

7. April 2017

Faseroptische Temperaturmessungen - zur Detektierung der Hinterfüllung

Kurz – EGRTs (Enhanced Geothermal Response Tests) an Erdwärmesonden eines Projektes mit Einfluss starker Grundwasserströmung und Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich getroffener Schutzmassnahmen

Inhalt:

- Kurz - EGRTs in den Erdwärmesonden des Bauprojektes
Anonym. Bericht zu den faseroptischen Temperaturmessungen
vom 9.01. bis 3.03.2017



Aufnahme vom März 2017

Berichtsnummer.: E1711-01PM

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

Sektion Erneuerbare Energien

Mühlestrasse 4

CH-3063 Ittigen

Bearbeiter GTC:

Dipl. Geophys. Philipp Heidinger

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

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. Im vorliegenden Fall handelt es sich um ein Gebiet mit geringer Grundwassermächtigkeit im oberflächennahen Lockergestein, jedoch starker Grundwasserführung im darunterliegenden Fels. Dies wurde durch eine vorgängige Sondierbohrung 2015 bestätigt. Erdwärmesonden werden durch die kantonale Gewässerschutzbehörde unter Auflagen i.d.R. zugelassen.

Vom 9.01.2017 bis 3.03.2017 wurden mit dem faseroptischen Messsystem in insgesamt sechs Erdwärmesonden des Bauprojektes sieben Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden Kurz-EGRTs durchgeführt, die aufgrund kürzerer Aufheizdauer und damit geringerer Eindringtiefen als beim regulären EGRT die thermischen Parameter der Bohrung (Sondenrohre und Hinterfüllung) bestimmen. Über diese Ergebnisse können Aussagen zur Qualität der Hinterfüllungsarten und -methoden getroffen werden.

Zu Beginn der Tests wurde die bestehende Temperatur-Tiefen-Verteilung in den Bohrungen erfasst. Im Anschluss daran wurde jeweils ein kurzer Heat-Pulse-Test bis maximal zwei Stunden Heizdauer durchgeführt. Auf Basis der dabei gemessenen Temperaturdaten konnte die effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes, die sogenannte Bohrlocheigenschaft als Funktion der Tiefe ermittelt werden.

Als erstes wurde die Erdwärmesonde EWS 10 vermessen, welche schon 2015 als Pilotsonde erstellt wurde. An dieser Sonde wurde damals bereits ein EGRT durchgeführt, um das Erdwärmesondenfeld auf den Wärmebedarf auszulegen. Der EGRT aus dem Jahr 2015 zeigt bereits lokale Anomalien aus. Die Resultate der ersten Messung im Rahmen dieser Studie im Januar 2017 konnten somit mit den Resultaten aus dem EGRT im Jahr 2015 verglichen werden.

Diese EWS 10 ist bis 197 m Tiefe ausgebaut, hat einen Bohrdurchmesser von 132 mm und wurde ohne zusätzliche Schutzmassnahmen des Hinterfüllmaterials (Küchler FLOW & FILL, 1.0 W/m/K) niedergebracht. Die im Jahr 2015 aufgezeigten Anomalien waren im Januar 2017 bereits stärker ausgeprägt und zusätzlich zeigte die EWS weitere, ausgedehnte Bereiche mit erhöhten Werten der Bohrlocheigenschaft, so dass das Hinterfüllmaterial dieser Erdwärmesonde möglicherweise eine generelle Degradation erfahren hat.

Die Ergebnisse der zweiten Erdwärmesonde EWS 11, die ebenfalls ohne zusätzliche Schutzmassnahmen niedergebracht wurde, jedoch mit einer Hinterfüllung mit höherer Wärmeleitfähigkeit (Küchler K ZEO-THERM 2.0), zeigen die Messresultate 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, dritte, vierte, fünfte und sechste 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 ausserhalb der geschützten Bereiche sind keine grösseren Anomalien erkennbar.

Vor allem der Gewebestrumpf hat sich 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.

2. Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	3
2.	Inhaltsverzeichnis	5
3.	Verzeichnis der Abbildungen	6
4.	Beschreibung des faseroptischen Temperaturmessverfahrens	8
5.	Bemerkungen zum Erdwärmesonden-Feld	18
6.	Einbau der faseroptischen Messeinrichtung	19
7.	Durchführung der Messungen nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter	28
8.	Literaturhinweise	36
9.	Anhang	37

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: Erdwärmesondenkopf von EWS 11
- Abb. 7: Detailaufnahme des Erdwärmesondenkopfes von EWS 11
- Abb. 8: Messaufbau des Kurz-EGRT am fest im Hinterfüllmaterial installierten Hybridkabel von EWS 10
- Abb. 9: Erdwärmesondenkopf von EWS 9
- Abb. 10: Erdwärmesondenkopf von EWS 9
- Abb. 11: Erdwärmesondenkopf von EWS 11
- Abb. 12: Erdwärmesondenkopf von EWS 11
- Abb. 13: Erdwärmesondenkopf von EWS 8
- Abb. 14: Detailaufnahme des Erdwärmesondenkopfes von EWS 8
- Abb. 15: Übersicht der Messung von EWS 7
- Abb. 16: Detailaufnahme des Erdwärmesondenkopfes von EWS 7
- Abb. 17: Übersicht der Messung von EWS 6

im Anhang:

- Abb. A1: Lageplan der untersuchten Erdwärmesonden
- Abb. A2a: EWS 10 – Effektive Wärmeleitfähigkeiten des EGRT 12.2015 in Verbindung mit dem geologischen Profil
- Abb. A2b: EWS 10 – Darcy Geschwindigkeiten aus der Pécletzahlanalyse
- Abb. A3a: EWS 10 – Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens (Messungen Dezember 2015 und 11.01.2017)
- Abb. A3b: EWS 10 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des EGRT vom Dezember 2015

- Abb. A3c: EWS 10 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT vom Januar 2017
- Abb. A3d: EWS 10 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile (Messungen Dezember 2015 und 11.01.2017)
- Abb. A4a: EWS 11 – Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens (Messungen 9.01.2017 und 2.03.2017)
- Abb. A4b: EWS 11 - Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT vom 2.03.2017
- Abb. A4c: EWS 11 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile (Messungen 9.01.2017 und 2.03.2017)
- Abb. A5a: EWS 9 – Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens (Messung 6.02.2017)
- Abb. A5b: EWS 9 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A6a: EWS 8 – Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens (Messung 2.03.2017)
- Abb. A6b: EWS 8 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A7a: EWS 7 – Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens (Messung 3.03.2017)
- Abb. A7b: EWS 7 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A8a: EWS 6 – Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens (Messung 3.03.2017)
- Abb. A8b: EWS 6 - Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile
- Abb. A9: Alle Ausgangstemperaturen in einer Graphik
- Abb. A10: Alle Bohrlocheigenschaft-Tiefen-Profile in einer Graphik

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.

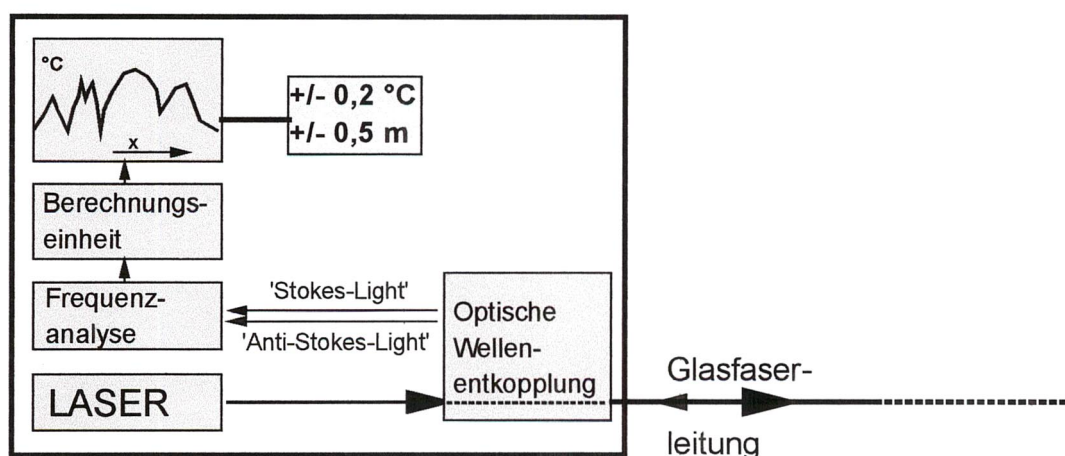


Abb. 1: Messprinzip

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.

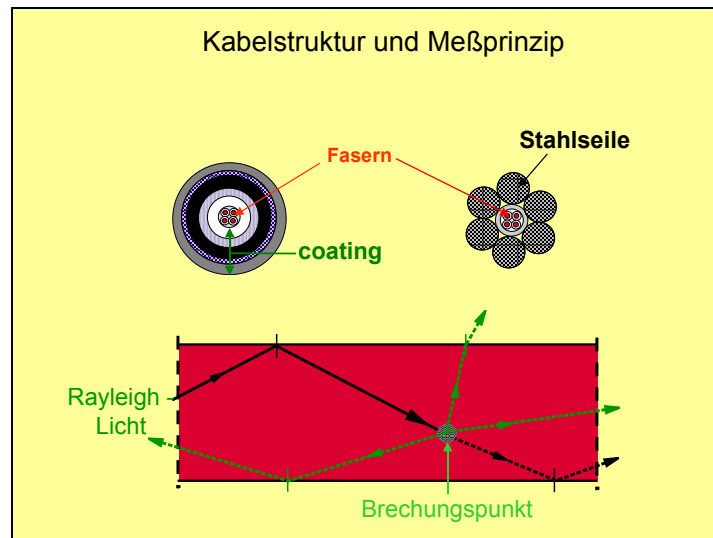


Abb. 2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Kabelaufbauten (oben). Schematische Darstellung der Streuung bzw. Reflexion eines optischen Signals in einer Glasfaser (unten)

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 Wärme front ist eine Funktion der Heizdauer. Durch die Auswertung der Temperaturkurven entsprechend kurzer Heizzeiten können auch die thermischen Parameter des Verfüllmaterials von Bohrungen entlang der Messstrecke bestimmt werden. Da das Hybridkabel dauerhaft im Untergrund verbleibt, kann der Enhanced Geothermal Response Test beliebig wiederholt werden. Die Temperaturverteilung im Untergrund und dessen thermische Materialparameter können so auch bei geänderten Randbedingungen bestimmt werden.

Messaufbau

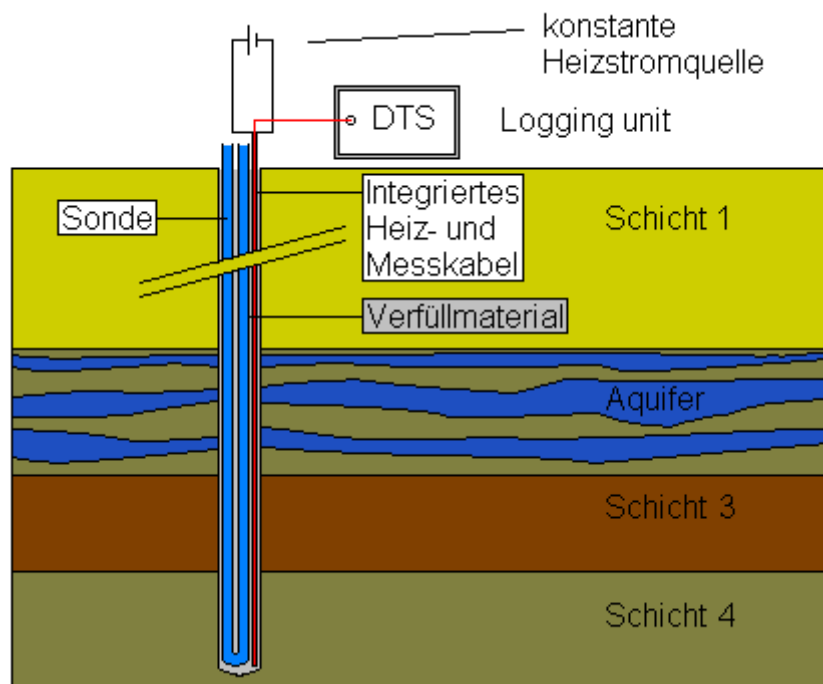


Abb. 3: Schema des Aufbaus für einen Enhanced Geothermal Response Test in einer Erdwärmesonde

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

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

Aufheizmethode

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

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

Physikalische Grundlagen

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

Bohrlochwiderstand

Die Berechnung des Bohrlochwiderstandes erfolgt aus der gemischten Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes (Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials und der 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, Péclezahlanalyse

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 Péclezahlanalyse nicht nur relative Geschwindigkeitsunterschiede, sondern auch die absolute Filtergeschwindigkeiten (Darcy-Geschwindigkeiten) des durchströmten Bodens tiefenabhängig bestimmbar.

