

29. Januar 2016

# **Faseroptische Temperaturmessungen - zur Detektierung der Hinterfüllung**

**Kurz – EGRTs (Enhanced Geothermal  
Response Tests) des Erdwärmesonden  
Projektes der Schulanlage Blumenfeld,  
Zürich-Affoltern**

## **Inhalt:**

- Kurz - EGRTs des Erdwärmesonden Projektes der Schulanlage Blumenfeld, Zürich-Affoltern. Bericht zu den faseroptischen Temperaturmessungen vom 16.11. bis 19.11.2015
- Rückschlüsse auf Fehlstellen des Hinterfüllmaterials durch Bestimmung des Bohrlochwiderstands (Kurz-EGRT) – Erfahrungen, Beispiele der Firma GTC Kappelmeyer GmbH



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

**Adresse**

GTC Kappelmeyer GmbH, Heinrich-Wittmann-Strasse 7a, D-76131 Karlsruhe  
Tel. +49-721-60008, Fax +49-721-60009, [www.gtc-info.de](http://www.gtc-info.de)

## 1. Zusammenfassung

Vom 16.11. bis 19.11.2015 wurden mit einem faseroptischen Messsystem in insgesamt 10 Erdwärmesonden der Schulanlage Blumenfeld Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden kurze EGRTs mit einem mobilen Hybridkabel durchgeführt um Rückschlüsse auf die Qualität der Hinterfüllung der Sonden ziehen zu können.

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 als Funktion der Tiefe ermittelt werden.

**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.**

## 2. Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung .....	3
2.	Inhaltsverzeichnis .....	4
3.	Verzeichnis der Abbildungen .....	5
4.	Beschreibung des faseroptischen Temperaturmessverfahrens .....	7
	Faseroptische Temperaturmessungen .....	7
	Enhanced Geothermal Response Test mittels faseroptischer Temperaturmessungen .....	8
	Aufheizmethode .....	9
	Physikalische Grundlagen .....	10
	Wiederangleich.....	11
	Untersuchungsbereich .....	12
	Bohrlochwiderstand .....	12
	Rückschlüsse auf Fehlstellen des Hinterfüllmaterials durch Bestimmung des Bohrlochwiderstands (Kurz-EGRT).....	12
	Terrestrische Wärmestromdichte .....	13
	Zusätzlicher konvektiver Einfluss, Pécletzahlanalyse.....	13
	EGRT-Mobil .....	14
	Beispiel.....	15
5.	Einbau der faseroptischen Messeinrichtung.....	17
6.	Durchführung der Messung nach der Heat-Pulse Methode (HPM) und Bestimmung der thermischen Parameter.....	18
7.	Literaturhinweise.....	20
8.	Anhang .....	21

### 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: Überblick Baufeld und Niederbringen der EWS-Rohre
- Abb. 6: Messaufbau und Bohrung mit Sondenrohren und Hybridkabel

im Anhang:

