hinterfüllung hinweisen. Oberflächennah sind teilweise geringere Wärmeleitfähigkeiten bestimmt worden, die aber nicht signifikant für den Betrieb der Anlage sind. Die Ergebnisse zeigen, dass bei unproblematischen Gegebenheiten eine gleichbleibende Qualität der Hinterfüllung erzielt werden kann.

Lausen

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. Beide Messarten, Messkabel fix im Hinterfüllmaterial sowie temporär in einem der Sondenrohre, erzielen vergleichbare Ergebnisse.

Wallis

Sowohl bei einer Betrachtung der Entwicklung der Absoluttemperaturen als auch über die daraus bestimmten Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes finden sich zwei deutlich auffällige Bereiche:

- Von 26 bis 45 m u. OKT: sehr hohe Werte, im Mittel 6,5 W/m/K
- Von 45,5 bis 62 m u. OKT: erhöhte Werte, im Mittel 1,9 W/m/K

mit erhöhten Werten, wie sie von stark strömendem Grundwasser verursacht werden und die auf eine mangelhafte Hinterfüllung im gesamten betroffenen Bereich von 26 bis 62 m u. OKT deuten.

Aargau

Erdwärmesonde EWS 10 wurde ohne zusätzliche Schutzmassnahmen des Hinterfüllmaterials niedergebracht und weist schon in der Messung des EGRT von 2015, kurz nach Fertigstellung der Erdwärmesonde durchgeführt, schon lokale Anomalien auf. In der Wiederholungsmessung vom Januar 2017 waren diese stärker ausgeprägt und zusätzlich zeigen weitere, ausgedehnte Bereiche der Erdwärmesonde erhöhte Werte, so dass das Hinterfüllmaterial dieser Erdwärmesonde möglicherweise eine generelle Degradation erfahren hat. Die Ergebnisse der Erdwärmesonde EWS 11, die ebenfalls ohne zusätzliche Schutzmassnahmen niedergebracht wurde, zeigen keine grösseren Anomalien. Auffällig sind zwei kleinere, lokale Anomalien von 17 bis 19 und von 32 bis 34 m u. OKT, an denen Fehlstellen in der Hinterfüllung nicht ausgeschlossen werden können. Jedoch weist der Bereich zwischen diesen beiden Bereichen normale Werte auf, so dass von einer dichten, funktionierenden Hinterfüllung zwischen den vermuteten Grundwasserleitern (oberer und mittlerer GW) auszugehen ist. Die restlichen untersuchten Erdwärmesonden EWS 9, EWS 8, EWS 7 und EWS 6 wurden mit verschiedenen Schutzmassnahmen (HDPE-Rohr,

Gewebepacker und Gewebestrumpf) versehen und zeigen alle über die geschützte Strecke absolut kompakte homogene Werte. Auch unterhalb der geschützten Bereiche bis zum Festgestein sind keine grösseren Anomalien erkennbar.

In Erdwärmesonde EWS 9 wurde ein HDPE-Rohr verbaut, das auch zwischen Rohr und angrenzendem Gestein von oben mit verdünntem Hinterfüllmaterial verfüllt wurde. Es ist denkbar, dass dieser Bereich durch das Grundwasser ausgewaschen werden kann. Die Absoluttemperaturen und die Ergebnisse des Kurz-EGRT geben aber in diesem Bereich bis zum Beginn des Festgesteins keine Hinweise auf Mängel in der Hinterfüllung. Auch die Messung an Erdwärmesonde EWS 8, die mit einem Gewebepacker versehen wurde, zeigt keine Hinweise auf Mängel. Der Einbau des Gewebepackers über diese grosse Länge wurde aber als mühsam beschrieben. Da auch die Messungen an den beiden Erdwärmesonden, dessen Hinterfüllmaterial bis zum Beginn des Festgesteins mit einem Gewebestrumpf geschützt wurden (EWS 7 und EWS 6), keine Hinweise auf Fehlstellen geben, hat sich der Gewebestrumpf im Verhältnis Aufwand zu Nutzen als vorteilhaft erwiesen.

Um auch die zeitliche Haltbarkeit des Hinterfüllmaterials beurteilen zu können, wäre es aufschlussreich die Messungen in einem Jahr zu wiederholen.

12. Interpretation

Im Laufe des Projektes wurde die Hinterfüllung von Erdwärmesonden untersucht. Die Voraussetzungen waren zum Teil sehr unterschiedlich. Es gab Hinterfüllungen ohne Anomalien und welche mit Fehlstellen sowie mit zeitlicher Verschlechterung. Des Weiteren wurden bei problematischen Untergrundverhältnissen unterschiedliche Schutzmassnahmen der Hinterfüllung eingesetzt und untersucht. Die 18 Abbildungen im Anhang zeigen repräsentativ die Ergebnisse für das gesamte untersuchte Spektrum:

- Abb. A1: Zürich: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
„Relativ ungestörte Temperatur-Tiefen Profile“
- Abb. A2: Zürich, B10: Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT
„Normales Aufheizverhalten ohne Störungen und Anomalien“
- Abb. A3: Zürich: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
„Erfolgreiche, gleichmässige Hinterfüllung eines grösseren EWS-Feldes“
- Abb. A4: Lausen: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
„Relativ ungestörte Temperatur-Tiefen Profile“
- Abb. A5: Lausen: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
„Vergleich von Messkabel im Hinterfüllmaterial und im Sondenrohr“
- Abb. A6: Wallis: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
„Atypischer Verlauf“
- Abb. A7: Wallis: Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT
„Aufheizverhalten bei Anomalien“
- Abb. A8: Wallis: Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Wiederangleich
„Wiederangleich bei Anomalien“
- Abb. A9: Wallis: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profil in Verbindung mit Geologie
„Mit starken Anomalien im Bereich des GWL“
- Abb. A10: Aargau: EWS 10 – Effektive Wärmeleitfähigkeiten des EGRT von Dezember 2015 in Verbindung mit dem geologischen Profil
„Gesteinswärmeleitfähigkeiten durch Konvektion (Grundwasser) beeinflusst“
- Abb. A11: Aargau: Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens
„Temperaturen zum Teil noch thermisch durch Spülflüssigkeit beeinflusst“
- Abb. A12: Aargau: Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
„Ergebnisse mit und ohne Anomalien“
- Abb. A13: Aargau: EWS 10 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des EGRT
„Langzeit-Aufheizverhalten bei Anomalien“
- Abb. A14: Aargau: EWS 10 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT
„Aufheizverhalten bei Anomalien“
- Abb. A15: Aargau: EWS 10 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
„Verschlechterung der Situation mit der Zeit (~ 1 Jahr)“

Abb. A16: Aargau: EWS 11 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile

„Höhere Qualität der Hinterfüllung bei sorgsamem Arbeiten“

Abb. A17: Aargau: EWS 11 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT

„Verbessertes Aufheizverhalten“

Abb. A18: Aargau: EWS 9, EWS 8, EWS 7, EWS 6 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile

„Ergebnisse bei Schutzmassnahmen für die Hinterfüllung“

Die Ergebnisse zeigen, dass neben bekannten möglichen Problemen (Siehe Kapitel 5 des Berichts, Beispiele von Messungen mit Fehlstellen), bei unkomplizierten Untergrundverhältnissen Hinterfüllungen von gleichbleibender Qualität ohne erweiterten Aufwand niedergebracht werden können.

Bei problematischen Untergrundverhältnissen, in den untersuchten Erdwärmesonden war das starke Grundwasserfluss, hingegen sind in mehreren Erdwärmesonden verschieden stark ausgeprägte Anomalien gemessen worden. Auch hat eine Erdwärmesonde starke Anomalien aufgewiesen (Hinterfüllmaterial FLOW & FILL), während eine benachbarte Erdwärmesonde mit einem anderen Hinterfüllmaterial (K ZEOTHERM 2.0) fast keine Anomalien aufwies. Ob das am Material, an der Anmischung (Siehe Kapitel 13 des Berichts) oder an einer erhöhten Sorgfalt beim Hinterfüllvorgang gelegen hat, lässt sich nicht beurteilen. Ebenfalls auffällig war bei einer Erdwärmesonde die Beobachtung einer signifikanten Verschlechterung der Hinterfüllung über den Zeitraum von einem Jahr. Um auch weitere Aussagen über die zeitliche Haltbarkeit von Hinterfüllmaterial zu ermöglichen, wären weitere Messungen zu späteren Zeitpunkten wünschenswert.

In vier der untersuchten Erdwärmesonden mit starkem Grundwassereinfluss wurden drei verschiedene Massnahmen zum Schutz der Hinterfüllung im kritischen Tiefenbereich eingesetzt: HDPE-Rohr, Gewebepacker und Gewebestrumpf. Von diesen drei Verfahren zeigte der Gewebestrumpf das beste Verhältnis von Aufwand zu Nutzen.

13. UpDate der Situation in Deutschland

Einleitung

Erdwärmesonden sind bei richtiger Verwendung ein für einen langen Zeitraum² zuverlässiger und günstiger³ Beitrag zur Wärme- und Kältenutzung. Der Einsatz oberflächennaher Geothermie ist zusätzlich sehr umweltschonend, da keine Schadstoffe erzeugt oder freigesetzt werden und die generierte Energie hilft, kritische Primärenergieträger wie Erdöl, Kohle oder Atomstrom einzusparen. Voraussetzung für diese positiven Eigenschaften ist zum einen die richtige Dimensionierung der Anlage, und aber bei kritischen Untergrundverhältnissen auch der richtige Einbau – insbesondere die Hinterfüllung – der Sondenrohre in das Erdreich. Kritische Verhältnisse sind:

- mehrere Grundwasserleiter
- Arteser
- Hohlräume im Karst
- Sulfatgestein (Gips-/Anhydritspiegel))

Eine genaue Erläuterung und mögliche Schäden sind sehr anschaulich im „Fachbericht zu den bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern“ (*Staatliche Geologische Dienste, 2011*) geschildert. Zahlreiche Untersuchungen belegen eine deutlich schlechtere Systemdurchlässigkeit der gesamten betrachteten Erdwärmesonde als die reinen Hinterfüllstoffe um Faktor 10 bis >1.000 (*Niederbrucker & Steinbacher 2008, Albrecht & Frank 2010, Anbergen et al. 2011, Reuß & Kuckelkorn 2011, Kuckelkorn & Reuß 2013, Reuß 2014*), insbesondere bei Frostbeanspruchung. Der Frosteinfluss wurde bei allen Untersuchungen mit Ausnahme von Niederbrucker & Steinbacher betrachtet. Dies führt zu folgenden elementaren Fragen:

- Wie kann die Hinterfüllung erfolgreich und dicht⁴ niedergebracht werden?
- Wie kann das sichergestellt und überprüft werden?

In-Situ Überprüfung der Hinterfüllqualität

Laut Sachstandsbericht zu den Schadensfällen in Böblingen (*LGRB, 2015*) haben sich Temperaturmessungen zur Bewertung von Qualität und thermischen Eigenschaften der Ringraumhinterfüllung, des Untergrundes und der Auslegung von Erdwärmesonden bewährt (*Rohner 2009, Baumann et al. 2008, Sauer und Grundmann 2009, Walter-Hertkorn et al. 2009*). Sie werden daher i.d.R. für die nachträgliche Überprüfung der Qualität von Erdwärmesonden eingesetzt. In Böblingen kam es aufgrund mangelhafter Hinterfüllung zu Quellungen in der Gipskeuper-Schicht, die zu Hebungen des Geländes und Rissbildungen in den Häusern führte.

² Mehrere Jahrzehnte, aber auch länger ist möglich, denn man geht davon aus, dass Mikroorganismen 450 Jahre benötigen um eine Wasserflasche (PVC) zu zersetzen.

³ Gilt nach Amortisation der hohen Investitionskosten. Wird eine Betrachtung der Finanzen über einen längeren Zeitraum (z.B. 20 Jahre) durchgeführt, ist die Aussage uneingeschränkt gültig.