Die Péclezahlanalyse ist ein eindimensionaler Ansatz, um die Filtergeschwindigkeit (Darcygeschwindigkeit) des Grundwassers zu ermitteln. Die Péclezahl 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 Péclezahl ist somit durch

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

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

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

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

$$v_f = \frac{\lambda_{konst. n. \lambda_{konst. i.}}}{l \rho c_p}$$

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]

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

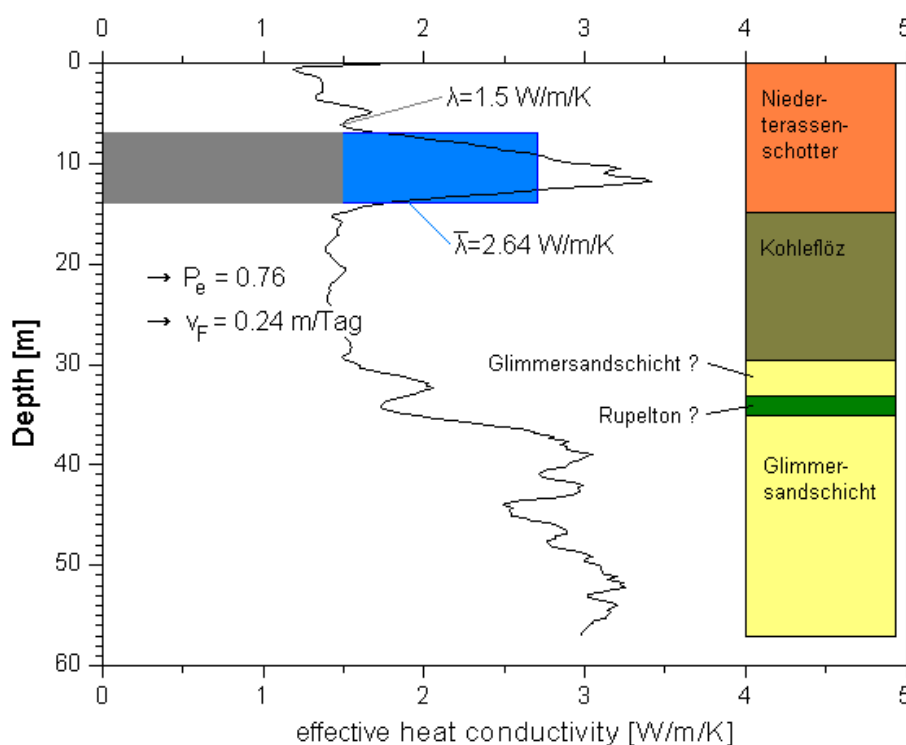


Abb. 4: Effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens über die Tiefe der Bohrung und Bestimmung der Filtergeschwindigkeit durch die Pécletzahlanalyse

Das Ergebnis der Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist in Abbildung 4 dargestellt. Die lithologischen Schichten sind in der Kurve der effektiven Wärmeleitfähigkeit

eindeutig identifizierbar. Es ist deutlich erkennbar, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit keine konstante Größe ist, sondern mit der Tiefe variiert.

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

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

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

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

5. Bemerkungen zum Erdwärmesonden-Feld

Für das Bauprojekt wurde im Jahr 2015 eine Testbohrung mit einer Tiefe von 200 m durchgeführt. Nach dem EGRT wurde mittels einer Simulation die Zahl der nötigen EWS definiert und festgelegt, dass zukünftig ein verbessertes Hinterfüllmaterial verwendet werden soll. Ende 2016 wurde mit dem Niederbringen der weiteren Erdwärmesonden begonnen.

Infolge der vorhandenen starken Grundwasserströmung und einer Änderung der Bewilligungspraxis verlangte die kantonale Gewässerschutzbehörde ab 2016 den Einbau einer Schutzvorrichtung. Dies hätte demnach auch für die im Dezember 2016 abgeteufte, zweite Bohrung gegolten. Durch technische Probleme konnten jedoch bei dieser Bohrung, trotz mehrmaligen Versuchen, ein Gewebepacker nicht auf Wunschtiefe eingebracht werden. Da es nicht erwünscht war, das Bohrloch über mehrere Tage offen zu halten, wurde die Sonde eingebaut und die Hinterfüllung ohne Schutzvorrichtung eingebracht. In der dritten EWS wurde als Schutzvorrichtung ein HDPE-Rohr angebracht. In der vierten Bohrung wurde auf einen Gewebepacker gewechselt und ab der fünften EWS wurden ausschliesslich Gewebestrümpfe eingebaut.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die erstellten und vermessenen Erdwärmesonden:

Name	Erstellungs-jahr	Länge der EWS	Messtyp	Verwendetes Hinterfüllungs-material	Messungen	Vermessene Länge	Eingebaute Schutz-massnahme
EWS 10	2015	200 m	Messkabel in Hinterfüllmaterial	FLOW & FILL	26.12.2015 und 11.01.2017	197 m	-
EWS 11	2016	200 m an-visiert	Messkabel in Sonden-rohr	K ZEOTHERM 2.0	9.01.2017 und 2.03.2017	165,5 m	-
EWS 9	2017	200 m an-visiert	Messkabel in Sonden-rohr	K ZEOTHERM 2.0	6.02.2017	166 m	HDPE-Rohr von 0 - 55 m Tiefe
EWS 8	2017	200 m an-visiert	Messkabel in Sonden-rohr	K ZEOTHERM 2.0	2.03.2017	165 m	Gewebepacker von ca. 10 - 55 m Tiefe
EWS 7	2017	200 m an-visiert	Messkabel in Sonden-rohr	K ZEOTHERM 2.0	3.03.2017	165.5 m	Gewebe-strumpf von ca. 10 - 55 m Tiefe
EWS 6	2017	200 m an-visiert	Messkabel in Sonden-rohr	K ZEOTHERM 2.0	3.03.2017	165 m	Gewebe-strumpf von ca. 10 - 55 m Tiefe

6. Einbau der faseroptischen Messeinrichtung

Die Erdwärmesonden, in denen die mobilen Kurz-Enhanced-Geothermal-Response-Tests (Kurz-EGRT-Mobil) durchgeführt wurden, befinden sich auf dem Gelände des Bauprojektes. Bei der in die Rohre der Erdwärmetauscher eingebrachten Messsonde handelt es sich um ein sogenanntes Hybridkabel, das zusätzlich zu den optischen Fasern Kupferleiter enthält. Das Hybridkabel wurde jeweils in die Erdwärmesonde so tief als möglich eingebracht, ohne das nachträgliche Ziehen des Kabels zu gefährden. Die Kabel konnten so jeweils bis in knapp 170 m u. OKT eingeführt werden.



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

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

Die sieben Messungen im Auftrag des BFE fanden von 9.01.2017 bis 3.03.2017 statt. Hinzugefügt wurden auch die Kurzzeitergebnisse eines EGRT vom Dezember 2015 in einer der Erdwärmesonden, so dass insgesamt acht Messungen im vorliegenden Bericht ausgewertet werden.

Die Kurz-EGRTs an den Erdwärmesonden EWS 6, 7, 8, 9 und 11 fanden mit einem EGRT-Mobil Kabel statt, das in das Sondenrohr eingebracht und nach Ende der Messungen wieder gezogen wird. Die Messung an Erdwärmesonde EWS 10 hingegen wurde an einem, im Hinterfüllmaterial fest installierten, Hybridkabel durchgeführt.

Im Folgenden werden Bilder vom Einbau und Durchführung der Messungen in chronologischer Reihenfolge gezeigt.

Messung vom 9.01.2017: EWS 11



Abb. 6: Erdwärmesondenkopf von EWS 11 (Aufnahme vom 9.01.2017)

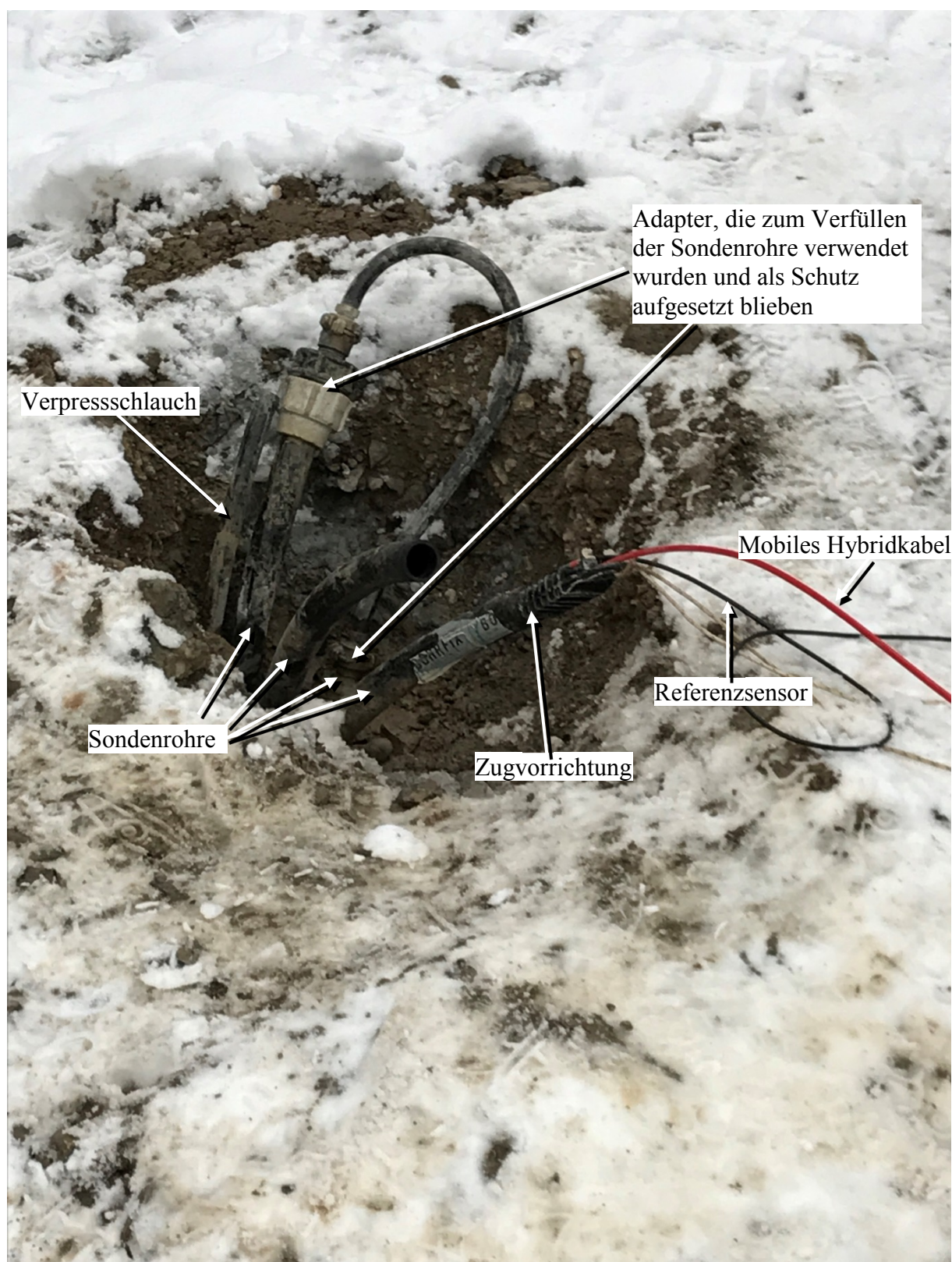


Abb. 7: Detailaufnahme des Erdwärmesondenkopfes von EWS 11 (Aufnahme vom 9.01.2017)

Messung vom 11.01.2017: EWS 10

Abb. 8: Messaufbau des Kurz-EGRT von EWS 10 (Aufnahme vom 11.01.2017). Das Hybridkabel ist hier fest im Hinterfüllmaterial installiert. An diesem Kabel wurde auch im Dezember 2015 ein EGRT durchgeführt.

Messung vom 6.02.2017: EWS 9



Abb. 9: Erdwärmesondenkopf von EWS 9 (Aufnahme vom 6.02.2017), mittig im Bild. Rechts im Bild ist die Haspel mit den Sondenrohren für eine weitere Bohrung zu sehen.

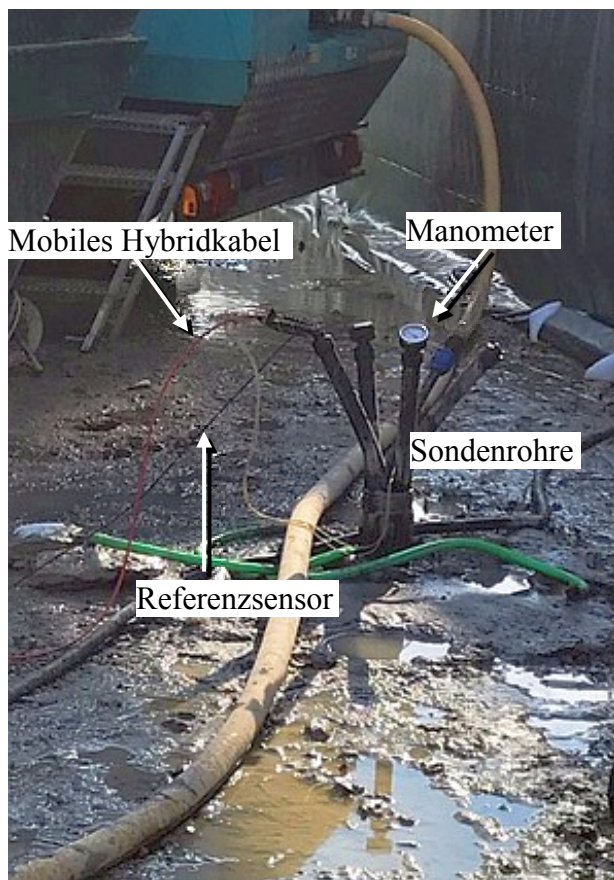


Abb. 10: Erdwärmesondenkopf von EWS 9 (Aufnahme vom 6.02.2017)

Messung vom 2.03.2017: EWS 11



Abb. 11: Auf dem Erdwärmesondenkopf von EWS 11 war ein Container mit Spülflüssigkeit gestellt (Aufnahme vom 2.03.2017)



Abb. 12: Erdwärmesondenkopf von EWS 11. Zugänglich war nur eines der Sondenrohre das mit einem Adapterverschluss geschützt war; die anderen drei Sondenrohre waren unter den Container gebogen. Die Messung wurde daher in einem anderen Sondenrohr als in der vorangegangenen Messung vom 9.01.2017 durchgeführt.