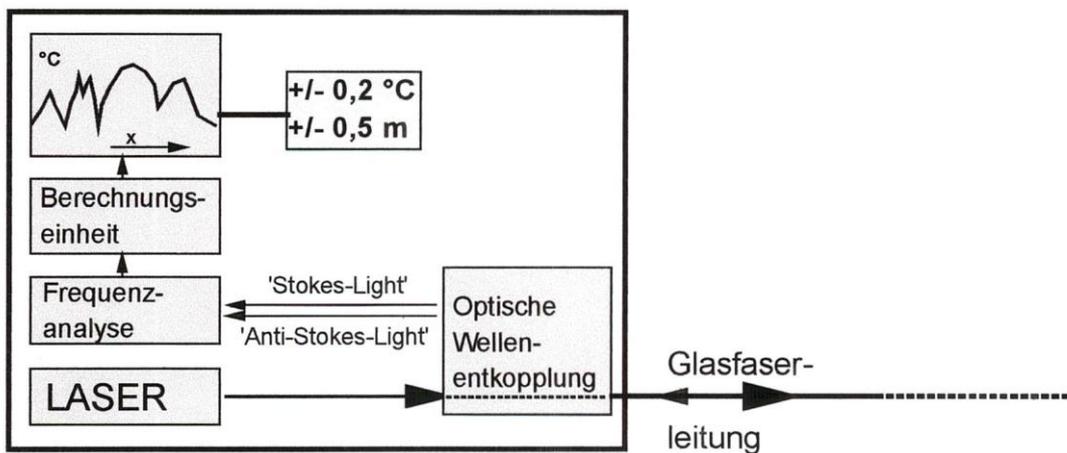
- Abb. 7: Lageplan der untersuchten Erdwärmesonden
- Abb. 8a: Schulanlage Blumenfeld – B02: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8b: Schulanlage Blumenfeld – B03: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8c: Schulanlage Blumenfeld – B04: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8d: Schulanlage Blumenfeld – B05: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8e: Schulanlage Blumenfeld – B06: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8f: Schulanlage Blumenfeld – B08: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8g: Schulanlage Blumenfeld – B09: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8h: Schulanlage Blumenfeld – B010: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8i: Schulanlage Blumenfeld – B011: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 8j: Schulanlage Blumenfeld – B012: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens
- Abb. 9: Schulanlage Blumenfeld – Vergleich der Temperatur-Tiefen-Profile
- Abb. 10: Schulanlage Blumenfeld – Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT
- Abb. 11a: Schulanlage Blumenfeld – B02: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11b: Schulanlage Blumenfeld – B03: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11c: Schulanlage Blumenfeld – B04: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes

- Abb. 11d: Schulanlage Blumenfeld – B05: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11e: Schulanlage Blumenfeld – B06: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11f: Schulanlage Blumenfeld – B08: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11g: Schulanlage Blumenfeld – B09: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11h: Schulanlage Blumenfeld – B10: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11i: Schulanlage Blumenfeld – B11: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 11j: Schulanlage Blumenfeld – B12: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil der zeitlichen Nahfeldes
- Abb. 12: Schulanlage Blumenfeld – Vergleich der Effektiven Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profile des zeitlichen Nahfeldes

#### 4. Beschreibung des faseroptischen Temperaturmessverfahrens

##### *Faseroptische Temperaturmessungen*

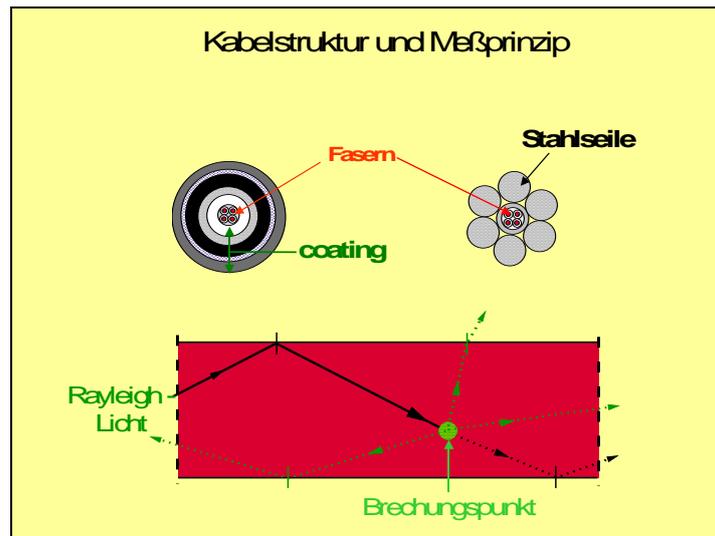
Mittels moderner Messtechnik ist es möglich die Temperaturverteilung entlang einer Glasfaserleitung unter Verwendung eines Lasers zu bestimmen. Dabei dienen die optischen Fasern im Kabel als Sensoren. Die optischen Eigenschaften der Glasfaser sind unter anderem von der lokalen Umgebungstemperatur abhängig.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