⁴ $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. (*Staatliche Geologische Dienste, 2015*)

Akademische Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen konnten in dem Forschungsvorhaben EWS-plus, das von 2007 bis 2011 gefördert wurde, gewonnen werden. In diesen Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden wurden im Realmasstab Erdwärmesonden niedergebracht, die nach Fertigstellung und Durchführung aller Messungen wieder vollständig ausgebaut wurden. So konnte die genaue Lage der Sondenrohre, das Hinterfüllmaterial und auch die künstlich eingebrachten Fehlstellen genau untersucht werden. Die künstlich erzeugten Fehlstellen bestanden aus verschiedenen eingebrachten Dingen wie Tischtennisbällen, Schläuchen, Luftpolstertaschen bis hin zu abgepackten Bereichen die unverfüllt blieben. Der Einfluss von Grundwasserführung in den Fehlstellen war im EWS-plus Projekt aber nicht die Hauptfragestellung und wurde nur am Schluss in wenigen Beispielen untersucht. Untersuchte Verfahren waren Gamma-Gamma Messverfahren, EGRT und Kurz-EGRT, Ultraschallmessung, Gamma-Log und der Nimo-T. Generell war für alle Verfahren eine Abhängigkeit von der Aussagequalität mit der Grösse der Fehlstelle gegeben. Im Folgenden werden relevante Auszüge zu den untersuchten Messverfahren aus dem Abschlussbericht (*Riegger et al. 2013*) gelistet:

Gamma-Gamma Verfahren

„Zu beachten ist daher bei diesem Messverfahren das Handling mit einer gammaktiven Messsonde und das nicht vollständig auszuschliessende Verlustrisiko einer aktiven Gamma-Strahlenquelle in einer EWS.“, „... mit Ausnahme der sehr oberflächennah befindlichen Fehlstelle in ca. 1 m Tiefe, alle Fehlstellen mit einer Grösse von mehr als 10 cm detektiert werden konnten.“, „...wurde allerdings auch eine Fehlstelle vermutet, die dort nicht vorlag.“. „In EWS 3-3 hingegen, bei der das Verfüllmaterial im Hinblick auf den Einsatz des Gamma-Logs mit gammaaktivem Zirkonsand dotiert wurde, konnten Fehlstellen mit einer Grösse von 1 m und mehr nicht mehr detektiert werden. Daher ist zu vermuten, dass die Gamma-Gamma-Messung durch das mit dotierte Verfüllmaterial gestört wird.“

Kurz-EGRT

„Der Kurz-Thermal-Response-Test eignet sich damit prinzipiell zur Detektion von grösseren Fehlstellen mit Grundwasserfluss“. In einer weiteren Veröffentlichung zu diesem Projekt (*Riegger et al., 2012*) wurde dokumentiert, dass der Kurz-EGRT für eine Detektion von Fehlstellen in Erdwärmesonden geeignet ist, wenn die effektive Wärmeleitfähigkeit der Fehlstelle (inkl. ggf. vorhandener Konvektion) von der Wärmeleitfähigkeit der korrekten Verfüllung abweicht.

Ultraschallmessung

„..., dass das Ultraschallmessverfahren prinzipiell zur Fehlstellendetektion geeignet ist. Da die bisher verwendeten Ultraschallprüfköpfe allerdings lediglich einen Winkelbereich von maximal 90° erfassen können und da bisher zudem keine Richtungszuweisung der Signale möglich ist, kam es bei den untersuchten EWS häufig zu Fehlinterpretationen.“

Gamma-Log

„Es wird deutlich, dass bei einem Verfüllmaterial, das keine erhöhte Gammaaktivität aufweist, selbst Fehlstellen wie der 1 m grosse, vollständig unverfüllte, wassergefüllte Bereich in einer Tiefe von ca. 28 – 29 m unter Oberkante Verfüllmaterial nicht nachweisbar sind.“ Und: „Es bleibt festzuhalten, dass die Messung der natürlichen Gammastrahlung den Einsatz von gammaaktiven Verfüllmaterialien sowie eine zusätzliche Nullmessung erfordert. Damit kann die Verfüllqualität von Bestands-EWS mit diesem Verfahren in der Regel nicht bestimmt werden.“

Nimo-T

„Der Einsatz dieses Messverfahrens zur Erfassung der durch die Abbindewärme erhöhten Temperaturen in einer EWS und der darauf basierenden Analyse der Verfüllqualität kann auf Grund der Nachteile der praktischen Handhabung und einer nicht gegebenen Eignung verschiedener Verfüllmaterialien für dieses Messprinzip nicht empfohlen werden.“

Die Zusammenfassung des EWS-plus Abschlussberichtes gibt keine abschliessende Bewertung, sondern verweist auf die einzelnen Abschnitte der untersuchten Messverfahren. Die wiedergegebenen Zitate stammen alle aus diesen Abschnitten.

Temperaturmessungen

Laut Sachstandsbericht des Landesamtes Baden-Württemberg für Geologie, Rohstoffe und Bergbau in Freiburg zu den Schadensfällen in Böblingen (*LGRB, 2015*) haben sich Temperaturmessungen zur Bewertung von Qualität und thermischen Eigenschaften der Ringraumhinterfüllung, des Untergrundes und der Auslegung von Erdwärmesonden bewährt (*Rohner 2009, Baumann et al. 2008, Sauer und Grundmann 2009, Walter-Hertkorn et al. 2009*). Sie werden daher i.d.R. für die nachträgliche Überprüfung der Qualität von Erdwärmesonden eingesetzt. In Böblingen kam es aufgrund mangelhafter Hinterfüllung zu Quellen in Teilen der Gipskeuper-Schicht, den sulfatführenden Abschnitten (Anhydrit), die zu Hebungen des Geländes und Rissbildungen in den Häusern führte. Die Temperaturmessungen dort hatten folgende Zielsetzungen:

- Messung der vertikalen Temperaturverteilung
- Nachweis von Temperaturanomalien, die auf mögliche Undichtigkeiten in Ringraumverfüllungen hinweisen
- Nachweis positiver Temperaturanomalien als Folge exothermer Umwandlung von Anhydrit in Gips
- Nachweis von Hydratationswärme zur Lokalisierung von nachträglich eingebrachtem Injektionszement im Zuge von Sanierungsarbeiten

Im Rahmen der Sanierungsarbeiten kam 2014 erstmals die Technik des mobilen Messkabels zum Einsatz (Kurz-EGRTs und Temperaturmonitoring der Sanierung). Des Weiteren wurden Gamma-Gamma Messungen durchgeführt, aber „Die dem LGRB bislang vorliegenden Erfahrungen mit gamma-gamma-Dichte-Anomalie-messungen zeigen, dass die damit erzielbaren Profilmessungen zu teils sehr widersprüchlichen Ergebnissen geführt haben.“ ...

„Aus diesem Grund werden vom LGRB im vorliegenden Sachstandsbericht keine Interpretationen vorliegender gamma-gamma-Dichte-Anomaliemessungen vorgenommen“. Auch auf die Abhängigkeit der Kurz-EGRTs auf die Grösse der Anomalie wird hingewiesen: „...relativ geringe Wasserfliessbewegungen (die jedoch für die Auslösung von weiträumigen Hebungen ausreichen) können mit diesem Verfahren nicht detektiert werden, da die Temperaturabfuhr durch das fliessende Wasser zu gering ist, um im Messzeitraum signifikant erkennbar zu sein (wohingegen der Kurz-EGRT für die Erkennung von grossen Wasserfliessmengen im Ringraumbereich wie etwa beim Schadensfall Schorndorf gut geeignet ist)“.

Einbringen des Hinterfüllmaterials

Die Versuche des EWS-plus Projektes erbrachten zahlreiche neue Fragen, die im Rahmen des ursprünglichen Projektes nicht geklärt werden konnten. Aufgrund der Relevanz von Fehlstellen für die vollständige hydraulische Abdichtung von Erdwärmesonden, wurde ein Folgeprojekt initiiert: EWS-tech, das von 2013 bis 2016 gefördert wurde. In diesem Projekt wurden das Verständnis der Fehlstellenentstehung und das Entwickeln von Lösungsansätzen zu deren Vermeidung untersucht. Die Arbeiten und Ergebnisse des dreistufigen Vorgehens aus Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen stehen im Abschlussbericht (*Riegger et al. 2016*), die hier komprimiert wiedergegeben werden:

Mängel in der Hinterfüllung zeigten sich durch Fehlstellen, Aufstiegskanälen, Entmischungen, Rissstrukturen und Sackungen. Die Ergebnisse von EWS-tech belegen als Gründe für Mängel die Verfüllbaustoffe selber, die Anmischtechnik, die massgeblich die resultierenden Suspensionseigenschaften bestimmt, sowie weitere Ursachen. Die Quintessenz des Forschungsprojektes liegt in der Erkenntnis der sehr grossen Bedeutung des Anmischvorganges des Hinterfüllmaterials für die Qualität des Ergebnisses.

Verfüllbaustoffe

Bei den Materialien für die Hinterfüllung gibt es grosse, produktabhängige Qualitätsunterschiede. So hatte dies bei drei, mit schlechteren Gesamtnoten bewerteten, Verfüllbaustoffe zur Folge, dass der Vertrieb dieser Produkte durch die Hersteller eingestellt oder eingeschränkt wurde.

Anmischtechnik

Bei der Anmischtechnik haben Kolloidalmischer generell geringere Absetzmasse und damit bessere Ergebnisse als Durchlaufmischer erzielt, doch gab es einzelne Ausnahmen. Die Autoren des Abschlussberichts legen grossen Wert auf die Feststellung dass die Art der Anmischung (Kolloidal- oder Durchlaufmischer, Wasser-Feststoff-Verhältnis, Dosierung und die Ergiebigkeit) mit entscheidend für die Qualität eines Verfüllbaustoffes ist und dies aber bei keinem der Produkte genau angegeben wird! Gute Verfüllqualitäten sind erreichbar, wenn der Verfüllbaustoff und die verwendete Anmischtechnik zusammenpassen. In der Regel wird W/F-Wert (Wasser/Feststoff-Verhältnis) und Ergiebigkeit angegeben, nicht jedoch Art der Anmischung (Kolloidal/Durchlauf, Mischzeit bei Kolloidal). Es wird daher dringend empfohlen, solche Angaben mit zusätzlichen Informationen zur Qualitätskontrolle (Dichte, Marsh-Zeit, Fliessgrenze, Suspensionstemperatur, Absetzmass nach 1 und 24 h) auf den

Produkten verpflichtend anzubringen. Dieses Vorgehen könnte sich an das im Betonbau etablierte Qualitätssicherungssystem (DIN Fachbericht 100) anlehnen.

Weitere Ursachen

Eine der weiteren Ursachen ist der Chemismus des Grundwassers. Die untersuchten Verfüllbaustoffe zeigen strukturelle und chemische Veränderung bei hohen Sulfatgehalten in Verbindung mit hohen Alkali- und Erdalkalikonzentrationen. Auch wurde für alle Materialien eine Beeinflussung in Verbindung mit sauren Wässern nachgewiesen. Das Ausmass der Beeinträchtigung ist unterschiedlich. Eine weitere Erkenntnis ist die Tatsache, dass Fehlstellen häufig durch die komplexe Bohrlochgeometrie mit den zahlreichen, verdrillten Sondenrohren bedingt sind. Hier kann vermutet werden, dass Erdwärmesonden in Koaxial-Form bessere Eigenschaften als die üblicherweise verwendeten Doppel-U-Sonden besitzen. Für Koaxialsonden mit grossem Durchmesser spricht auch, dass diese mindestens gleich gute Wärmeentzugsleistungen wie Doppel-U-Sonden aufweisen. „Kleine“ Koax-EWS (z.B. 63 mm) hingegen haben schlechtere Entzugsleistungen als Doppel-U-Sonden.

Aktueller Stand der Dinge

In EWS-tech wurden nur Erdwärmesonden ohne Grundwasserströmung untersucht, EWS mit GW Einfluss sind Gegenstand und Schwerpunkt des aktuell, seit April 2016 laufenden Projektes EWS-tech II. Veröffentlichungen hierzu sind noch nicht erschienen. Erste Ergebnisse, die auf einem Workshop am 17.11.2016 in Stuttgart präsentiert wurden, zeigen, dass abhängig vom Druckgefälle und den Volumenströmen in einem kritischen GW-Stockwerksbau eine minimale Dichte des Verfüllmaterials und ein ausreichender Verfüllvolumenstrom Grundvoraussetzungen sind, um die Leiter erfolgreich abzudichten.