Messung vom 2.03.2017: EWS 8



Abb. 13: Erdwärmesondenkopf von EWS 8 (Aufnahme vom 2.03.2017)



Abb. 14: Detailaufnahme des Erdwärmesondenkopfes von EWS 8. Die Sondenrohre sind durch Klebeband geschützt, rechts davon sind zwei Verpressschläuche zu sehen.

Messung vom 3.03.2017: EWS 7



Abb. 15: Übersicht der Messung von EWS 7 (Aufnahme vom 3.03.2017)



Abb. 16: Detailaufnahme des Erdwärmesondenkopfes von EWS 7. Die Sondenrohre sind durch Klebeband geschützt.

Messung vom 3.03.2017: EWS 6

Abb. 17: Übersicht der Messung von EWS 6 (Aufnahme vom 3.03.2017)

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

Das Projekt wurde vom BFE als Testfeld zur Überprüfung der Hinterfüllungsqualität in Regionen mit starker Grundwasserführung ausgewählt.

Vom 9.01. bis 3.03.2017 wurden mit dem faseroptischen Messsystem in insgesamt sechs Erdwärmesonden des Bauprojektes sieben Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden Kurz-EGRTs durchgeführt, die aufgrund kürzerer Aufheizdauer und damit geringerer Eindringtiefen als beim regulären EGRT die thermischen Parameter der Bohrung (Sondenrohre und Hinterfüllung) bestimmen. Über diese Ergebnisse können Aussagen zur Qualität der Hinterfüllungsarten und -methoden getroffen werden.

Die Temperaturentwicklung im Glasfaserkabel wurde während der gesamten Dauer des Tests quasikontinuierlich (Abtast-/Mittelungsrate ca. 1,1 min) aufgezeichnet.

Eine Übersicht der untersuchten Erdwärmesonden befindet sich auf dem Lageplan in Abbildung A1 des Anhangs.

Ergebnisse EGRT der Erdwärmesonde EWS 10 vom Dezember 2015 hinsichtlich des Untergrunds

In Abbildung A2a 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 u. OKT
- 35 bis 41 m u. OKT
- 45 bis 100 m u. OKT

zeigen erhöhte Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die auf zusätzlichen konvektiven Wärmetransport (Grundwassereinfluss) schliessen lassen. Aufgrund der aktuellen Fragestellung dieses Berichts wurde neu eine Pécletzahlanalyse (siehe Kapitel 4) mit den Daten durchgeführt. Dazu wurden die konduktiv-konvektiven Wärmeleitfähigkeiten mit einem - für Grundwassereinfluss sensitiveren – Zeitbereich neu bestimmt. Für die benötigten rein konduktiven Wärmeleitfähigkeiten entlang der Bohrung wurde ein fester Wert von 3 W/m/K angenommen und die Darcy-Geschwindigkeiten wurden nach der angegebenen Gleichung berechnet. Diese Ergebnisse sind in Abbildung A2b gezeigt. Dort sind mehrere, unterschiedlich stark grundwasserbeeinflusste Bereiche erkennbar. Von der Lage und Ausdehnung mit den Erkenntnissen des EGRTs vergleichbar, aber zusätzlich mit einer quantitativen Bewertung versehen. Die höchsten Geschwindigkeiten von über 1 m/Tag werden zwischen 35 und 40 m u. OKT angetroffen. Es muss bemerkt werden, dass aufgrund des experimentellen Charakters dieser Untersuchungsmethode und der Unsicherheit in der Annahme von Eingangsparametern (rein konduktive Wärmeleitfähigkeit und charakteristische Länge) die Ergebnisse in ihrer Höhe nicht gesichert sind, jedoch geben sie wertvolle Informativen über die Verteilung der Geschwindigkeiten entlang der Bohrung. Auch macht

die Pécletzahlanalyse nur Aussagen über den Geschwindigkeitsbetrag, nicht aber über die Richtung (lateral, vertikal).

Geologie entlang der Erdwärmesonde EWS 10

Die Geologie am Ort der Erdwärmesonde EWS 10 lässt sich grob zu einem 2- bzw. 3-Schichten Fall vereinfachen: Bis in 48 m u. OKT sandige, kiesige Lockergesteine und darunter Festgestein, eventuell befindet sich als dritte Schicht zwischen 22 und 35 m u. OKT ein Grundwasserstauer, denn in der Geologie sind tonige Anteile angegeben. Ebenfalls ist dieser Bereich in den Ergebnissen des EGRT hinsichtlich Grundwasserströmung unauffällig.

Wasserzutritte während der Bohrung von Erdwärmesonde EWS 10 laut Angaben des Bohrmeisters

- Leichte im Lockergestein zwischen 38 und 40 m
- Starke im Felsgestein v.a. zwischen 100 und 106 m. Zutritt hält bis zum Ende der Bohrung an, eine Identifikation weiterer wasserführender Schichten war nicht möglich. Grobe Abschätzung der Zutrittsmenge anhand der Angaben des Bohrmeistes: ca. 170 L/min.
- Wasserspiegel am 17.12.2015: ca. 10,8 m u. OKT

Fragestellung

Trotz all dieser Informationen lassen sich keine verbindlichen Aussagen zu Anzahl und Verbindungen bzw. Trennung von Grundwasserleitern treffen. Möglichweise könnten Wasserproben, gewonnen aus verschiedenen Tiefen, weitere Hinweise geben. Aktuell nicht auszuschliessen sind bis zu drei, unterschiedlich stark voneinander getrennte 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 über 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 die AfU 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 zum Einsatz (Siehe Tabelle 1).

Die folgende Auswertung der Messungen hat das Ziel, Aussagen über die Qualität und Dichtigkeit der Hinterfüllungen zu ermöglichen.

Ungestörte Ausgangstemperaturen

Zu Beginn jeder Heat-Pulse Messung wurde die bestehende Temperaturverteilung in der jeweiligen Bohrung über einen Zeitraum von mindestens 15 Minuten erfasst. Die Bodentemperaturen vor Beginn des Heizens der untersuchten Erdwärmesonden sind in Abhängigkeit der Tiefe in den Abbildungen A3a bis A8a (siehe Anhang) dargestellt. In Abbildung A9 sind alle Ausgangstemperaturen in einer Graphik abgebildet. 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.

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, worauf bei den Einzelmessungen eingegangen wird.

Heat-Pulse Messungen (Kurz-EGRT)

Die Aufheizungen der Kurz-EGRTs dauerten jeweils mindestens 1,5 Stunden, danach wurde jeweils für mindestens eine halbe Stunde der anschliessende Wiederangleich aufgezeichnet. Den Erdwärmesonden wurde durch einen Leistungssteller kontrolliert jedes Mal eine konstante Heizleistung zugeführt.

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 den Kurz-EGRTs werden die Temperaturen des zeitlichen Nahfeldes ausgewertet. Während dieses kurzen Zeitraumes wird die Temperaturentwicklung von einem integralen Verhalten der thermischen Eigenschaften der Sondenrohre, Rohrinhalts (hier Wasser), Verfüllmaterials und je nach Geometrie, bzw. Lage des Hybridkabels u. U. auch schon teilweise des angrenzenden Erdreichs bestimmt. Diese so berechneten Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes werden im folgenden Bohrlocheigenschaft genannt. In Abbildung A10 sind alle bestimmten Bohrlocheigenschaft in einer Graphik abgebildet.

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

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. Die Ausgangstemperaturen beider Messungen sind in Abbildung A3a dargestellt

Am 26.12.2015 um 17:23 Uhr wurde mit der Aufheizung der in das Kabel integrierten Kupferleiter begonnen. Die Aufheizung endete am 30.12.2015 um 05:23 Uhr. Die Stromversorgung zur Durchführung der Aufheizmessungen wurde bauseits gestellt. Über einen Zeitraum von 84 Stunden wurde dem Boden eine konstante Heizleistung von 25,97 W/m zugeführt. Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A3b 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 und liegt in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Pécletzahlanalyse.

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 A3c die Temperaturprofile von drei verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs abgebildet (2 min, 17 min und 85 min nach Heizbeginn).

Die Temperaturen in Abbildung A3a stellen im oberen Bereich, bis in 10 m u. OKT, den normalen, der Jahreszeit entsprechenden Temperatur-Tiefenverlauf dar. Weiter, bis in eine Tiefe von etwa 40 m u. OKT nehmen die Temperaturen ab, um dann über einen grösseren Tiefenbereich bis in etwa 65 m Tiefe bei annähernd konstanten Temperaturen von 12 °C (12,2 °C) zu verharren. Anschliessend steigen die Temperaturen kontinuierlich bis zum Bohrlochtiefsten an, wo 16 °C (15,7 °C) erreicht werden. Die Temperaturen steigen zuerst nur gering, ab einer Tiefe von 110 m u. OKT stärker und es zeichnet sich von dort bis zum Bohrlochtiefsten ein konstanter thermischer Gradient von 0,036 K/m (0,030 K/m) ab. Vergleicht man beide Messungen, so sind geringe Unterschiede zwischen beiden Temperaturprofilen festzustellen. Vermutlich war bei der ersten Messung im Dezember 2015 die Bohrung noch nicht im thermischen Gleichgewicht (Imlochhammer-Bohrverfahren).

Die Bohrlocheigenschaften beider Messungen sind in Abbildung A3d 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. 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 deuten. In diesem ausgedehnten Tiefenbereich zeigen auch die Temperaturen in Abbildung A3c zwischen 17 und 85 Minuten nach Heizbeginn nur eine geringe Veränderung.

Diese Erdwärmesonde wurde ebenfalls zweimal gemessen. Das Hybridkabel der Messung wurde jeweils in eines der Sondenrohre bis eine Tiefe von knapp 170 m u. OKT eingebracht und nach Ende der Messung wieder entfernt. Die Messungen fanden am 9.01.2017 (18 W/m) und am 2.03.2017 (16,89 W/m) statt. Die Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens sind in Abbildung A4a dargestellt.

Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung A4b die Temperaturprofile von drei verschiedenen Phasen des Aufheizvorgangs der Messung vom 2.03. abgebildet (2 min, 15 min und 90 min nach Heizbeginn).

In Abbildung A4a sind die Temperaturen im oberen Bereich bis 15 m u. OKT aufgrund des Jahresganges und den getrennten Zeitpunkten zu denen die Messung durchgeführt wurden, verschieden. Die erste Messung kurz nach Fertigstellung der Erdwärmesonde zeigt zwischen 37 und 48 m Tiefe eine lokale Temperaturerhöhung, die vermutlich von Spülflüssigkeit, die in das der Bohrung angrenzende Gestein eingedrungen war, verursacht wurde.

Die Bohrlocheigenschaften, die bei den Messungen bestimmt wurden, sind in Abbildung A4c 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. Auch zeigen die Temperaturen in Abbildung A4b eine gleichmässige, parallele Aufheizung. Grössere Anomalien sind in beiden Abbildungen nicht zu erkennen. Geringe Unterschiede der Bohrlocheigenschaften in Abbildung A4c rühren teilweise daher, dass verschiedene Rohre der EWS gemessen wurden (Siehe Abb. 7 und 12). 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.

EWS 9

Diese Erdwärmesonde wurde am 6.2.2017 mit einer Heizleistung von 18 W/m gemessen. Dazu wurde das Hybridkabel in ein Sondenrohr bis eine Tiefe von knapp 170 m u. OKT eingebracht und nach Ende der Messung wieder entfernt. Die Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens sind in Abbildung A5a dargestellt, die Bohrlocheigenschaften in Abbildung A5b. Der Mittelwert der Bohrlocheigenschaft beträgt $1,26 \pm 0,27$ W/m/K,

Die Ausgangstemperaturen sind vergleichbar mit den bisherigen, sind aber ab einer Tiefe von 10 m u. OKT „unruhig“. Dies deutet in diesem Fall auf eine noch nicht vollständig an den ungestörten Zustand angegliche Bohrung. Der Grund ist der Prozess der Bohrung selber (Zirkulieren und Eindringen der Spülflüssigkeit in permeable Schichten). Ansonsten ist das Temperatur-Tiefenprofil aber unauffällig.