**Abb. 1:** Messprinzip

Ein energiereicher Laser sendet ein definiertes optisches Signal in eine Glasfaser, das dann entlang seiner gesamten Lauflänge reflektiert wird. Die zurückgestreuten Signale besitzen eine sehr geringe Intensität, können jedoch hinsichtlich ihrer Frequenzverteilung analysiert werden (Abb. 1 und 2). Diese lässt sich in einen „Raleigh“- und in einen „Raman“-Anteil unterscheiden. Die beiden Komponenten des „Raman“-Anteils, das „Stokes-Licht“ und das „Anti-Stokes-Licht“ sind hinsichtlich ihres Frequenzspektrums abhängig von der Temperatur am Ort der Reflexion in der Glasfaser (*Gilmore u.a., 1991*). Eine Frequenzanalyse ermöglicht eine vergleichsweise genaue Bestimmung der Temperatur am Ort der Reflexion. Die Lagebestimmung wird durch eine sehr exakte Messung der Reflexionszeiten, unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit in der Glasfaser, durchgeführt.

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



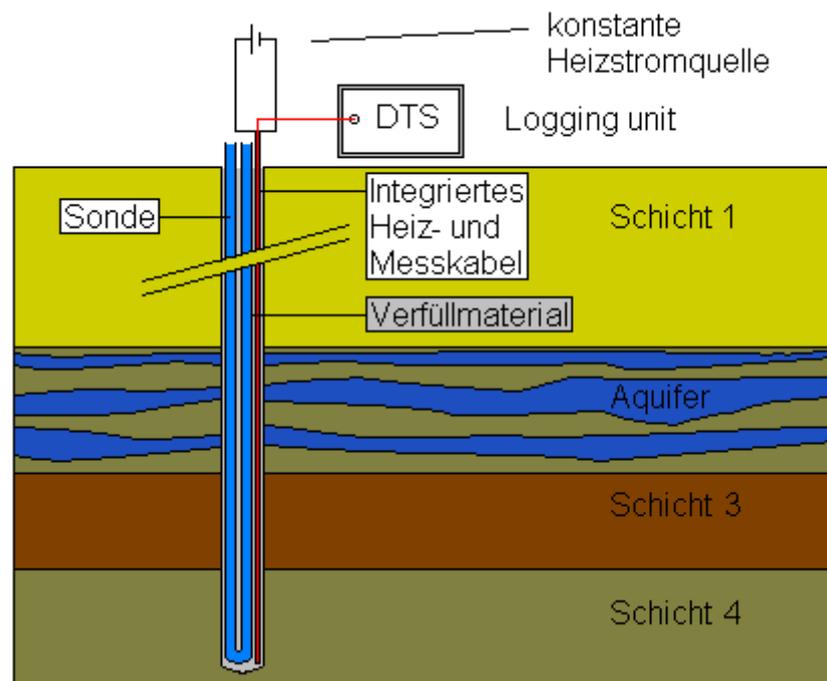
**Abb. 2:** Schematische Darstellung unterschiedlicher Kabelaufbauten (oben). Schematische Darstellung der Streuung bzw. Reflexion eines optischen Signals in einer Glasfaser (unten)

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

#### *Enhanced Geothermal Response Test mittels faseroptischer Temperaturmessungen*

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

## Messaufbau



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

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

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

### Aufheizmethode

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

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

### Physikalische Grundlagen

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

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

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

$T(r=r_b, t)$	=	Temperatur der Linienquelle (LWL-Kabel) [°C] bzw. [K]
$r$	=	Entfernung zur Linienquelle [m]
$t$	=	Zeit seit Anschalten der Quelle [s]
$q_L$	=	Heizleistung pro Längeneinheit [W m <sup>-1</sup> ]
$\pi$	=	Pi (3,14...)
$\kappa$	=	Diffusivität des Mediums (Boden) [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	=	Wärmeleitfähigkeit des Mediums (Boden) [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	=	Eulersche Konstante (0,577...)
$T_0$	=	Ungestörte Bodentemperatur [°C] bzw. [K]

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

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

$r_b$	=	Radius der Bohrung [m]
$R_B$	=	Bohrlochwiderstand [K m W <sup>-1</sup> ]

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  $\lambda$  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.