Literatur

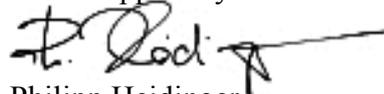
Im Folgenden werden zum Thema relevante und aktuelle Veröffentlichungen aufgelistet (nach Erscheinungsjahr sortiert). Die meisten sind frei zugänglich und können nach kurzer Recherche im Internet heruntergeladen werden:

- 2005: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden.
Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg.
- 2009: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen.
Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg.
- 2011: Qualitätsuntersuchung von Erdwärmesonden im Realmaßstab.
Riegger, M., Tagungsband des 11. Internationales Anwenderforum oberflächennahe Geothermie 2011, Verlag: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, ISBN / Nr.: 978-3-941785-62-5
- 2011: Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern.
Staatliche Geologische Dienste, Wiesbaden 2011. 58 Seiten
- 2012: Auswerteverfahren zur Kontrolle der Verfüllqualität in Erdwärmesonden mit faseroptischen Temperaturmessungen.
Riegger, M., Heidinger, P., Lorinser, B., Stober, I., Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, doi:10.1007/s00767-012-0192-2

- 2013: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben EWSplus - Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden.
Riegger, M., Hochmuth, S., und Werner, M., Steinbeis Forschungsinstitut, Stuttgart, 140 Seiten
- 2014: EWS-tech: Projektübersicht und erste Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden.
Rolker, J. und Riegger, M., Der Geothermiekongress DGK 2014, Essen, 11.-13- November 2014. 7 Seiten.
- 2015: Empfehlungen für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde.
Staatliche Geologische Dienste. 64 Seiten
- 2015: Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden. Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums Umweltforschung Baden-Württemberg.
Koenigsdorff, R., Feuerstein, P., Zorn, R., Riegger, M., Blum, P., Braun, J., Grathwohl, P., Moormann, C.. 20 Seiten.
- 2016: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-Tech – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie.
Riegger, M., Rolker, J., Steger, H., Stober, I., Haist, M., Eckhardt, J.-D., Schalger, P., Zemann, M., Zorn, R. und Huttenloch, P., Stuttgart, 368 Seiten

Karlsruhe, den 28. April 2017

GTC Kappelmeyer GmbH



Philipp Heidinger



Axel Fabritius

14. Literaturhinweise

- Albrecht, I.; Frank, J. (2010): Vorversuche an Verpressmaterialien für Erdwärmesonden zum mecha-nisch-hydraulischen Verhalten bei Frost/Tau-Wechseln. bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 05/2010, S. 28-33.
- Anbergen, H., Frank, J., Albrecht, I. & Dittrich, H. (2011): Prüfwelle zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterial für EWS. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 10/2011, S. 38 - 42.
- Baumann, K., Büchner, U., Großwig, S, Hurtig, E., Senze, A., Triller, F. (2008): Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung von Erdwärmesondenanlagen durch geophysikalische Bohrlochmessungen. Der Geothermiekongress 2008, Kongressband, S. 280-289.
- 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
- LGRB: Koch, A., Martin, M., Prestel, R., Ruch, C., Sage, A., Trapp, C. (2015): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet „Nord“) – Sachstandsbericht – Az.: 95-4764//15-7202 Kh/Mt/Ps/Ru/Sag/Tr/W/Pop. Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. 22.12.2015. 159 Seiten.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N.(2008): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen – Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 2). bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 07/2007, S. 32-37.
- Kuckelkorn, J. M. & Reuß, M. (2013): Hydraulische Systemdichtheit und Frostbeständigkeit von Erdwärmesonden. – bbr-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau. Sonderheft Geothermie 2013, S. 6 - 13.
- Reuß, M. & Kuckelkorn, J. (2011): Systemdichtheit von Erdwärmesonden. – Vortrag Otti-Kolleg Oberflächennahe Geothermie Regensburg
- Reuß, M. (2014): Prüfstand zur Untersuchung der Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrungen unter realitätsnahen Bedingungen. – Vortrag 7. Norddeutsche Geothermietagung, Hannover.
- 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
- Riegger, M., Hochmuth, S., und Werner, M. (2013): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben EWSplus - Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden. Steinbeis Forschungsinstitut, Stuttgart, 140 Seiten
- Riegger, M., Rolker, J., Steger, H., Stober, I., Haist, M., Eckhardt, J.-D., Schalger, P., Zemann, M., Zorn, R. und Huttenloch, P. (2016): Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-Tech – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie, Stuttgart, 368 Seiten
- Rohner, E. (2009): TRT in Kombination mit hoch aufgelösten Temperatur-Tiefenprofilen zur Qualitätssicherung. TRT-Symposium, 16. September 2009, Göttingen
- Sattel, G. (1979): Aufbau einer Messapparatur zur Bestimmung thermischer Parameter von Gesteinen und Messungen an tertiären Sedimenten, Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe
- Sauer, M., Grundmann, E. (2009): Praxiserfahrungen mit der Auswertung des Geothermal Response Tests. Symposium „10 Jahre TRT in Deutschland“, Göttingen 16. September 2009.
- Staatliche Geologische Dienste (2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Wiesbaden 2011. 58 Seiten
- Staatliche Geologische Dienste (2015): Empfehlungen für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde. 2015. 64 Seiten
- Walter-Hertkorn, S., Kübert, M., Voutta, A. (2009): Messmethoden bei Erdwärmesondenbohrungen, GtV 3/2009, S. 19-23.
- Zschocke A. (2003): Software für die Anwendung der Pécletzahlanalyse auf Temperaturlogs in einem geschichteten Untergrund. GGA-Institut, Hannover

15. Anhang

Abbildung A1

Projekt BFE - Raum Zürich

EWS B2, B3, B4, B5, B6, B8, B9, B10, B11, B12:

Ungestörte Temperaturprofile vor Heizbeginn

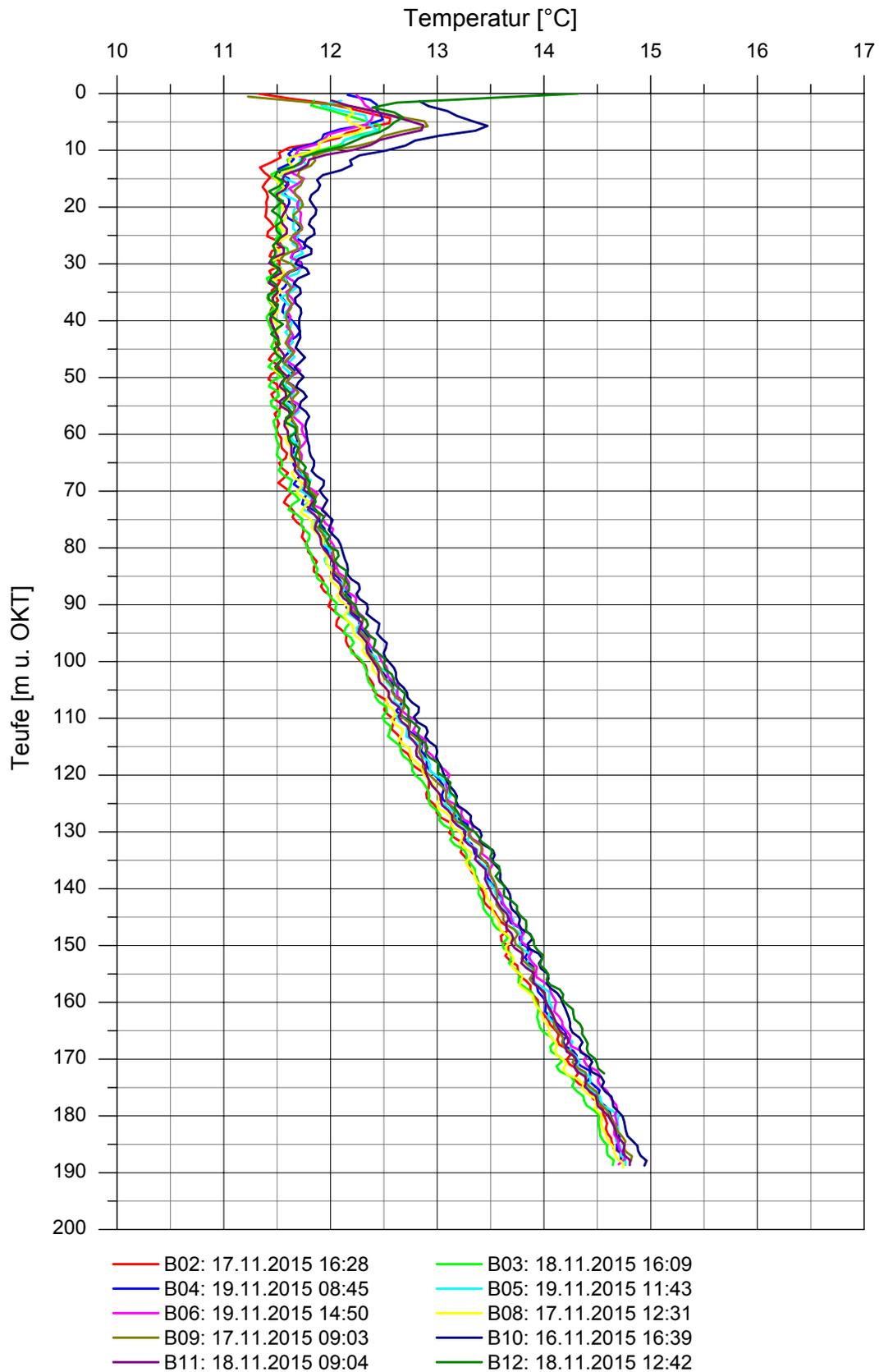


Abbildung A2

Projekt BFE - Raum Zürich

B10: Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens

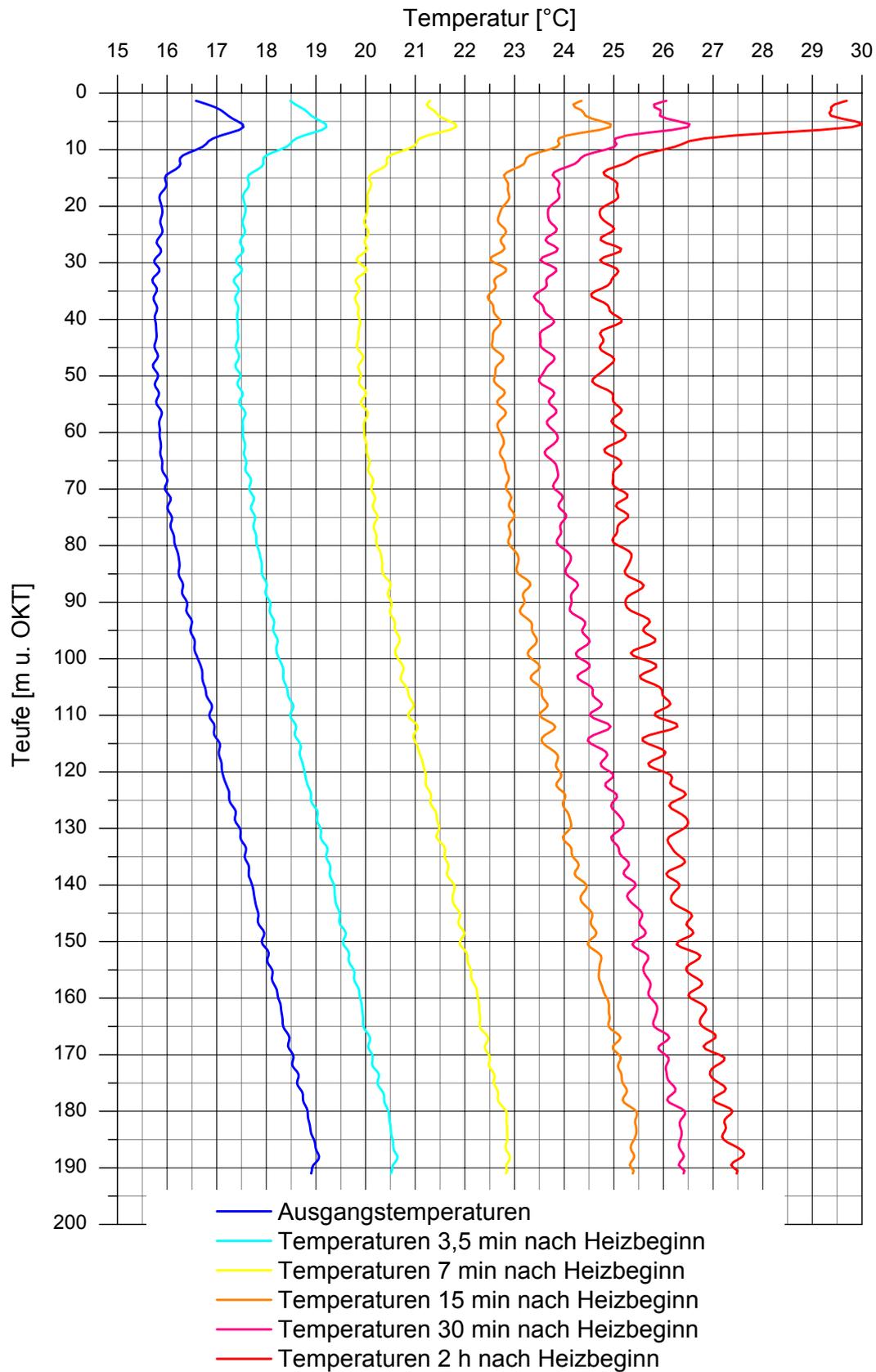


Abbildung A3

Projekt BFE - Raum Zürich

EWS B2, B3, B4, B5, B6, B8, B9, B10, B11, B12:

Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

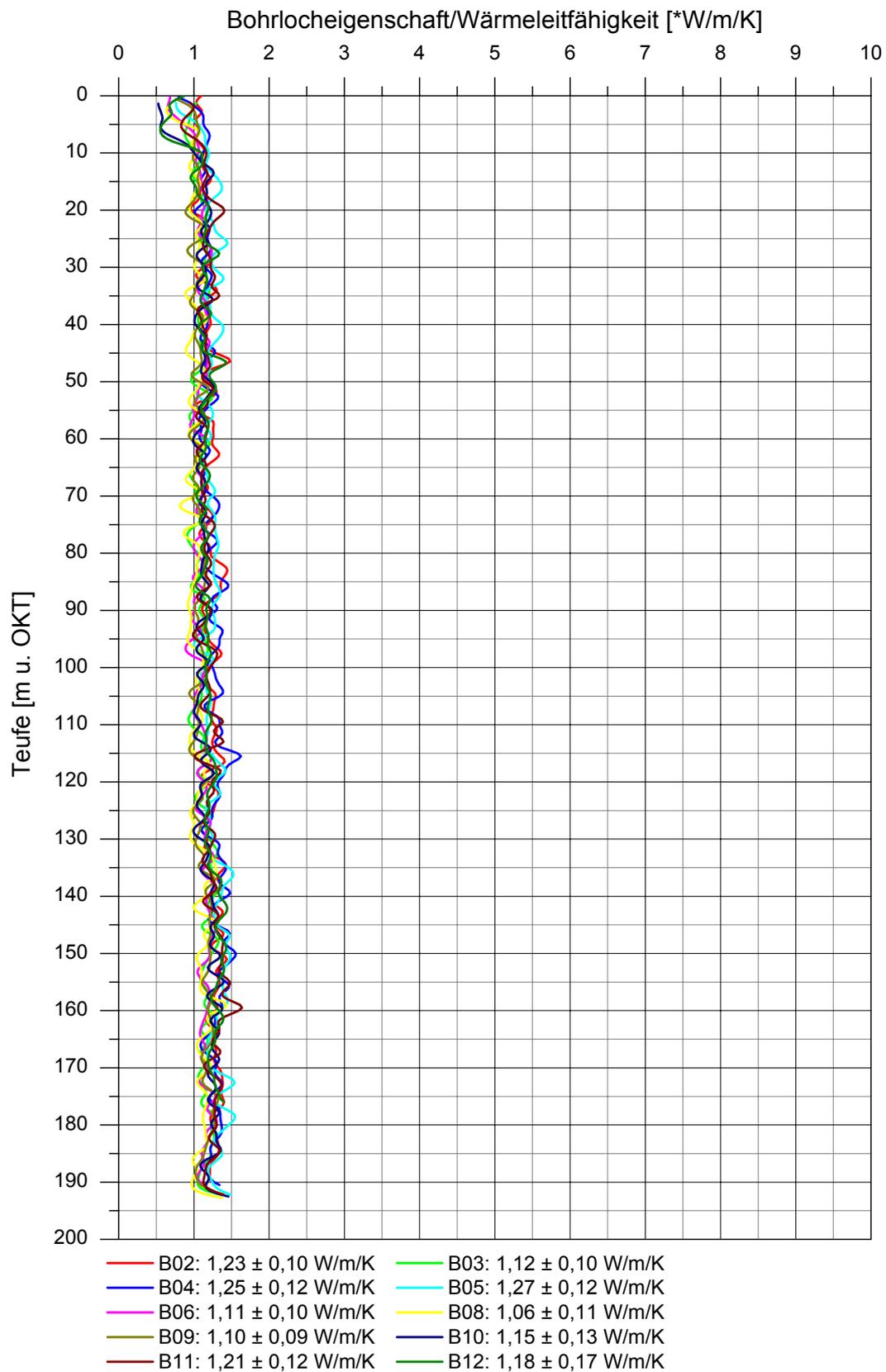
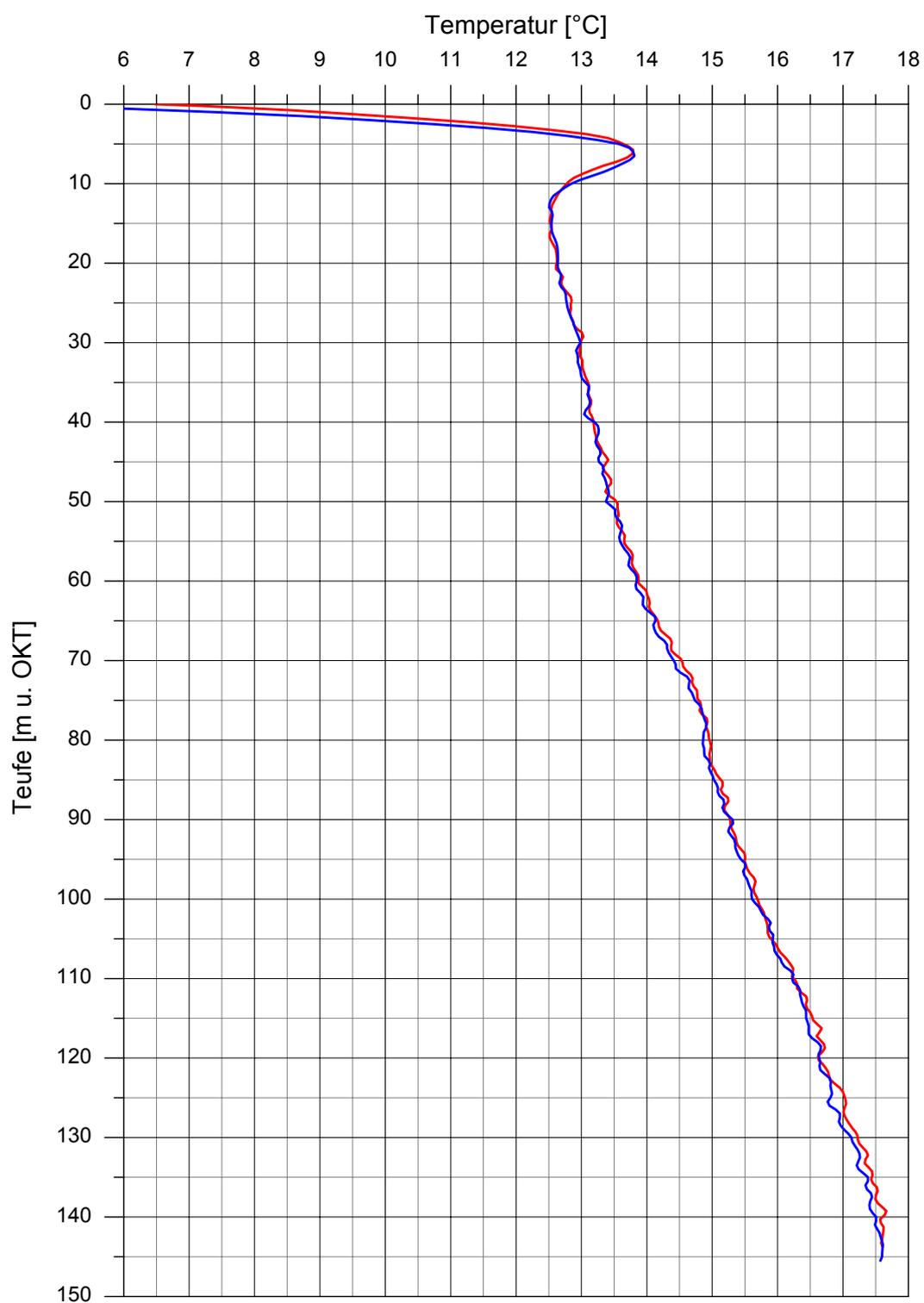


Abbildung A4

Projekt BFE - Lausen

Ungestörte Temperaturprofile vor Heizbeginn



— LWL Mobil (Messkabel temporär in Sondenrohr eingebracht)

— LWL Fix (Messkabel fest in Hinterfüllmaterial installiert)