Ebenso die Bohrlocheigenschaft, im wichtigen Bereich bis zum Beginn des Festgesteins in etwa 50 m Tiefe ist diese bemerkenswert glatt. Dies liegt sicherlich auch an dem HDPE-Rohr, das bis in diese Tiefe eingebracht wurde und zu einem sehr guten Schutz des Hinterfüllmaterials in diesem Rohr führt. 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 in den Abbildungen A5a und A5b 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

EWS 8 wurde am 2.03.2017 mit einer Heizleistung von 16,52 W/m gemessen. Dazu wurde das Hybridkabel in ein Sondenrohr bis eine Tiefe von knapp 170 m u. OKT eingebracht und nach Ende der Messung wieder entfernt. Die Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens sind in Abbildung A6a dargestellt, die Bohrlocheigenschaften in Abbildung A6b. Der Mittelwert der Bohrlocheigenschaft beträgt $1,02 \pm 0,15$ W/m/K,

Die Ausgangstemperaturen sind vergleichbar mit den bisherigen, sind aber ab einer Tiefe von 10 m u. OKT „unruhig“. Dies deutet in diesem Fall auf eine noch nicht vollständig an den ungestörten Zustand angegliche Bohrung. Der Grund ist der Prozess der Bohrung selber (Zirkulieren und Eindringen der Spülflüssigkeit in permeable Schichten). Zusätzlich befindet sich im Bereich von 40 bis 50 m u. OKT eine positive Anomalie ähnlich wie im Temperaturprofil von EWS 11 bei der Messung vom 9.01.2017 (Abb. A4a). Diese ist vermutlich ebenfalls von Spülflüssigkeit, die in das der Bohrung angrenzende Gestein eingedrungen war, verursacht.

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

Am 3.03.2017 wurde diese Erdwärmesonde mit einer Heizleistung von 16,95 W/m gemessen. Dazu wurde das Hybridkabel in ein Sondenrohr bis eine Tiefe von knapp 170 m u. OKT eingebracht und nach Ende der Messung wieder entfernt. Die Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens sind in Abbildung A7a dargestellt, die Bohrlocheigenschaften in Abbildung A7b. Der Mittelwert der Bohrlocheigenschaft beträgt $1,05 \pm 0,23$ W/m/K,

Die Ausgangstemperaturen sind vergleichbar mit den bisherigen, sind aber ab einer Tiefe von 10 m u. OKT „unruhig“. Dies deutet in diesem Fall auf eine noch nicht vollständig an den ungestörten Zustand angegliche Bohrung.

Die Bohrlocheigenschaft ist bis in 47 m Tiefe der Erdwärmesonde im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Von 47 bis etwa 110 m u. OKT sind tendenziell leicht höhere Werte erkennbar, die aber noch nicht als Anomalie¹ gelten. Unterhalb davon bis zum Ende

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

der Messstecke treten wieder, wie im oberen Teil, konstante Werte auf. Diese Erdwärmesonde wurde bis etwa 55 m Tiefe mit einem Gewebestrumpf versehen. 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.

EWS 6

Diese Erdwärmesonde wurde am 3.03.2017 mit einer Heizleistung von 16,87 W/m gemessen. Dazu wurde das Hybridkabel in ein Sondenrohr bis eine Tiefe von knapp 170 m u. OKT eingebracht und nach Ende der Messung wieder entfernt. Die Ausgangstemperaturen vor Beginn des Heizens sind in Abbildung A8a dargestellt, die Bohrlocheigenschaften in Abbildung A8b. Der Mittelwert der Bohrlocheigenschaft beträgt $1,06 \pm 0,19$ W/m/K,

Die Ausgangstemperaturen sind vergleichbar mit den bisherigen. Ab einer Tiefe von 19 m u. OKT „unruhig“, was auf eine noch nicht vollständig an den ungestörten Zustand angegliche Bohrung hindeutet.

Die Bohrlocheigenschaft ist bis in 47 m Tiefe der Erdwärmesonde im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Von 47 bis etwa 80 m u. OKT sind tendenziell leicht höhere Werte erkennbar, die aber noch nicht als Anomalie gelten. Unterhalb davon bis zum Ende der Messstecke treten wieder, wie im oberen Teil, konstante Werte auf. Es sind bei der Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes keine Fehlstellen in der Hinterfüllung erkennbar. Es wurde wie in EWS 7 ein Gewebestrumpf bis zum Beginn des Festgesteins eingebracht. Auch hier ist kein Einfluss von Grundwasserströmung innerhalb der Bohrung erkennbar, was auf eine gute Anpassung des flexiblen Gewebestrumpfes an den Bohrlochrand hindeutet.

Zusammenfassung der Ergebnisse

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.

Karlsruhe, den 7. April 2017

GTC Kappelmeyer GmbH



Philipp Heidinger

8. Literaturhinweise

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

9. Anhang

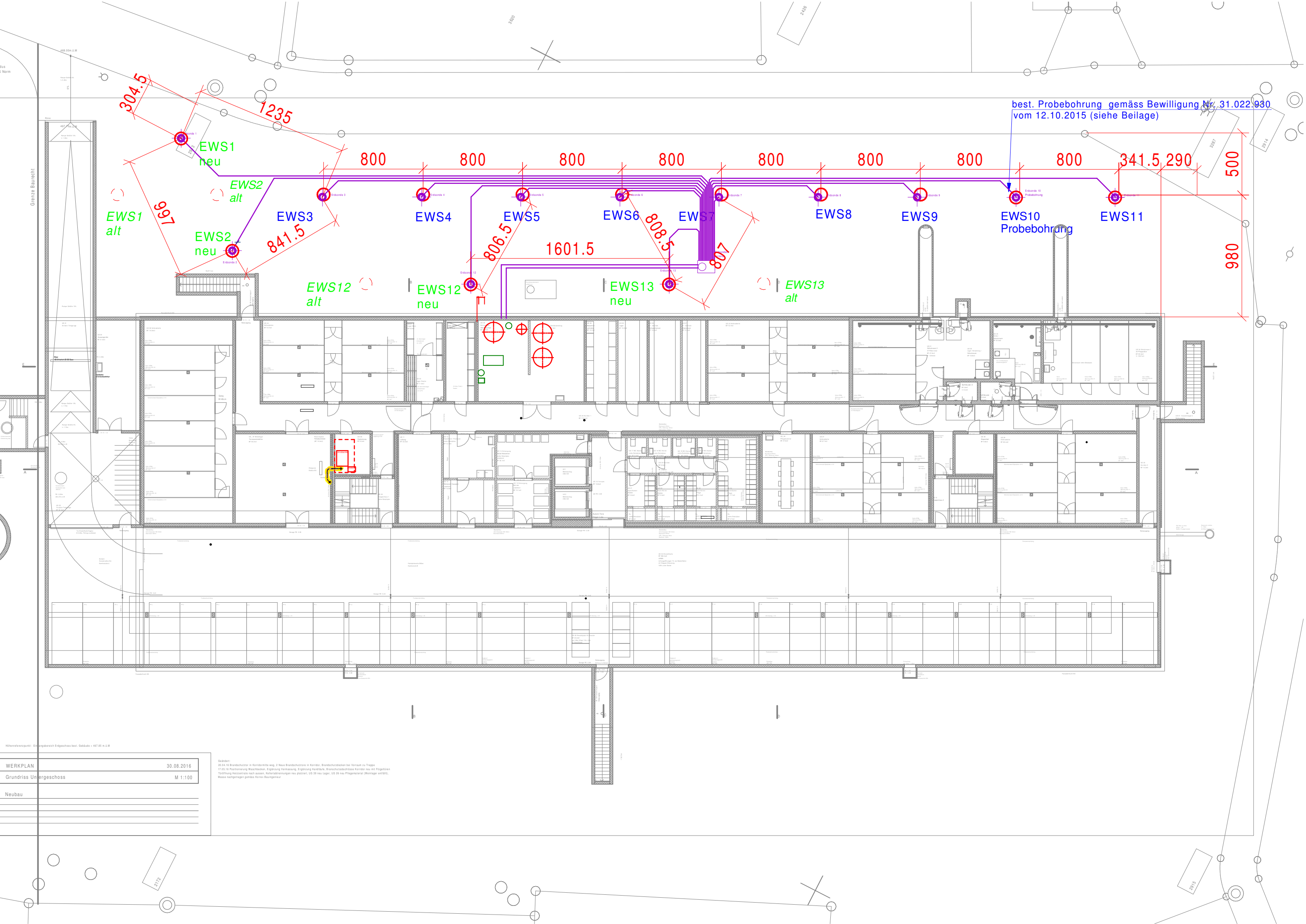


Table with 2 columns: Description and Date/Scale. Row 1: WERKPLAN, 30.08.2016. Row 2: Grundriss Untergeschoss, M 1:100. Row 3: Neubau.

Geändert: 20.04.16 Brandschutz in Korridore mit 2 neue Brandschutztüren in Korridor, Brandschutzdecken bei Vorraum zu Treppe 17.05.16 Installation Wärmepumpe, Ergänzung Verkleidung, Ergänzung Wandfläche, Brandschutzdecken in Korridor neu an Pfeilspitze, Türöffnung Heizzentrale nach aussen, Kellerabstimmungen neu platziert, US 39 neu Lager, US 26 neu Pflegematerial (Weinlager entfernt), Massiv hochgezogenes gemäss Korridor Baugemäss.