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

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

$t_h$  = Länge des Heat-Pulses [s]

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

### *Untersuchungsbereich*

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

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

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

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

### *Bohrlochwiderstand*

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

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

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

Grundwasserspiegels befinden. Diese Fehlstellen sind dann nicht mit Wasser, sondern mit Luft gefüllt und deshalb durch unnatürlich hohe Werte des Bohrlochwiderstandes gekennzeichnet.

### *Terrestrische Wärmestromdichte*

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

### *Zusätzlicher konvektiver Einfluss, Péclétzahlanalyse*

Die nach der Heat-Pulse Methode gewonnene Wärmeleitfähigkeit ist nicht allein dem die Bohrung umgebenden Material zuzuordnen, sondern sie wird durch die darin stattfindende Grundwasserbewegung mit beeinflusst. Die durch dieses Verfahren gewonnene Größe  $\lambda$  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  $\lambda_{kond}$  proportional dem konduktivem Wärmetransport und in der Schicht mit Grundwasserbewegung die scheinbare Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{kond+konv}$  proportional der Summe des konvektiven und konduktiven Wärmetransports. Die Péclétzahl ist somit durch

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

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

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

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

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

mit:

$q_a$  = konvektiver Wärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

$q_c$  = konduktiver Wärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]

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

$v_f$  = Filtergeschwindigkeit des Fluids [m/s]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

$\lambda = \lambda_{\text{kond.}}$  = 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

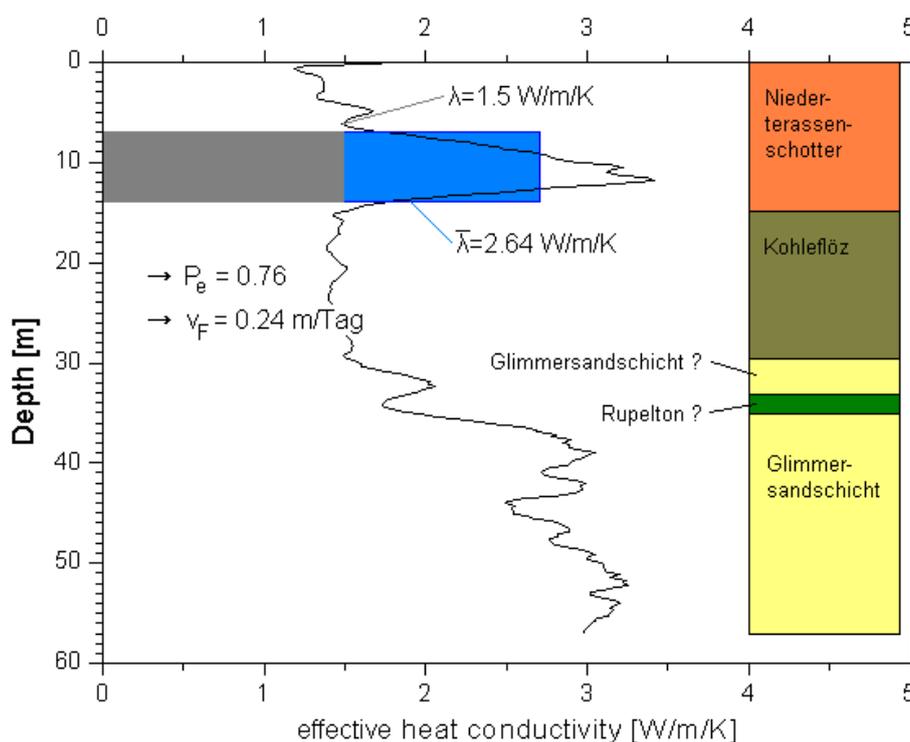
des Temperaturprofils verwendet. Das weitere Messprinzip und die mathematische Beschreibung erfolgen analog des normalen EGRT.

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 Pécltzahl hat damit einen Wert von  $P_e = 0,76$ . Für die Dichte von Wasser wurden  $1000 \text{ kg/m}^3$  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 Pécltzahlanalyse im Aquifer auch absolut zu bestimmen.