Abbildung A5

Projekt BFE - Lausen

Unterschiedliche Position der Messkabel

Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

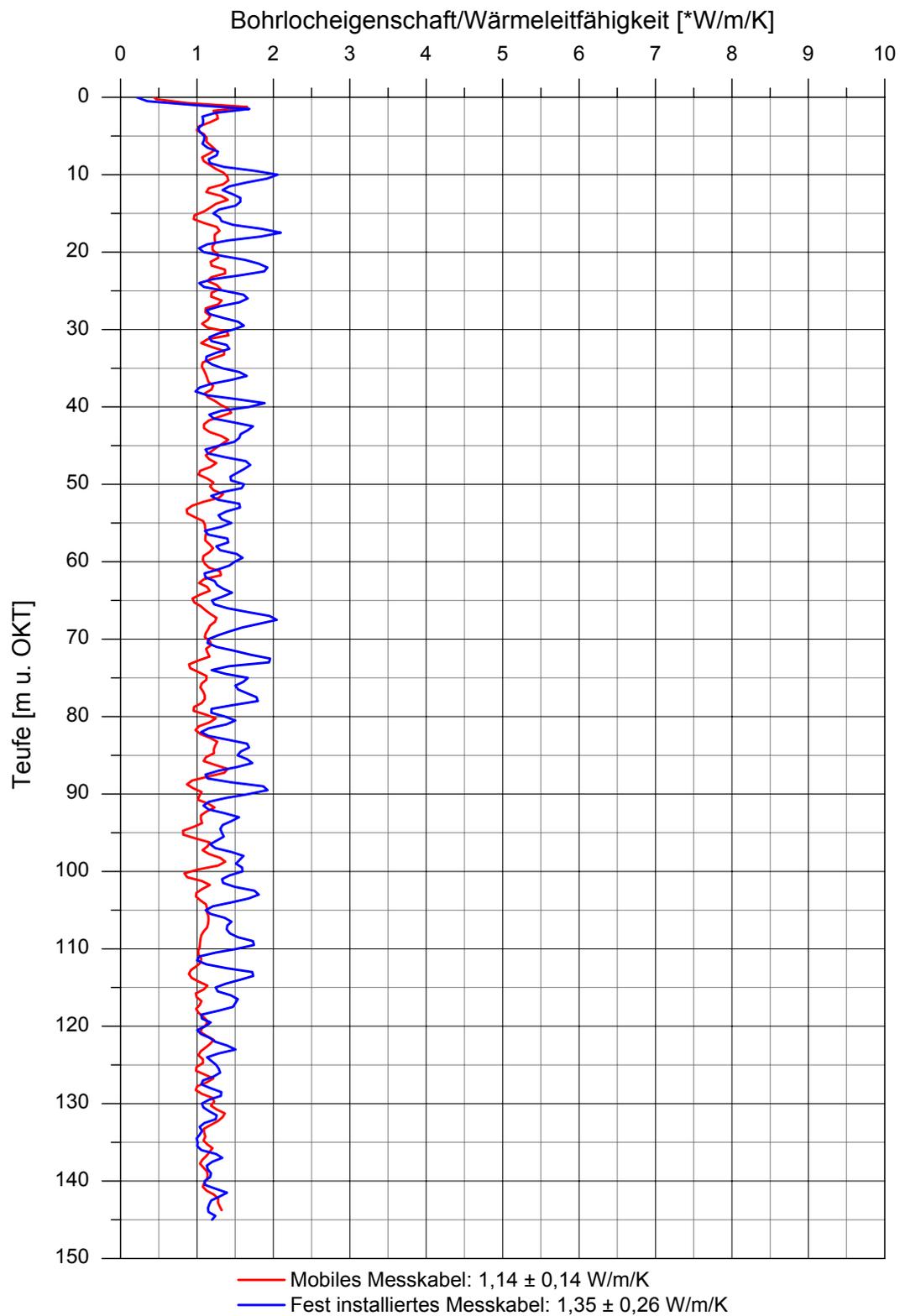


Abbildung A6

Projekt BFE - Wallis Ungestörtes Temperaturprofil vor Heizbeginn

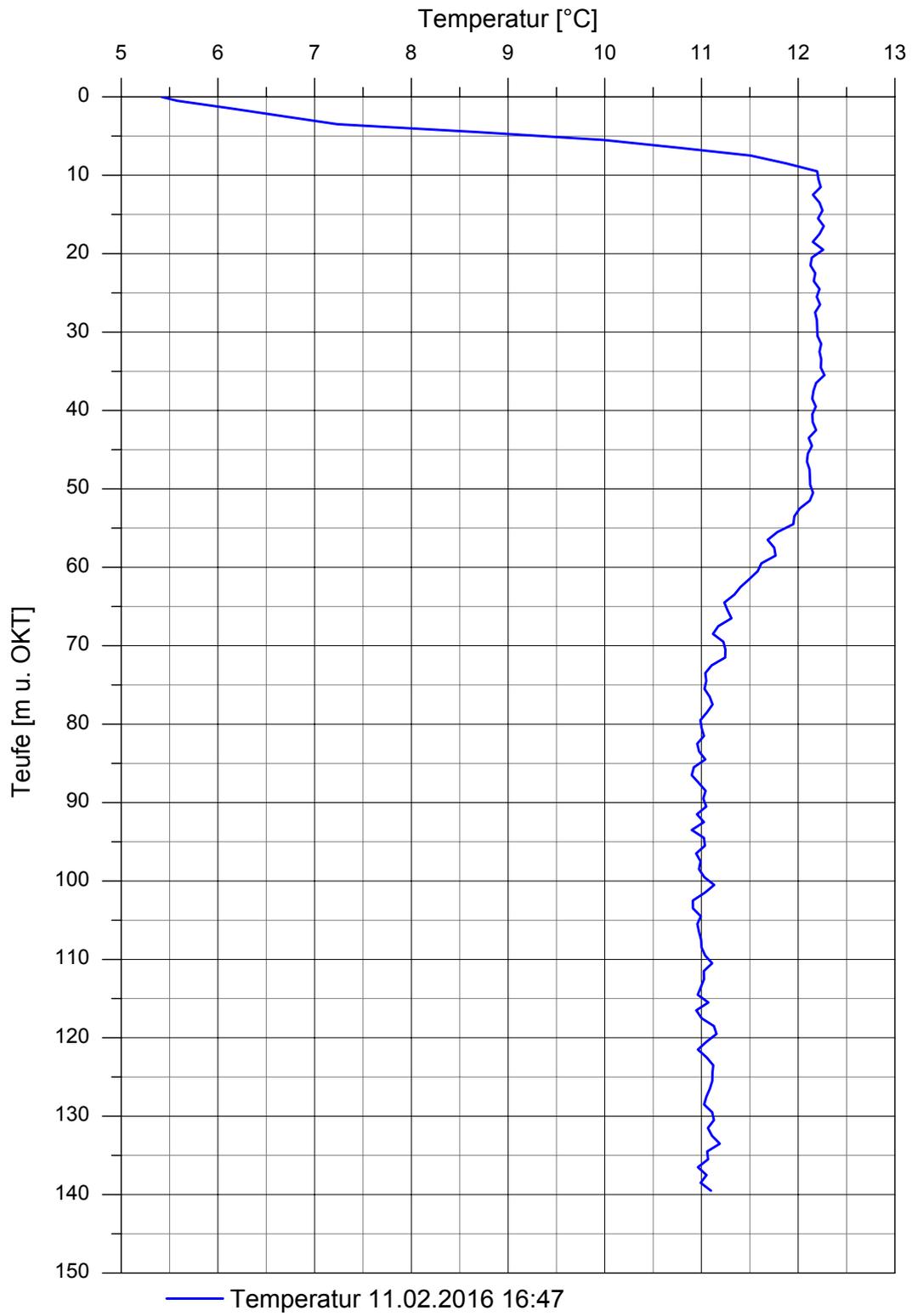


Abbildung A7

Projekt BFE - Wallis

Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens

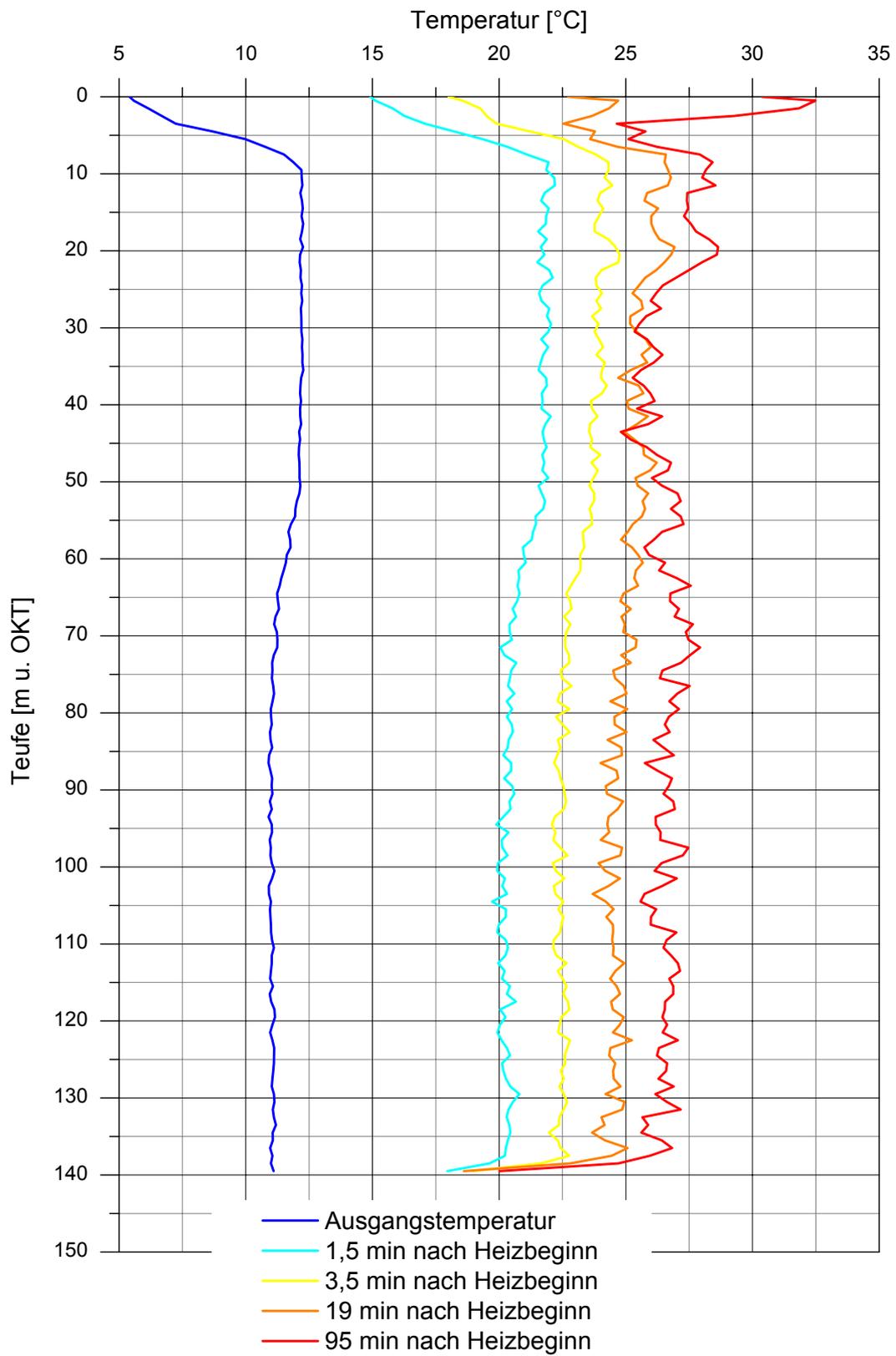


Abbildung A8

Projekt BFE - Wallis

Ausgewählte Temperaturprofile während des Wiederangleich

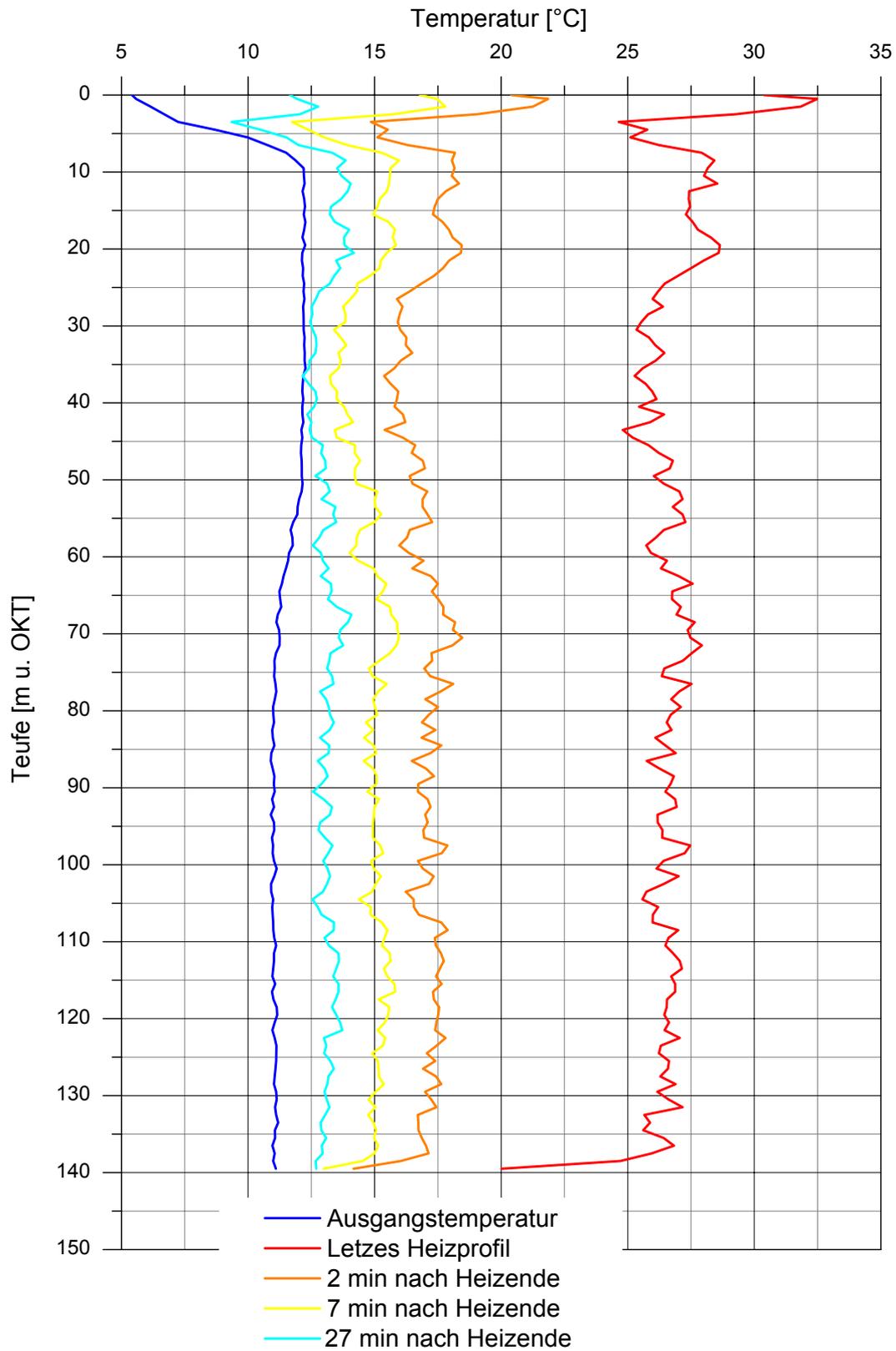


Abbildung A9

Projekt BFE - Wallis: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes in Verbindung mit Schichtenprofil der Geologie