Abbildung A2a

BFE Projekt: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil mit Geologie

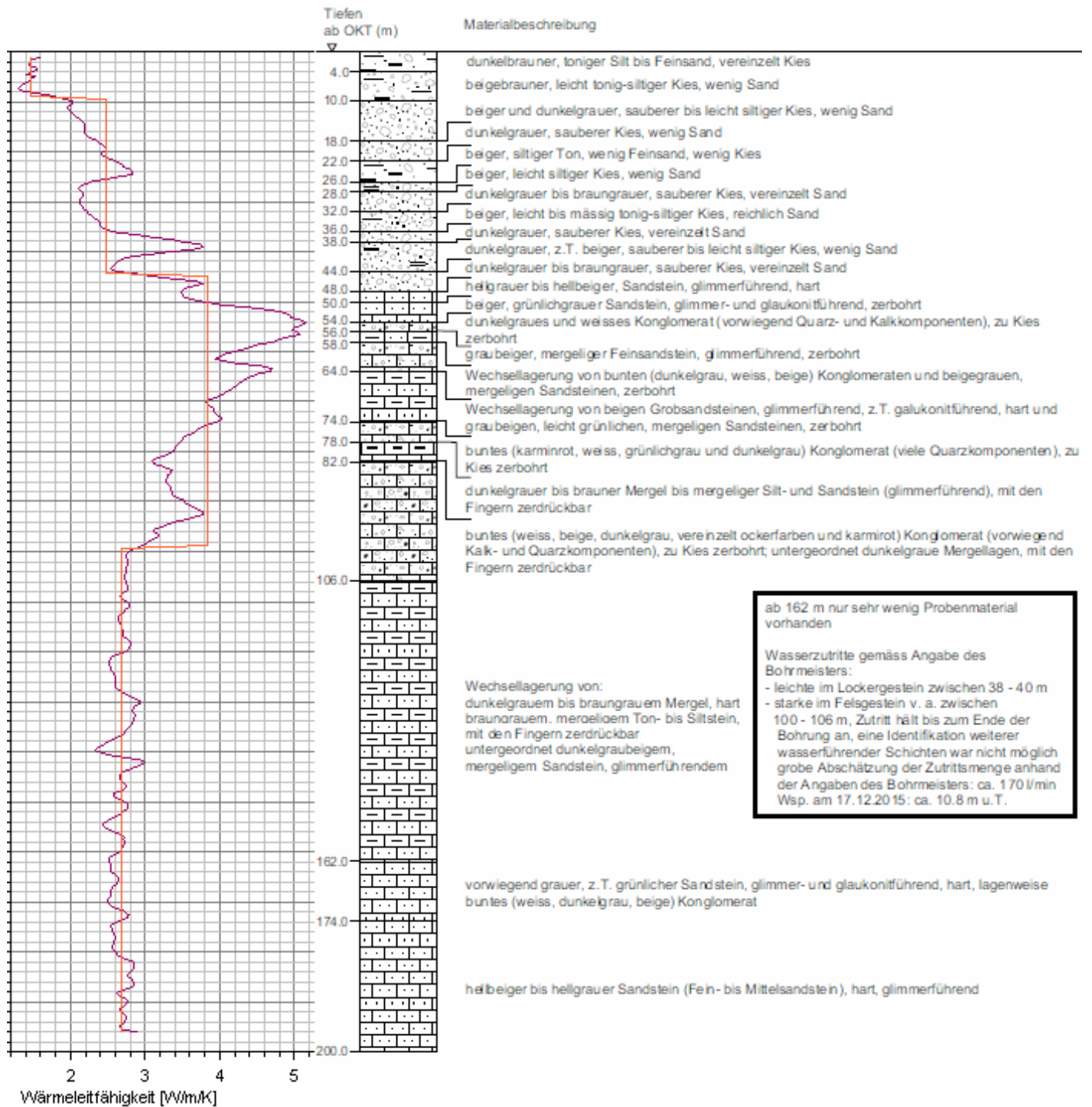


Abbildung A2b

Projekt BFE 2017

EWS 10: Darcy Geschwindigkeit

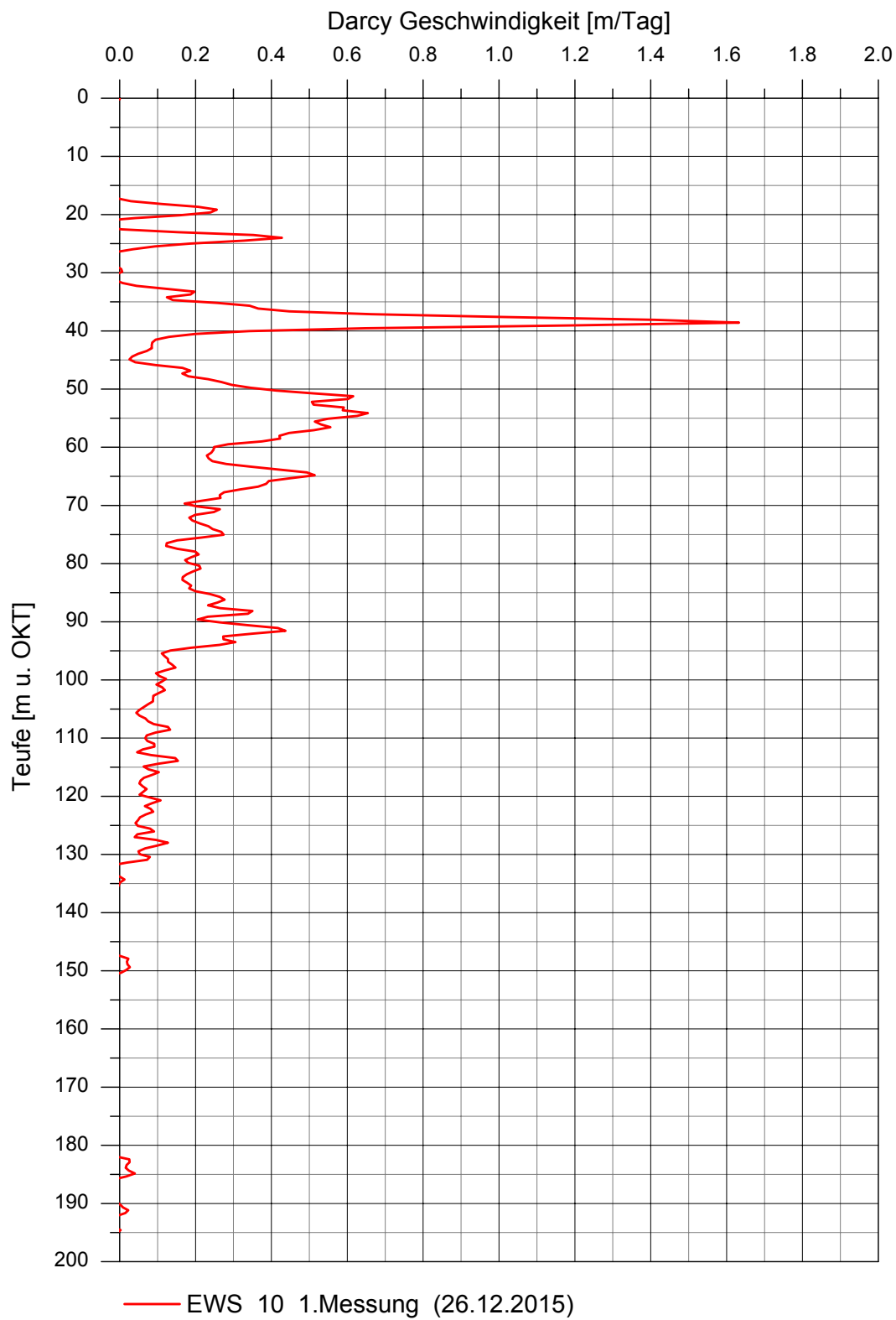


Abbildung A3a

Projekt BFE 2017

EWS 10: Ungestörte Temperaturprofile vor Heizbeginn



Abbildung A3b

Projekt BFE 2017

EWS 10: Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens

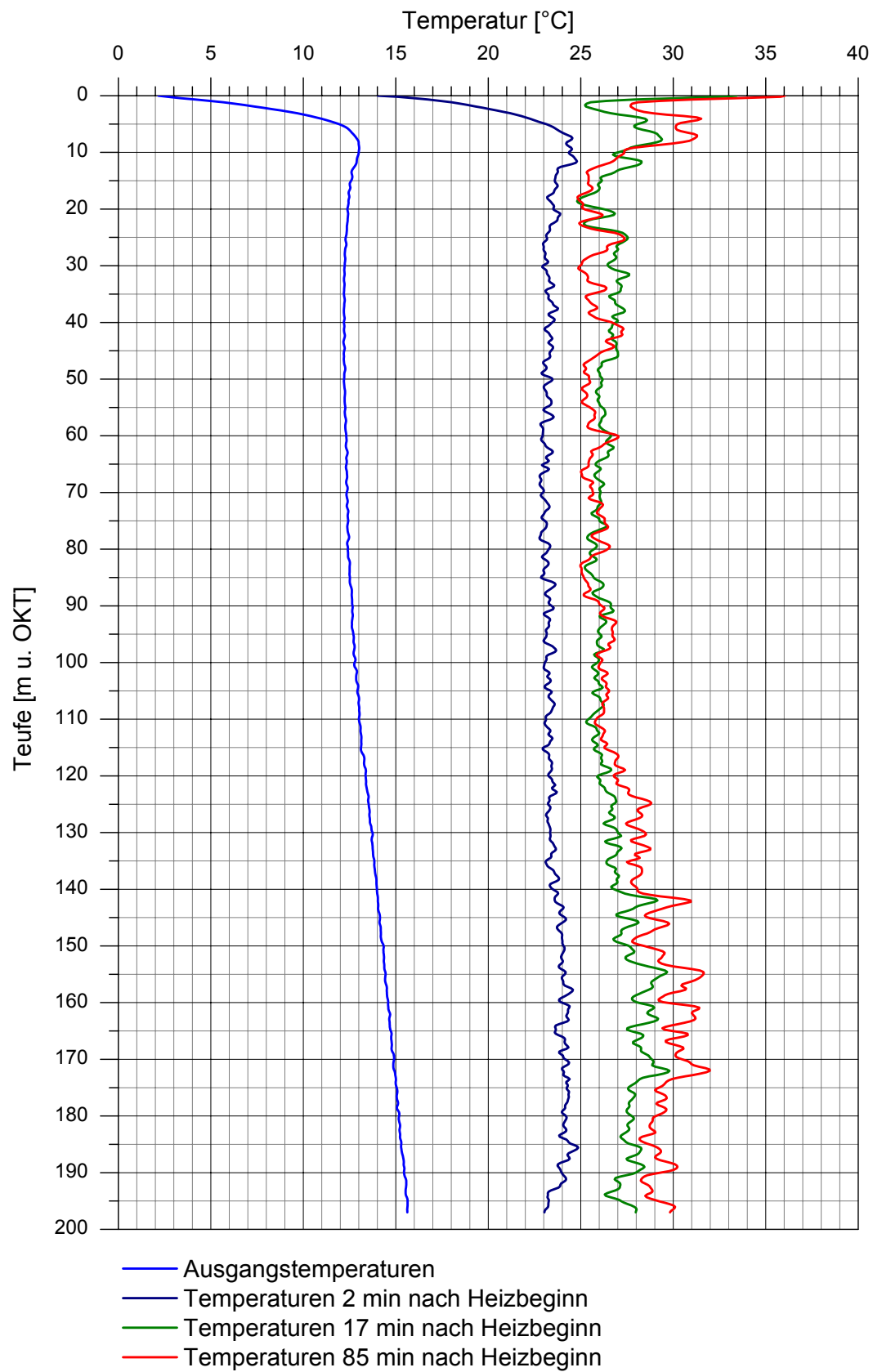


Abbildung A3c

Projekt BFE 2017

EWS 10: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

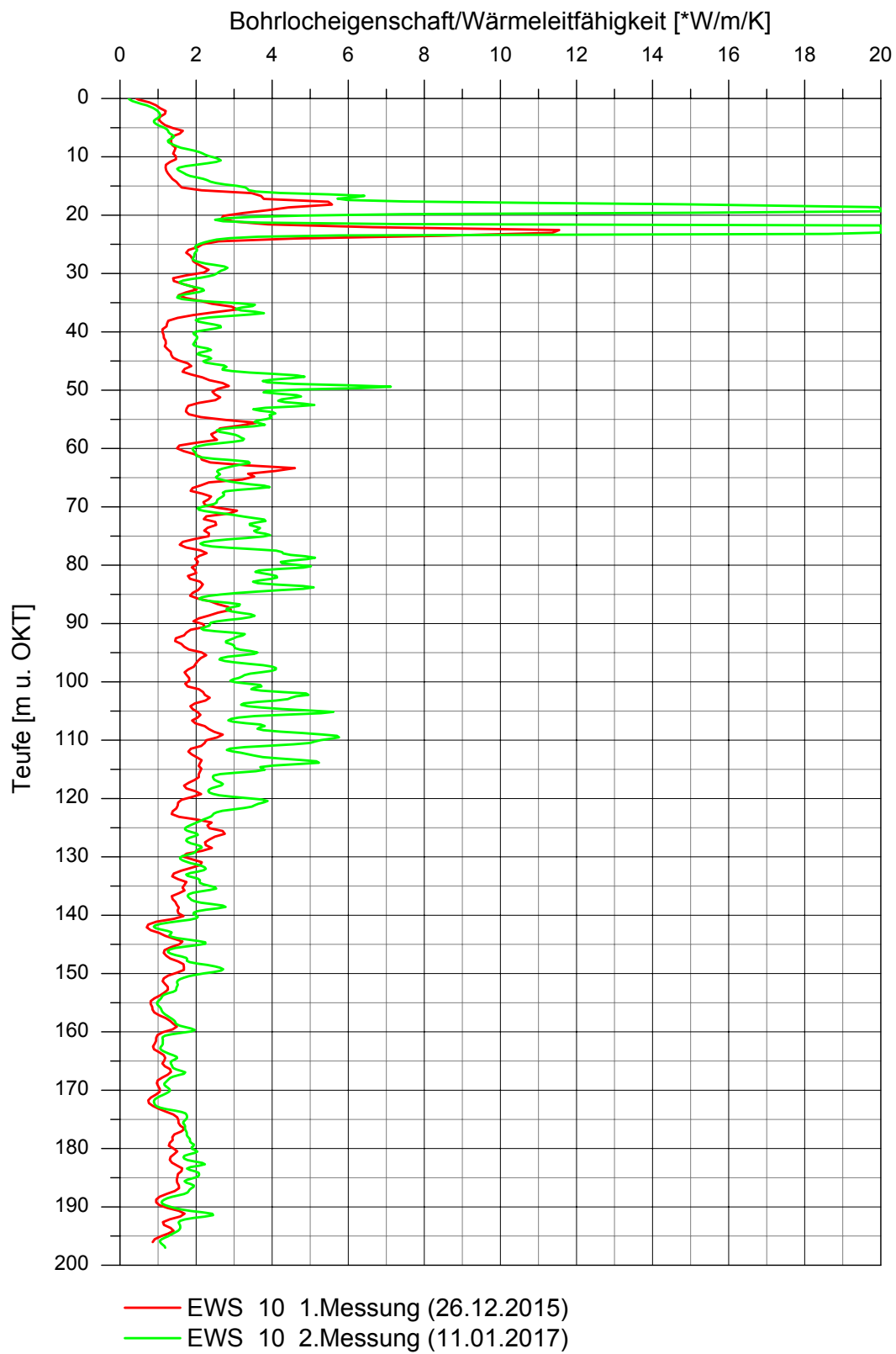


Abbildung A4a

Projekt BFE 2017

EWS 11: Ungestörte Temperaturprofile vor Heizbeginn



Abbildung A4b

Projekt BFE 2017

EWS 11: Ausgewählte Temperaturprofile während des Heizens

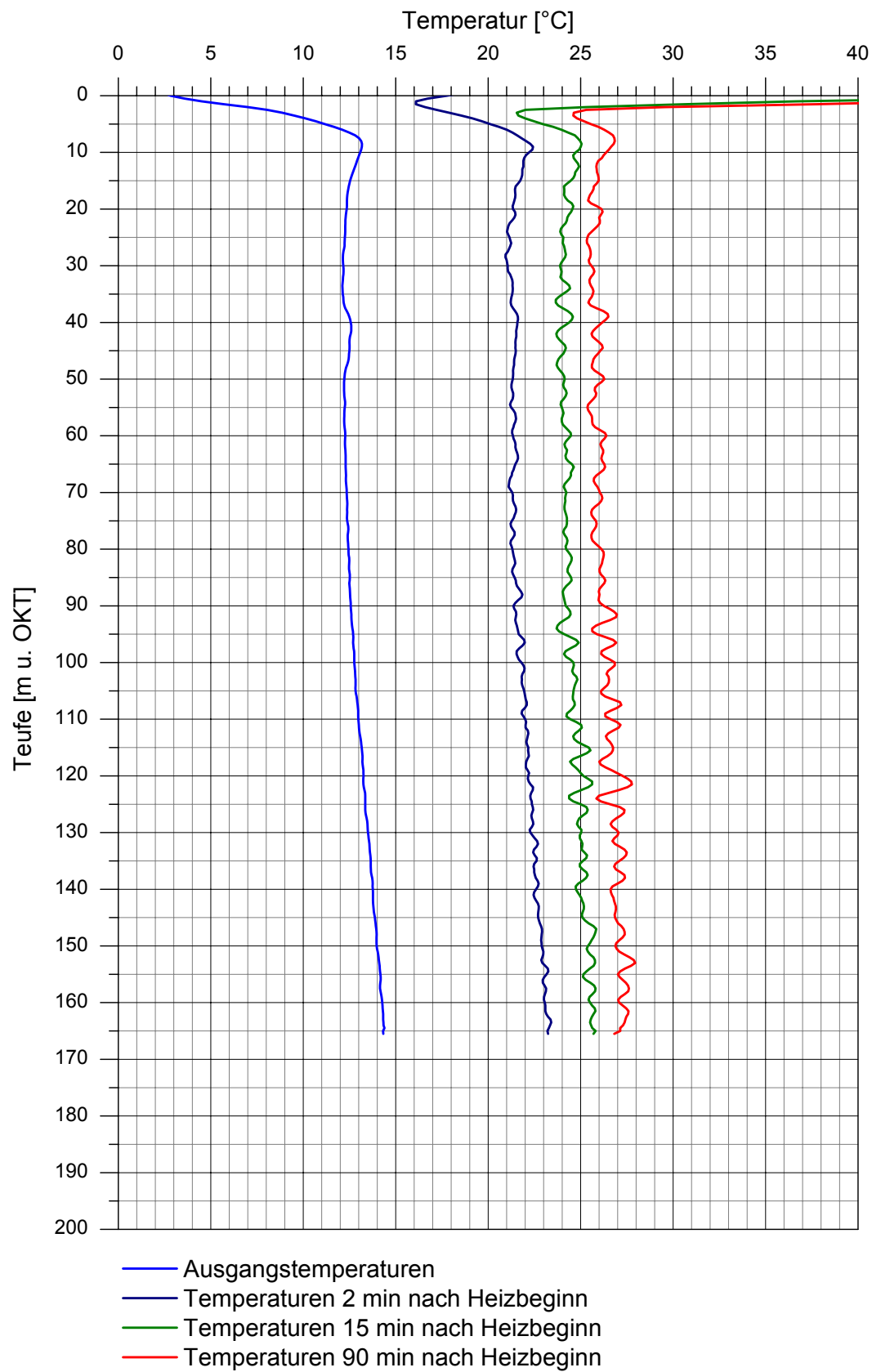


Abbildung A4c

Projekt BFE 2017

EWS 11: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

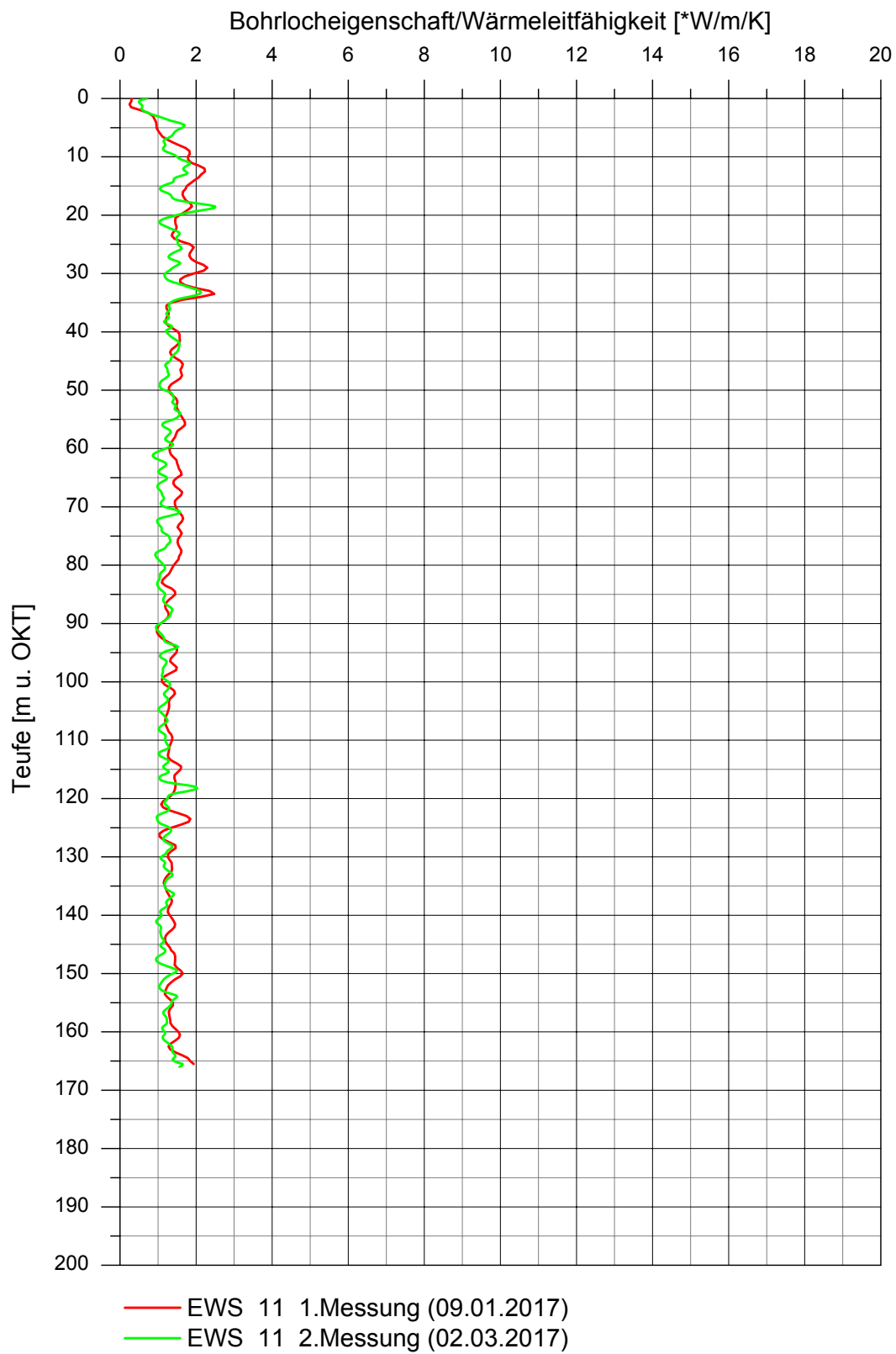


Abbildung A5a

Projekt BFE 2017

EWS 09: Ungestörtes Temperaturprofil vor Heizbeginn

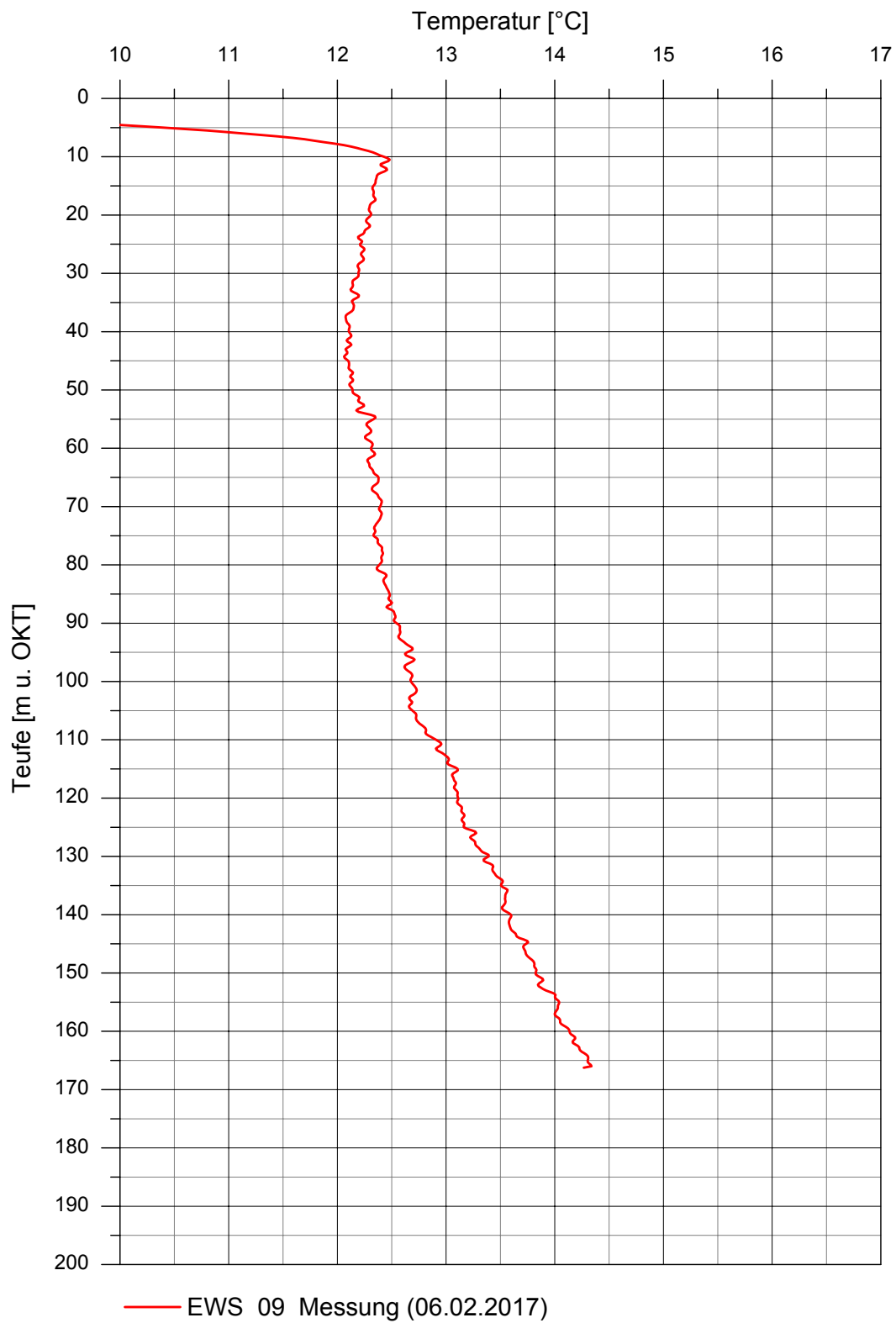


Abbildung A5b

Projekt BFE 2017