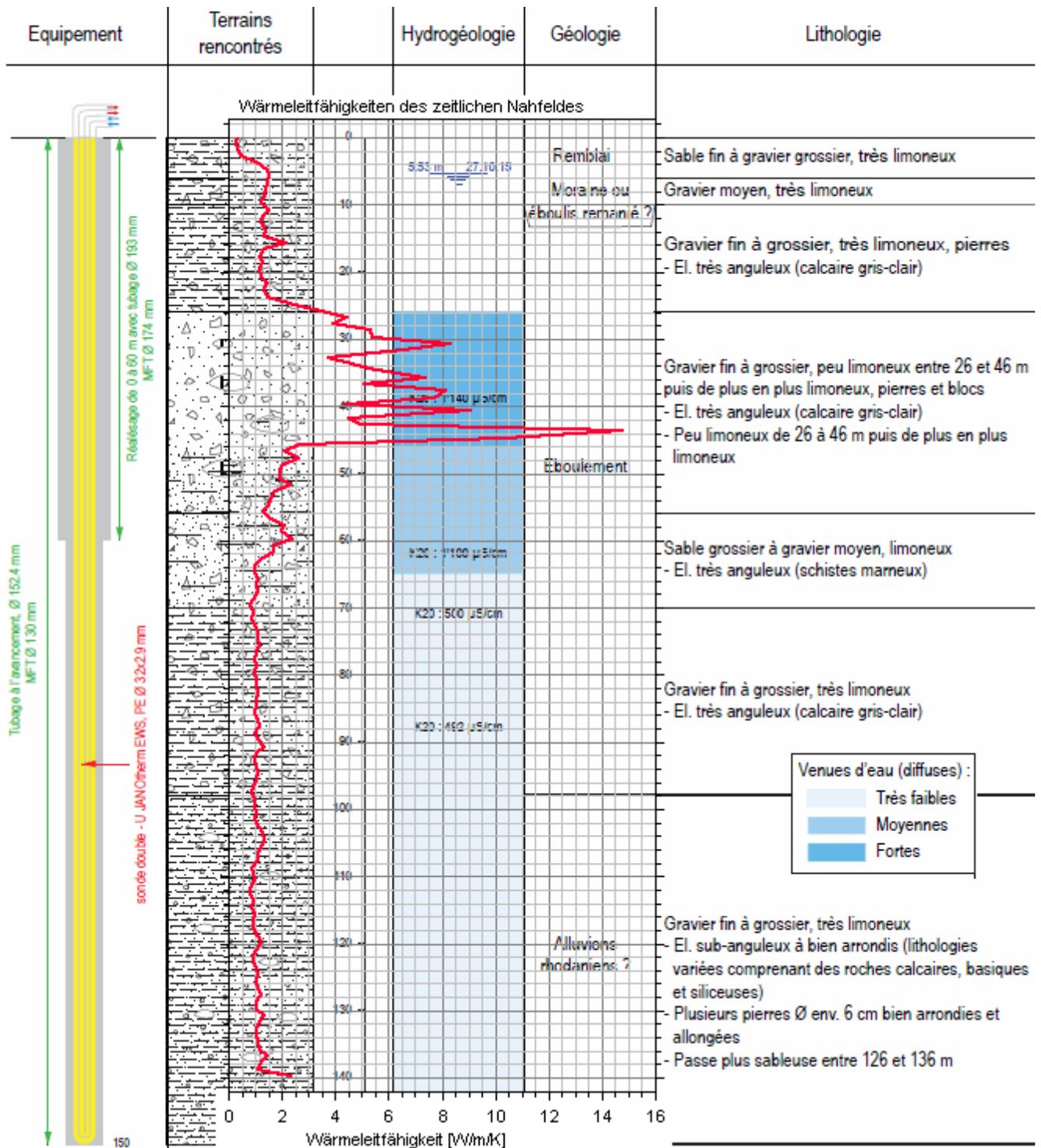


Abbildung A10

BFE Projekt - Aargau: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil mit Geologie