EWS 09: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

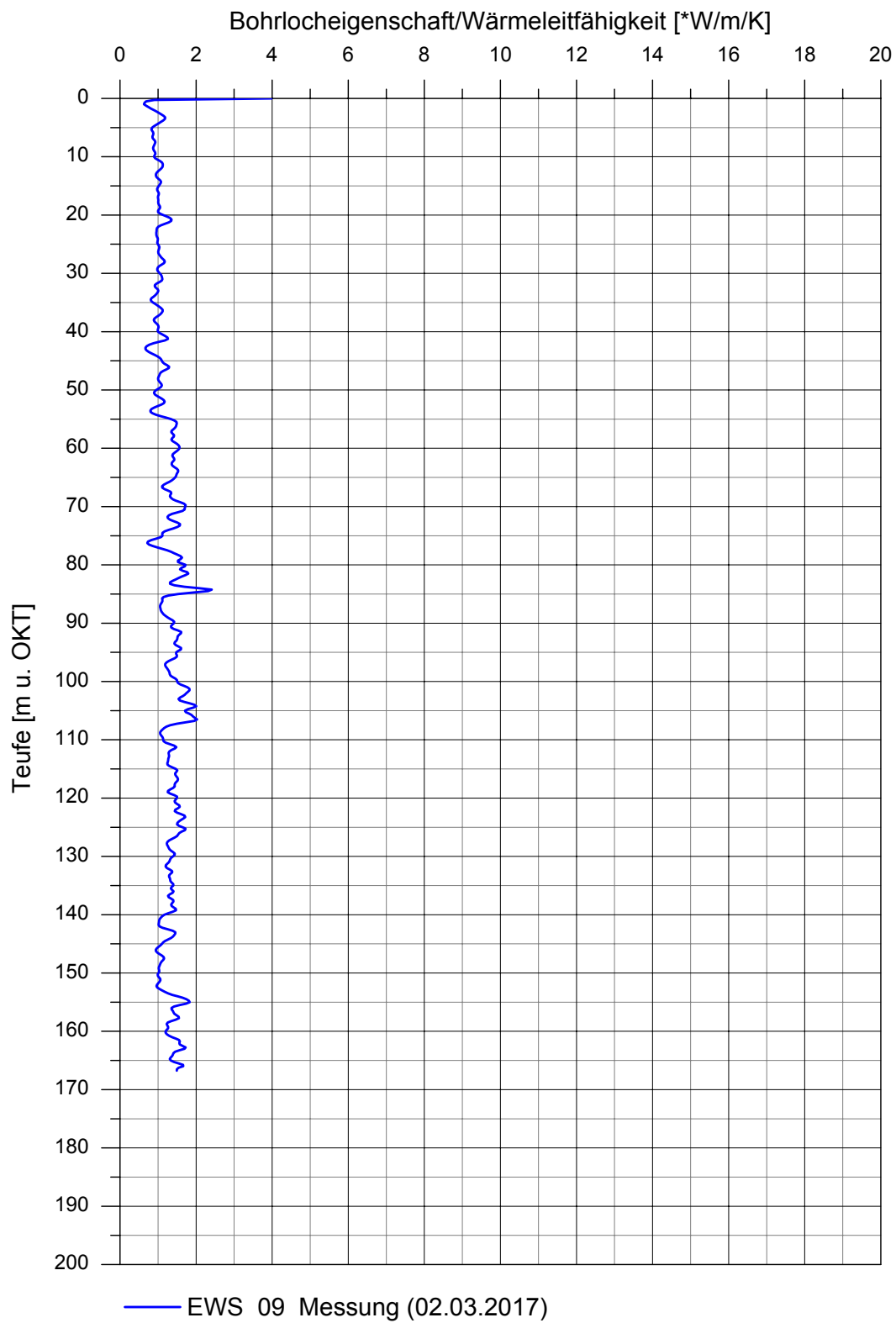


Abbildung A6a

Projekt BFE 2017

EWS 08: Ungestörtes Temperaturprofil vor Heizbeginn

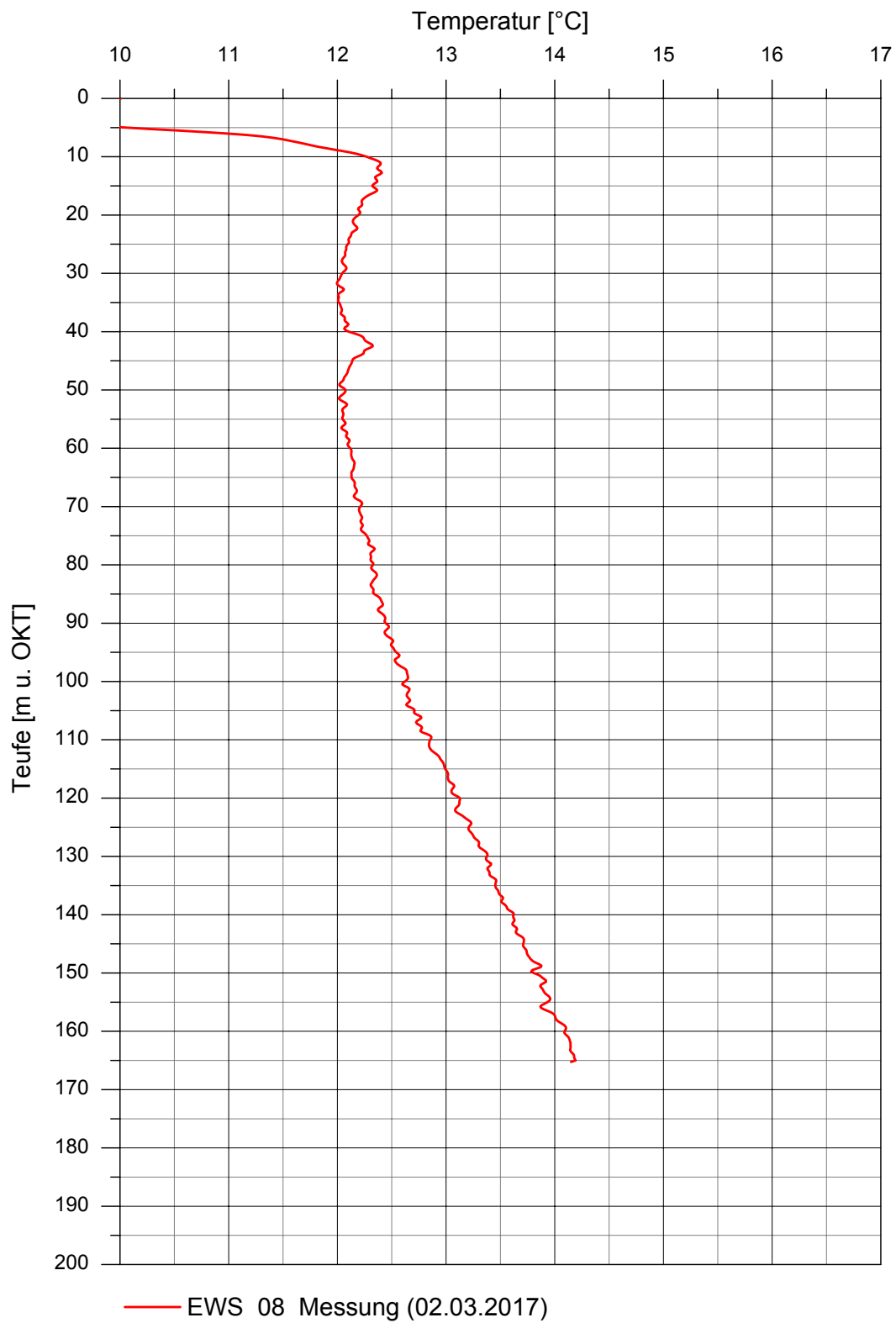


Abbildung A6b

Projekt BFE 2017

EWS 08: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

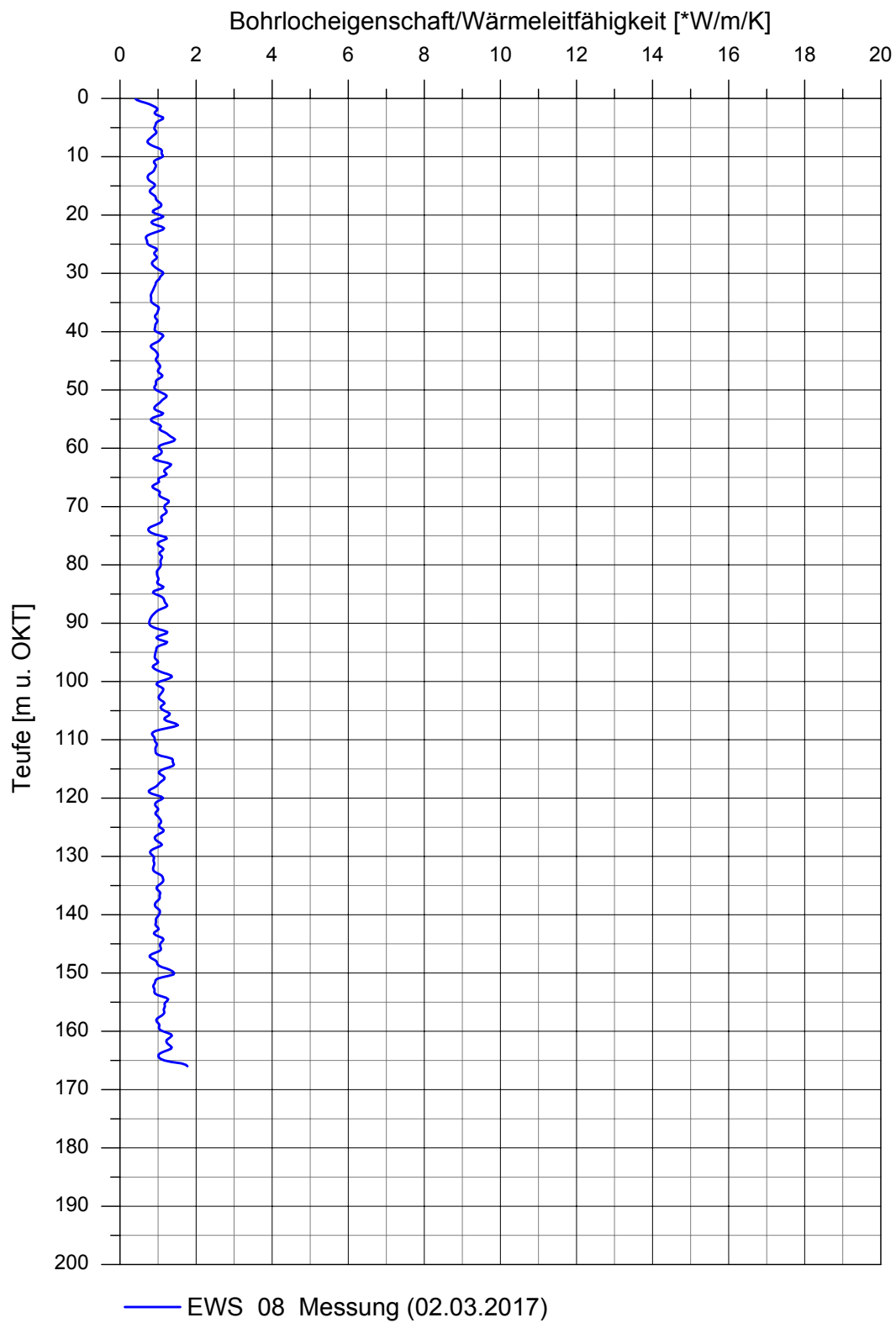


Abbildung A7a

Projekt BFE 2017

EWS 07: Ungestörtes Temperaturprofil vor Heizbeginn

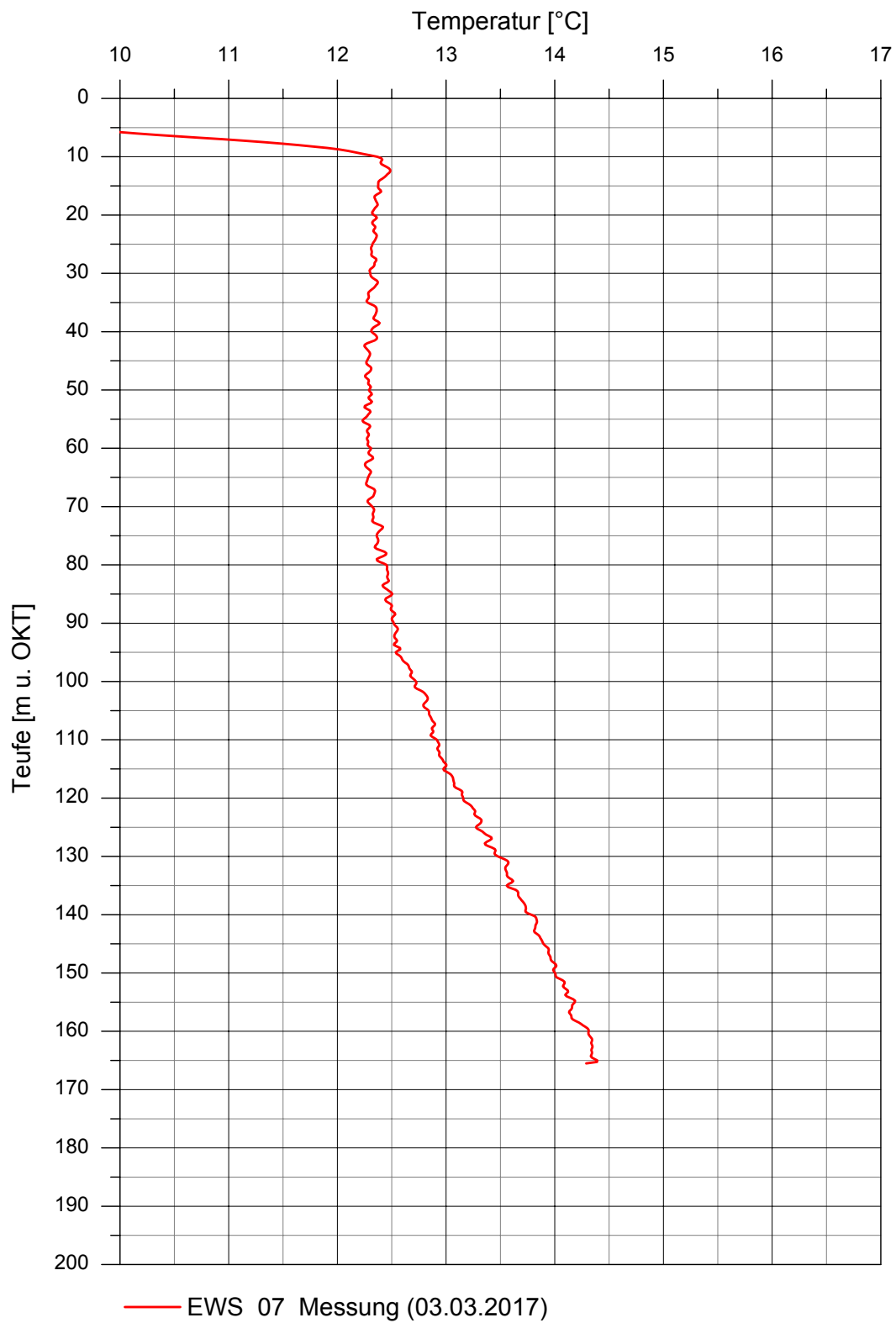


Abbildung A7b

Projekt BFE 2017

EWS 07: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