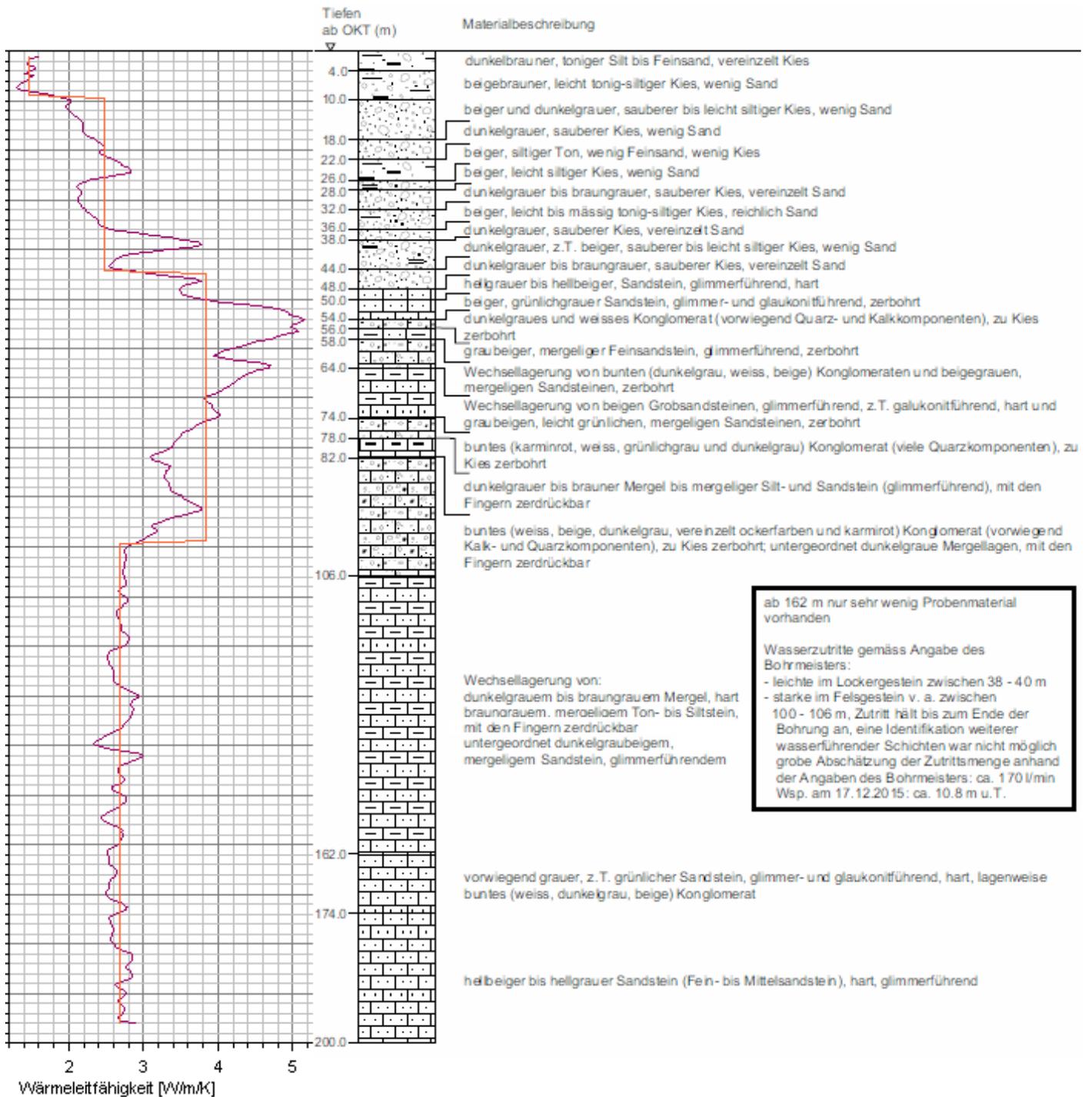


Abbildung A11

Projekt BFE - Aargau

EWS 06 bis 11: Ungestörte Temperaturprofile vor Heizbeginn

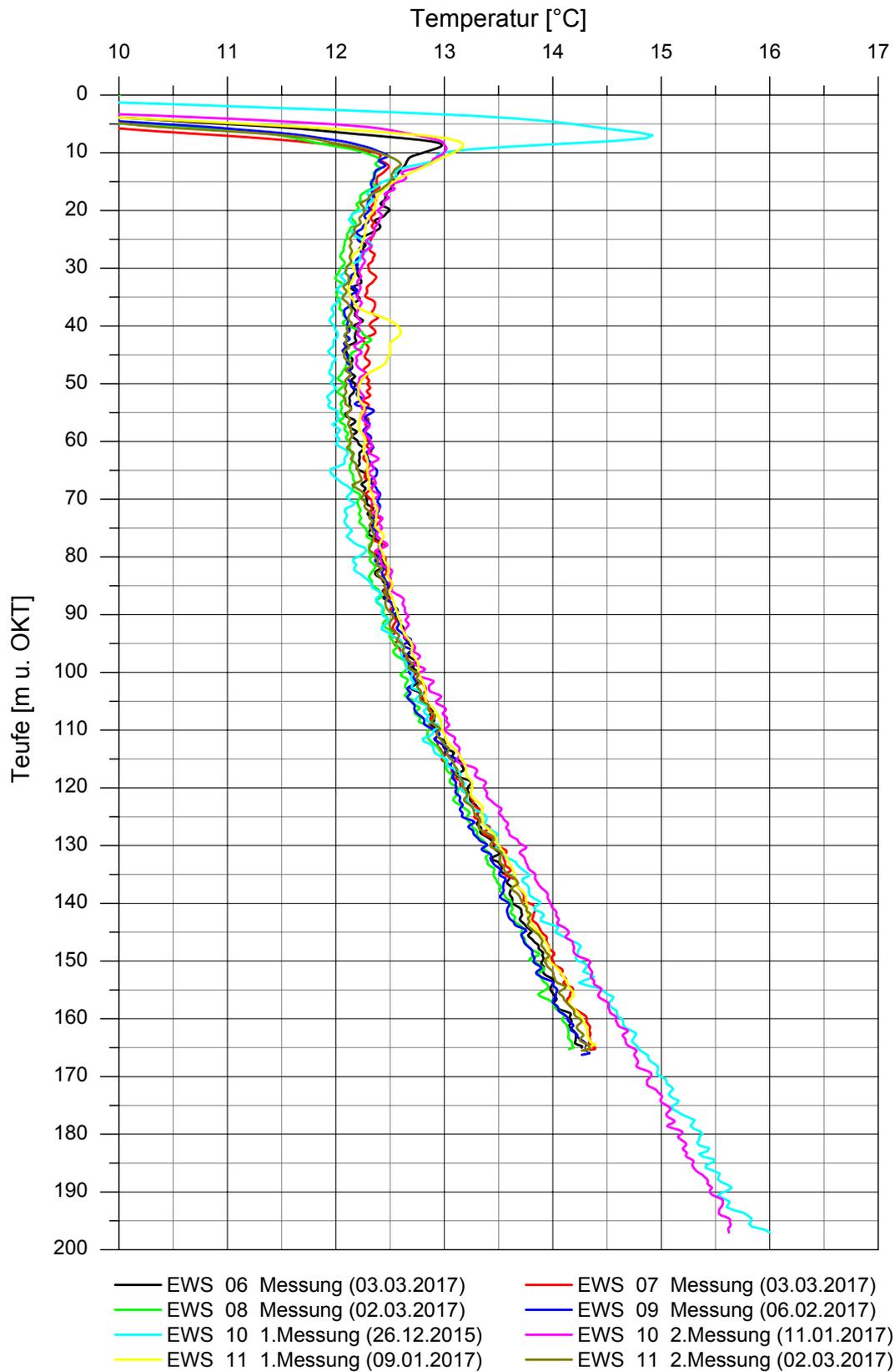


Abbildung A12

Projekt BFE - Aargau

EWS 06 bis 11: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

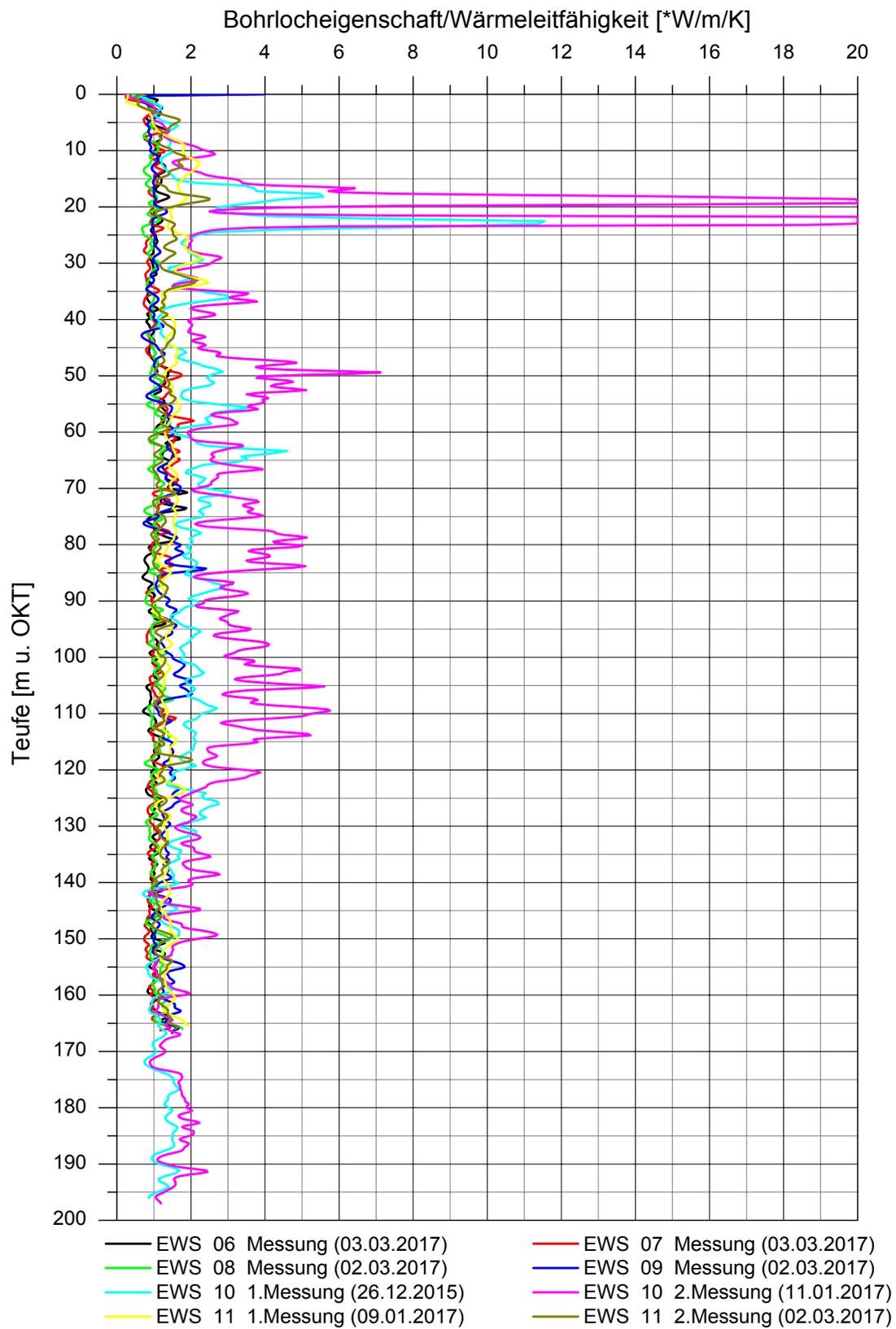
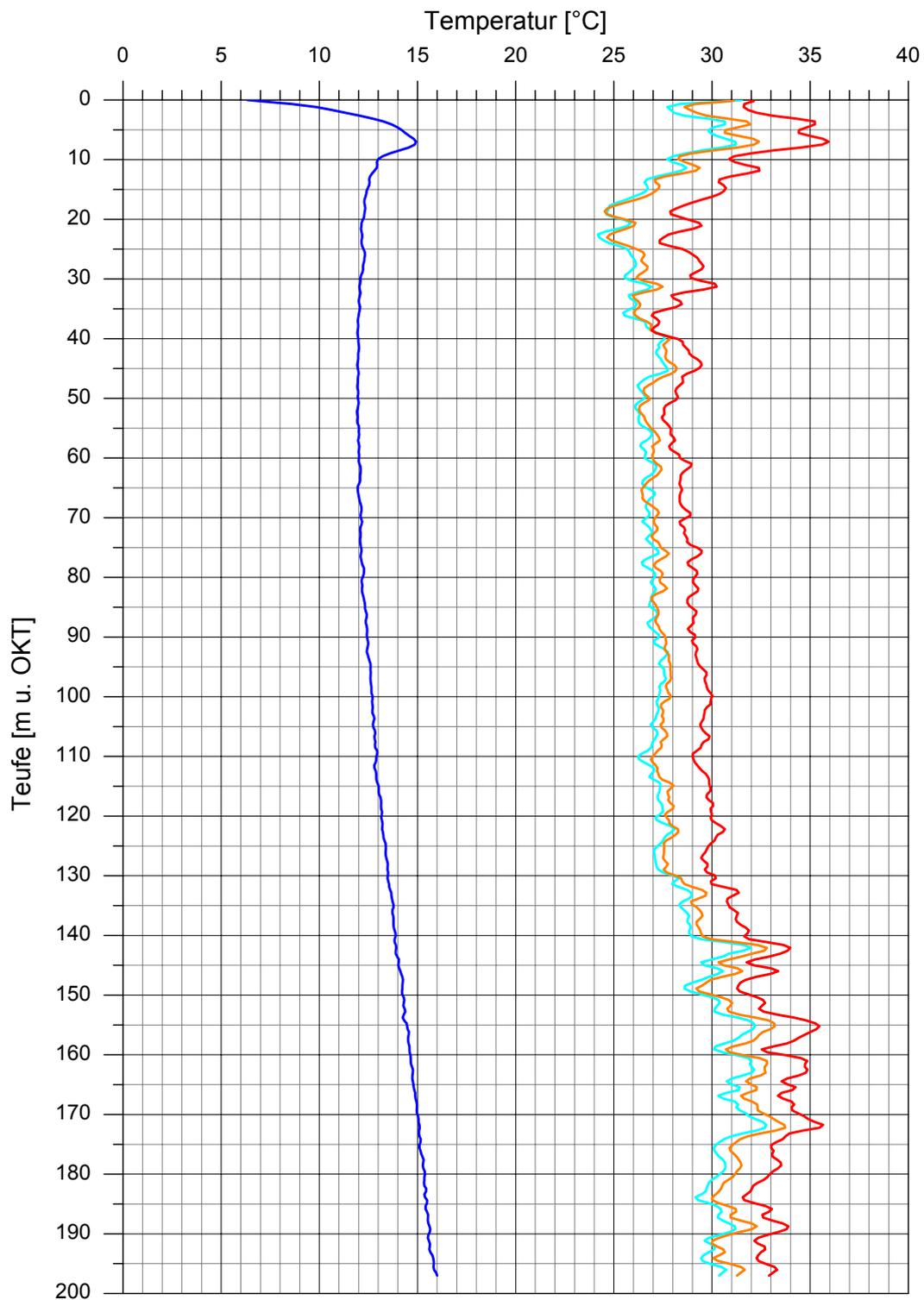


Abbildung A13

Projekt BFE - Aargau

EWS 10 Dezember 2015:

Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens



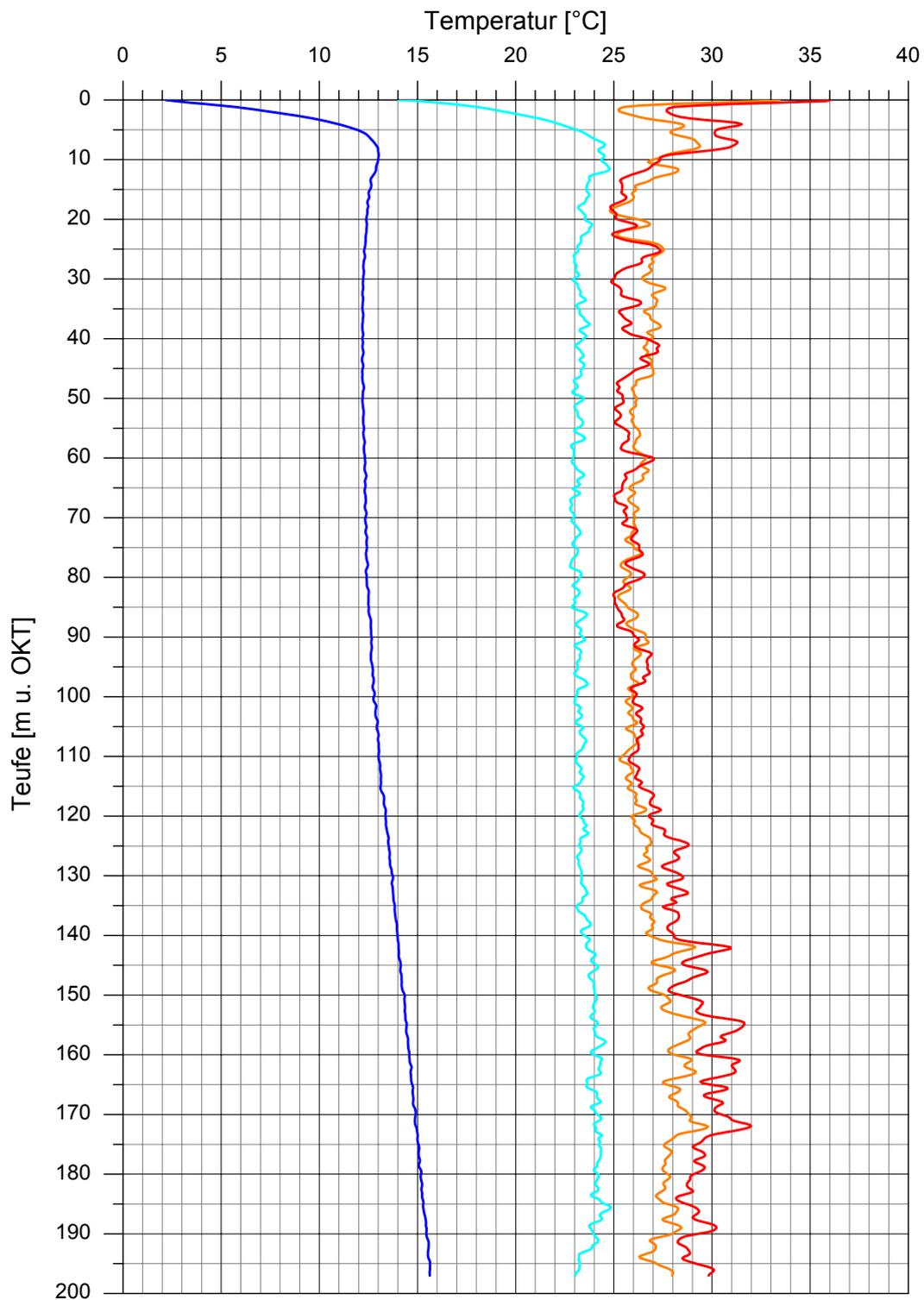
- Ausgangstemperaturen
- Temperaturen 1 Stunde nach Heizbeginn
- Temperaturen 3 Stunden nach Heizbeginn
- Temperaturen 3,5 Tage nach Heizbeginn

Abbildung A14

Projekt BFE - Aargau

EWS 10: Januar 2017

Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens



- Ausgangstemperaturen
- Temperaturen 2 min nach Heizbeginn
- Temperaturen 17 min nach Heizbeginn
- Temperaturen 85 min nach Heizbeginn

Abbildung A15

Projekt BFE - Aargau

EWS 10: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

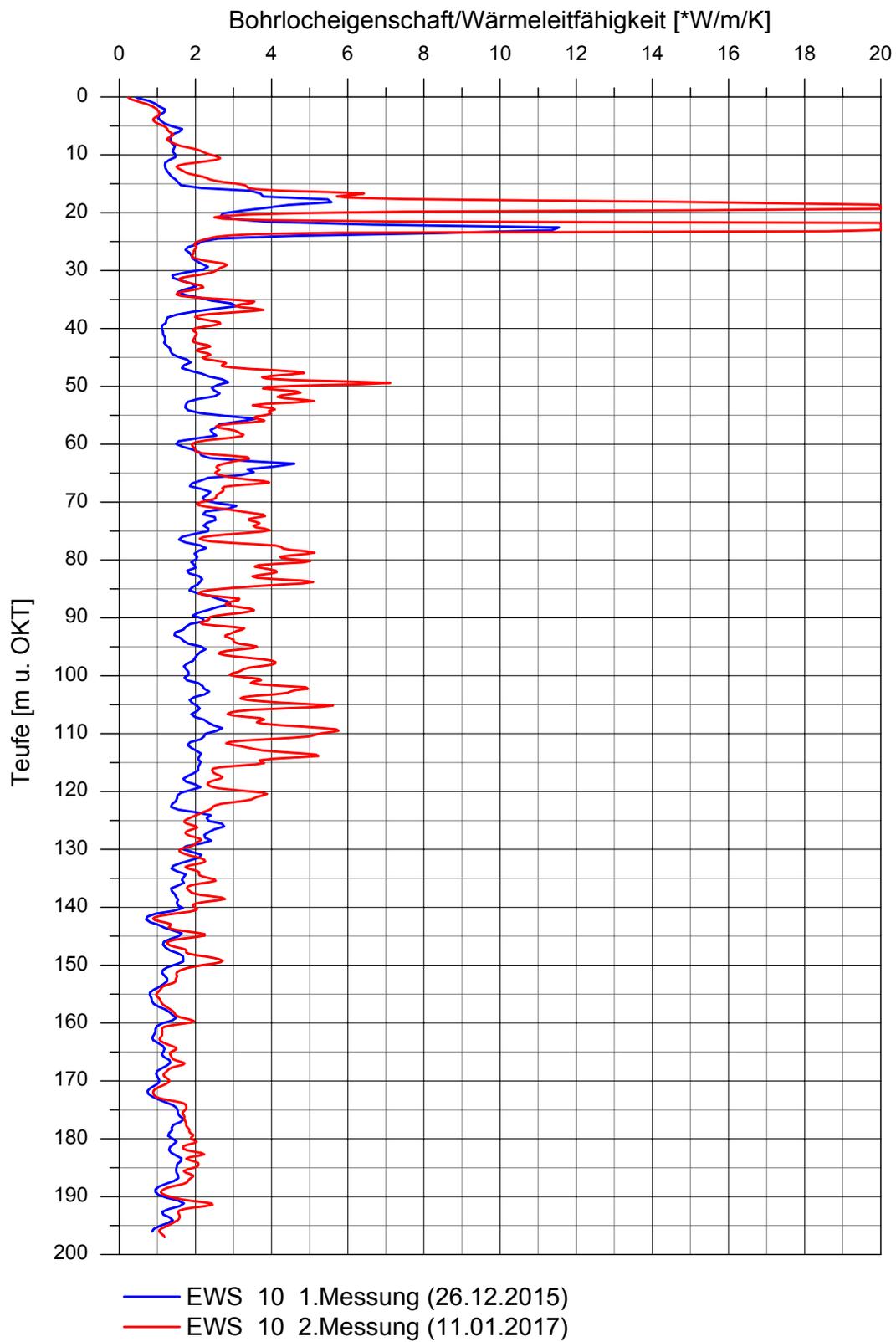


Abbildung A16

Projekt BFE - Aargau

EWS 11: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

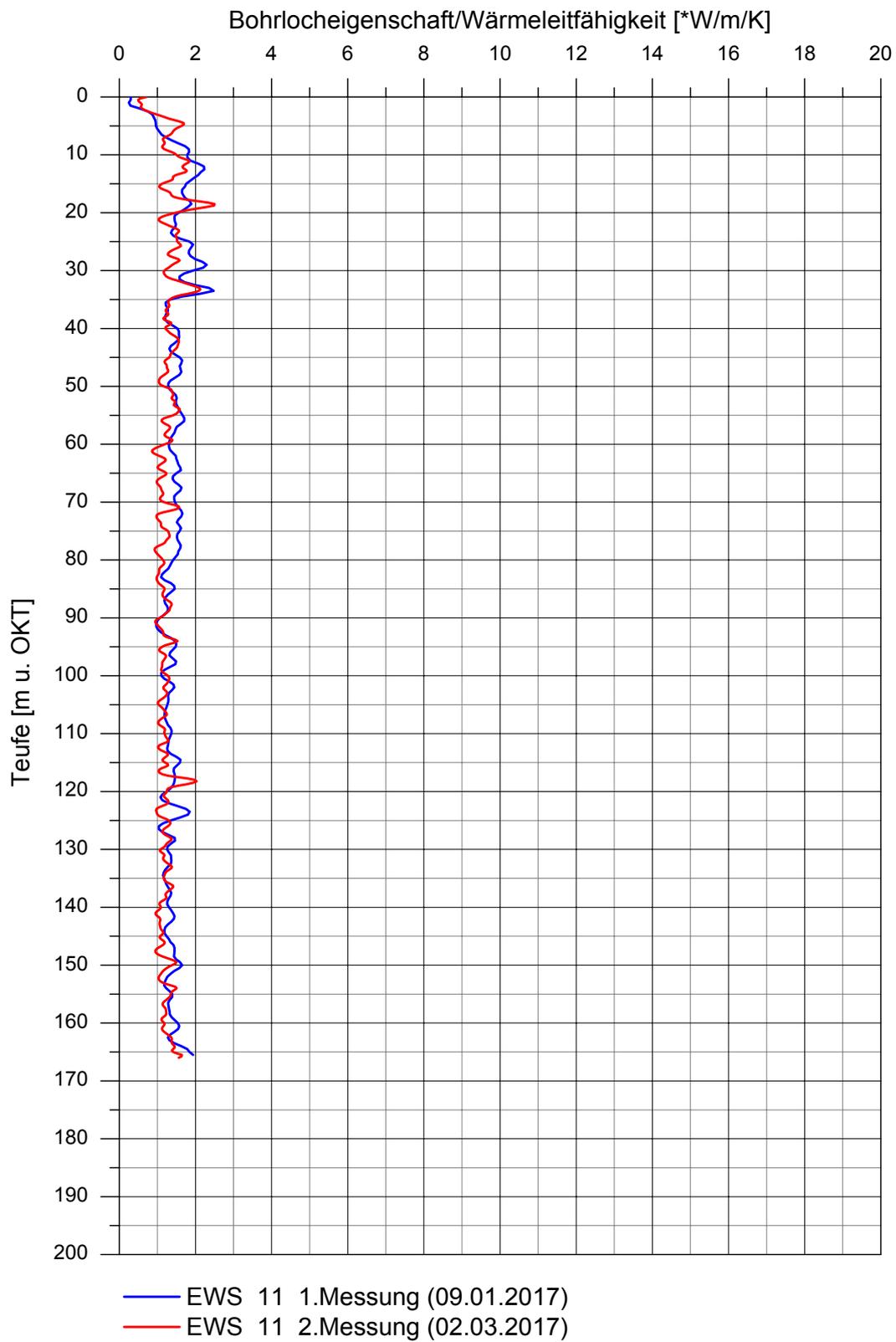
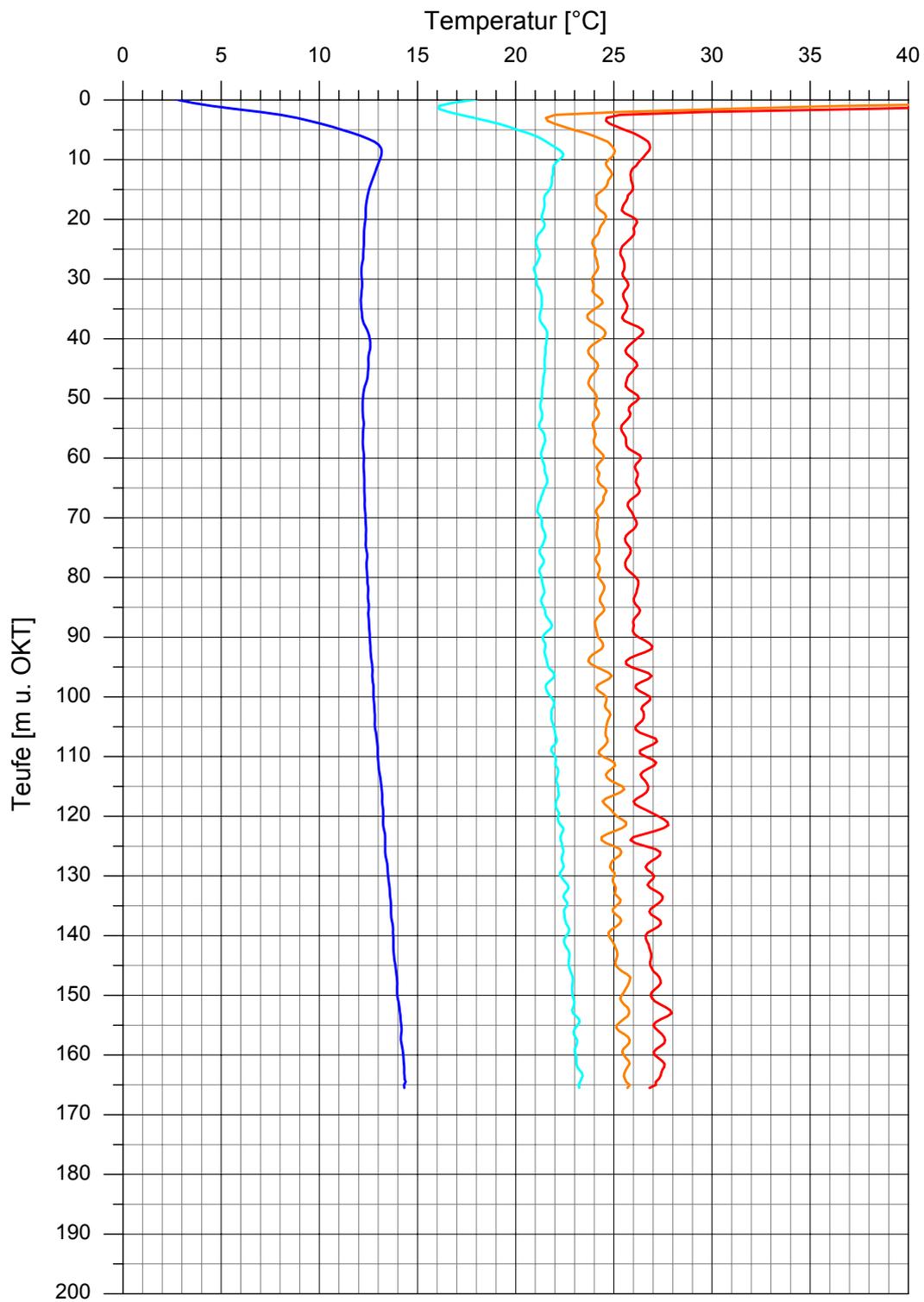


Abbildung A17

Projekt BFE - Aargau

EWS 11: Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens



- Ausgangstemperaturen
- Temperaturen 2 min nach Heizbeginn
- Temperaturen 15 min nach Heizbeginn
- Temperaturen 90 min nach Heizbeginn

Abbildung A18

Projekt BFE - Aargau

EWS 06 bis 09: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