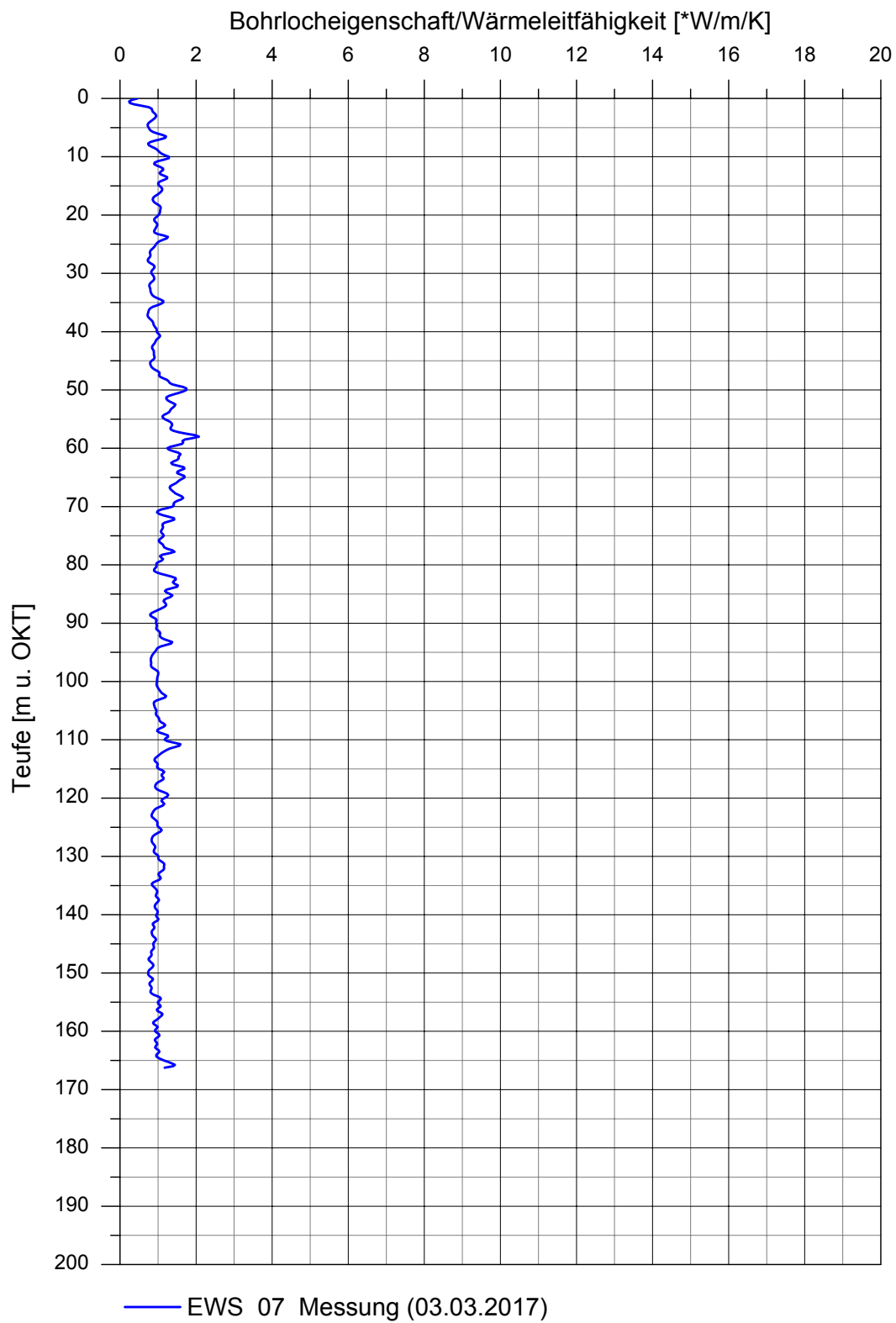


Abbildung A8a

Projekt BFE 2017

EWS 06: Ungestörtes Temperaturprofil vor Heizbeginn

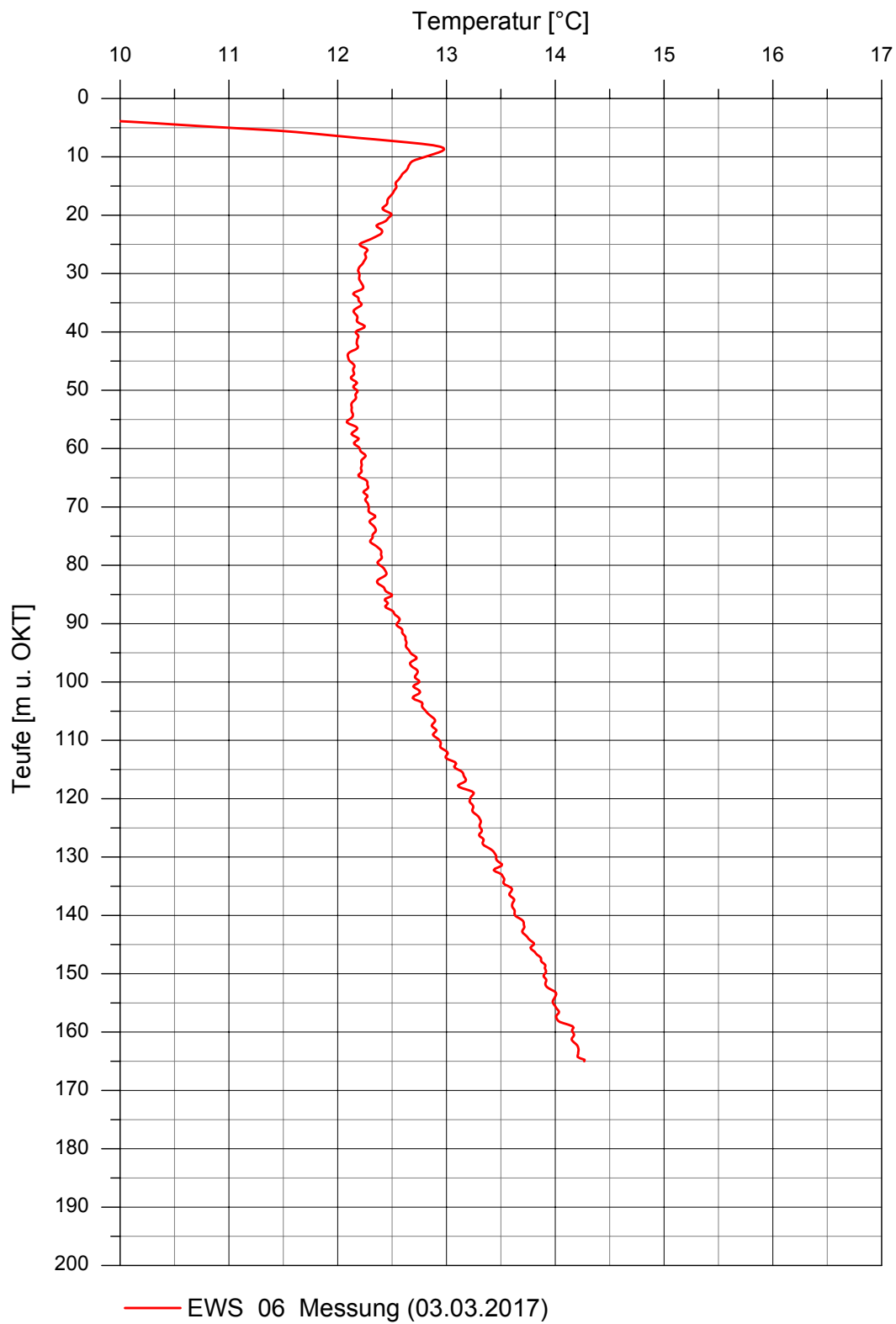


Abbildung A8b

Projekt BFE 2017

EWS 06: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

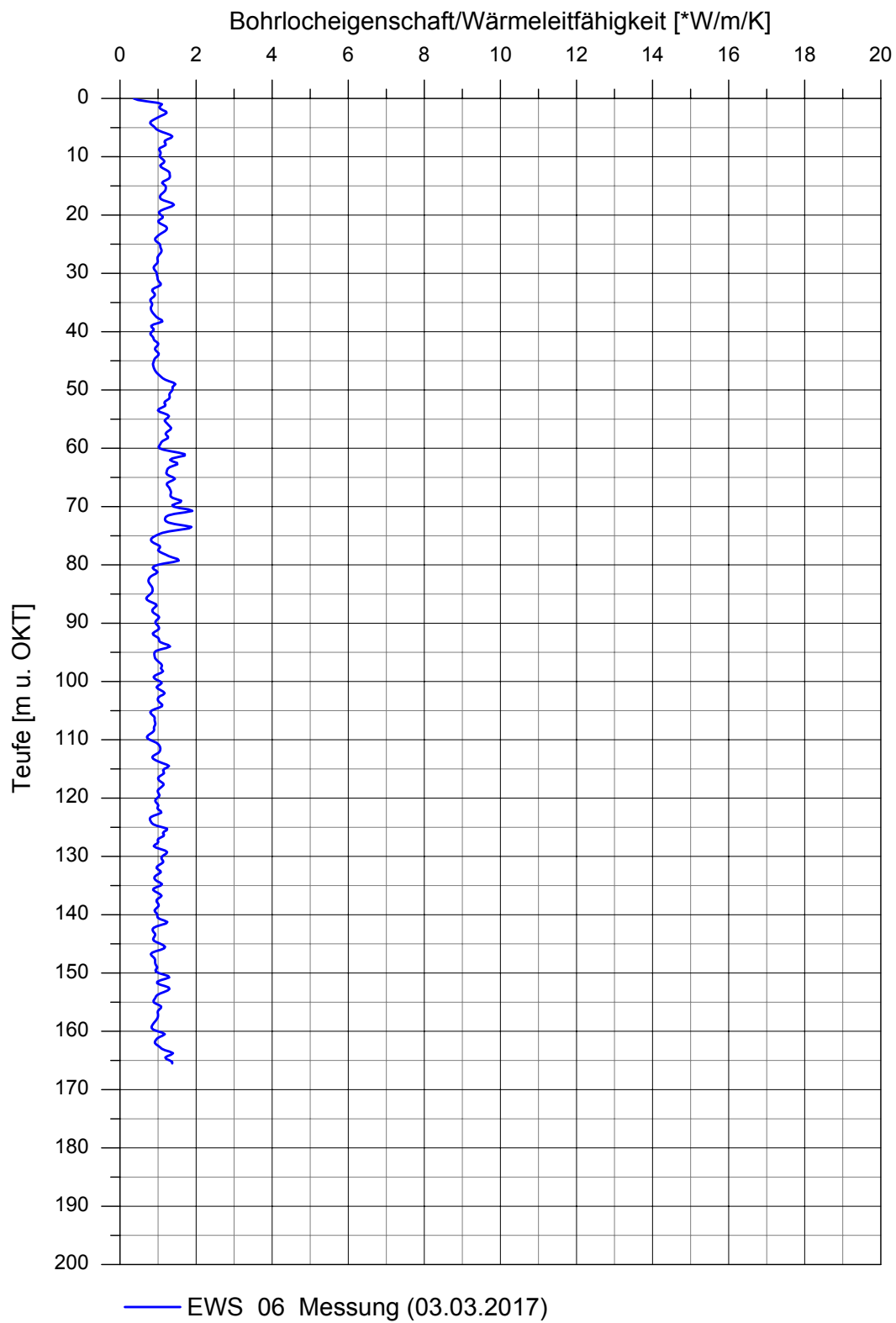


Abbildung A9

Projekt BFE 2017

EWS 06 bis 11: Ungestörte Temperaturprofile vor Heizbeginn

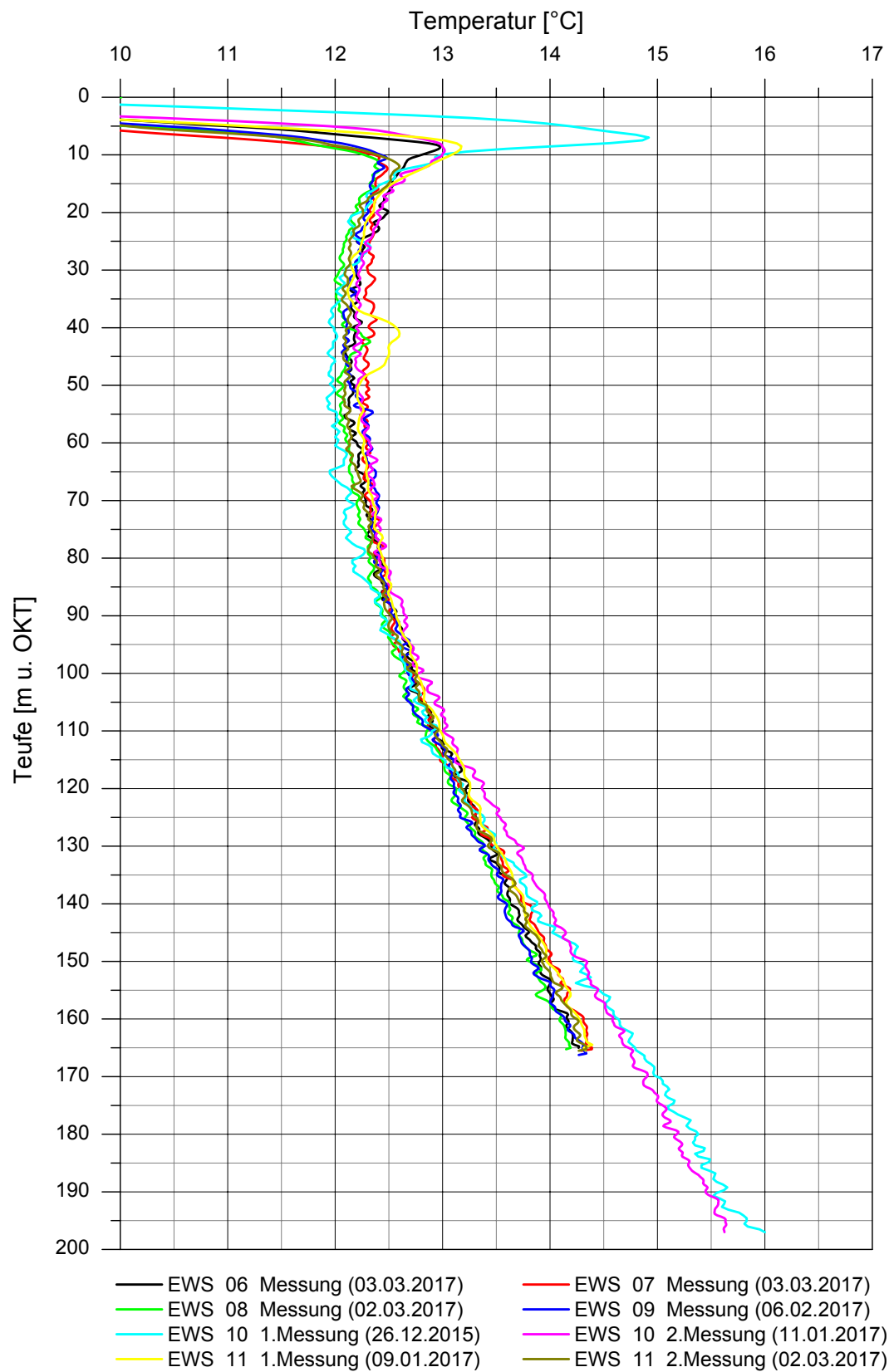


Abbildung A10

Projekt BFE 2017

EWS 06 bis 11: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes