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

## 5. Einbau der faseroptischen Messeinrichtung

Die Erdwärmesonden, in denen die mobilen Kurz-Enhanced-Geothermal-Response-Tests (Kurz-EGRT-Mobil) durchgeführt wurden, befinden sich auf dem Gelände der Schulanlage Blumenfeld in Zürich-Affoltern. 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. So konnten bei 9 von insgesamt 10 Tests die Hybridkabel bis über 190 m Tiefe eingebracht werden, einzig bei Erdwärmesonde B12 wurde nur knapp 180 m Tiefe erreicht.



**Abb. 5:** Überblick Baufeld (links) und Niederbringen der EWS-Rohre (rechts)



**Abb. 6:** Messaufbau (links) und EWS-Sondenrohre mit Hybridkabel (rechts)

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.

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

Vom 16.11. bis 19.11.2015 wurden mit dem faseroptischen Messsystem in insgesamt 10 Erdwärmesonden der Schulanlage Blumenfeld Messungen nach der Heat-Pulse Methode durchgeführt. Dabei wurden kurze EGRTs mit einem mobilen Hybridkabel durchgeführt um Rückschlüsse auf die Qualität der Hinterfüllung der Sonden ziehen zu können. Die Temperaturentwicklung im Glasfaserkabel wurde während der gesamten Dauer des Tests quasikontinuierlich (Abtast-/Mittelungsrate ca. 1,1 min) aufgezeichnet.

Eine Übersicht der untersuchten Erdwärmesonden befindet sich auf dem Lageplan in Abbildung 7 des Anhangs.

### *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 Sonden B2, B3, B4, B5, B6, B8, B9, B10, B11 und B12 sind in Abhängigkeit der Tiefe in den Abbildungen 8a bis 8j (siehe Anhang) dargestellt. In Abbildung 9 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.

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 Bohrloch tiefsten 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.

### *Heat-Pulse Messung (EGRT)*

Am 16.11.2015 nachmittags wurde mit der Aufheizung der in das Kabel integrierten Kupferleiter an der ersten Erdwärmesonde begonnen. In den darauffolgenden Tagen konnten pro Tag drei Sonden gemessen werden. Am 19.11.2015 später Nachmittag wurden die Messungen beendet. Die Aufheizungen dauerten jeweils mindestens 1,5 Stunden, danach wurde jeweils für mindestens eine halbe Stunde der anschließende Wiederangleich aufgezeichnet. Den Sonden wurde jedes Mal eine konstante Heizleistung von 13,38 W/m zugeführt.

Um den Aufheizvorgang zu dokumentieren sind in der Abbildung 10 für die erste untersuchte Sonde B10 die Temperaturprofile von verschiedenen Phasen des zweistündigen Aufheizvorgangs 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 Sondenrohre, Rohrinhalts (hier Wasser), Verfüllmaterials und je nach Geometrie, bzw. Lage des Hybridkabels u. U. auch schon teilweise des angrenzenden Erdreichs bestimmt. Die so bestimmten Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes der untersuchten Sonden B2, B3, B4, B5, B6, B8, B9, B10, B11 und B12 sind in Abhängigkeit der Tiefe in den Abbildungen 11a bis 11j dargestellt. In Abbildung 12 sind alle Ergebnisse in einer Graphik abgebildet.

Auch hier zeigen alle untersuchten Erdwärmesonden ab einer Tiefe von 6,5 m u. OKT einen gleichen Verlauf. Im Rahmen der Messgenauigkeit wird für jede Bohrung eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von 1,22 W/m/K bestimmt. Dies stimmt mit einer angegebenen Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials von 2 W/m/K überein, da die geringen Wärmeleitfähigkeiten der Sondenrohre und des Wassers 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.

**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.**

Karlsruhe, den 18. Dezember 2015

GTC Kappelmeyer GmbH



Philipp Heidinger



Axel Fabritius

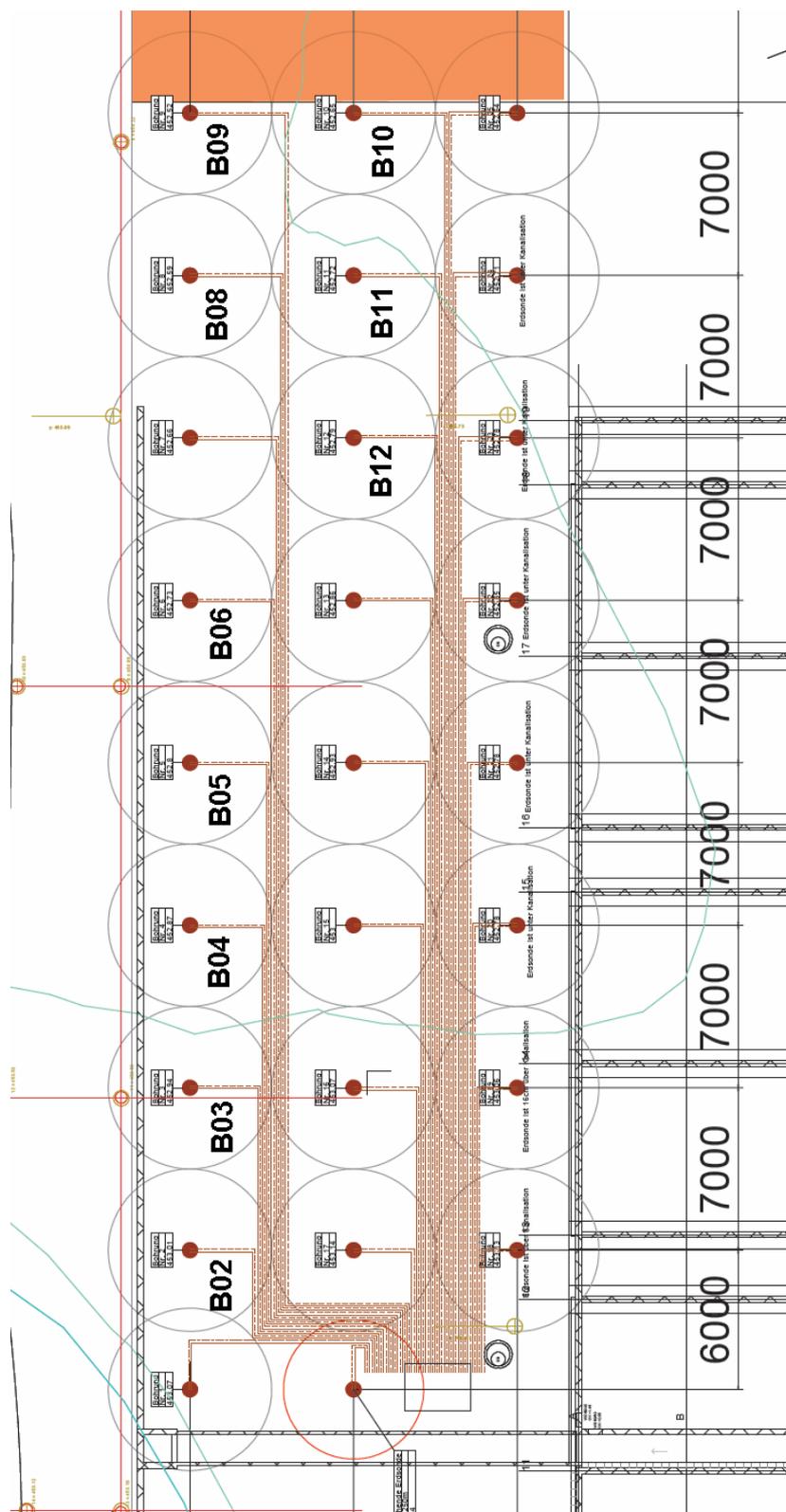
## 7. Literaturhinweise

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

## 8. Anhang

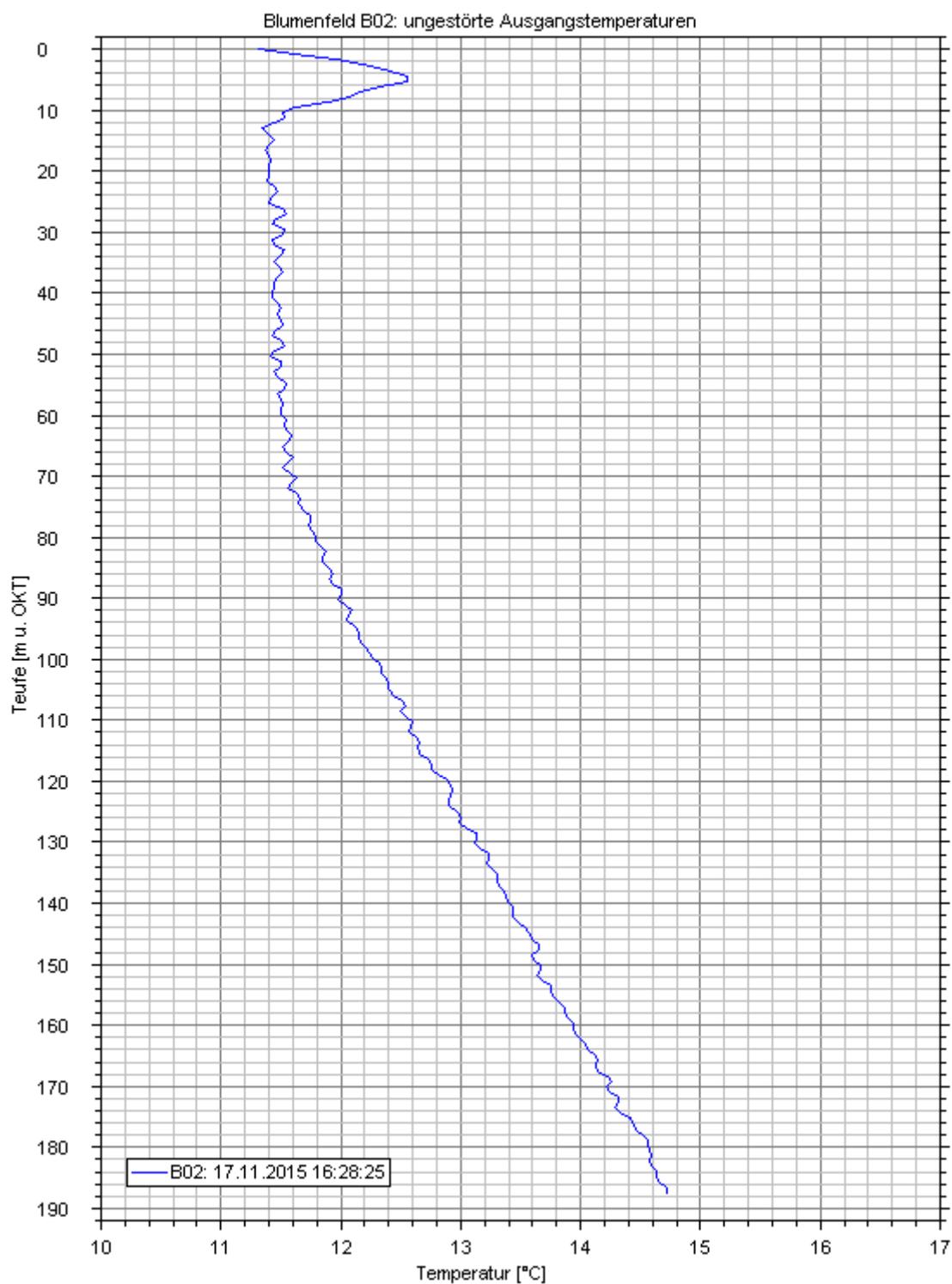
## Abbildung 7

Schulanlage Blumenfeld - Lageplan der untersuchten Erdwärmesonden



**Abbildung 8a**

Schulanlage Blumenfeld – B02: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



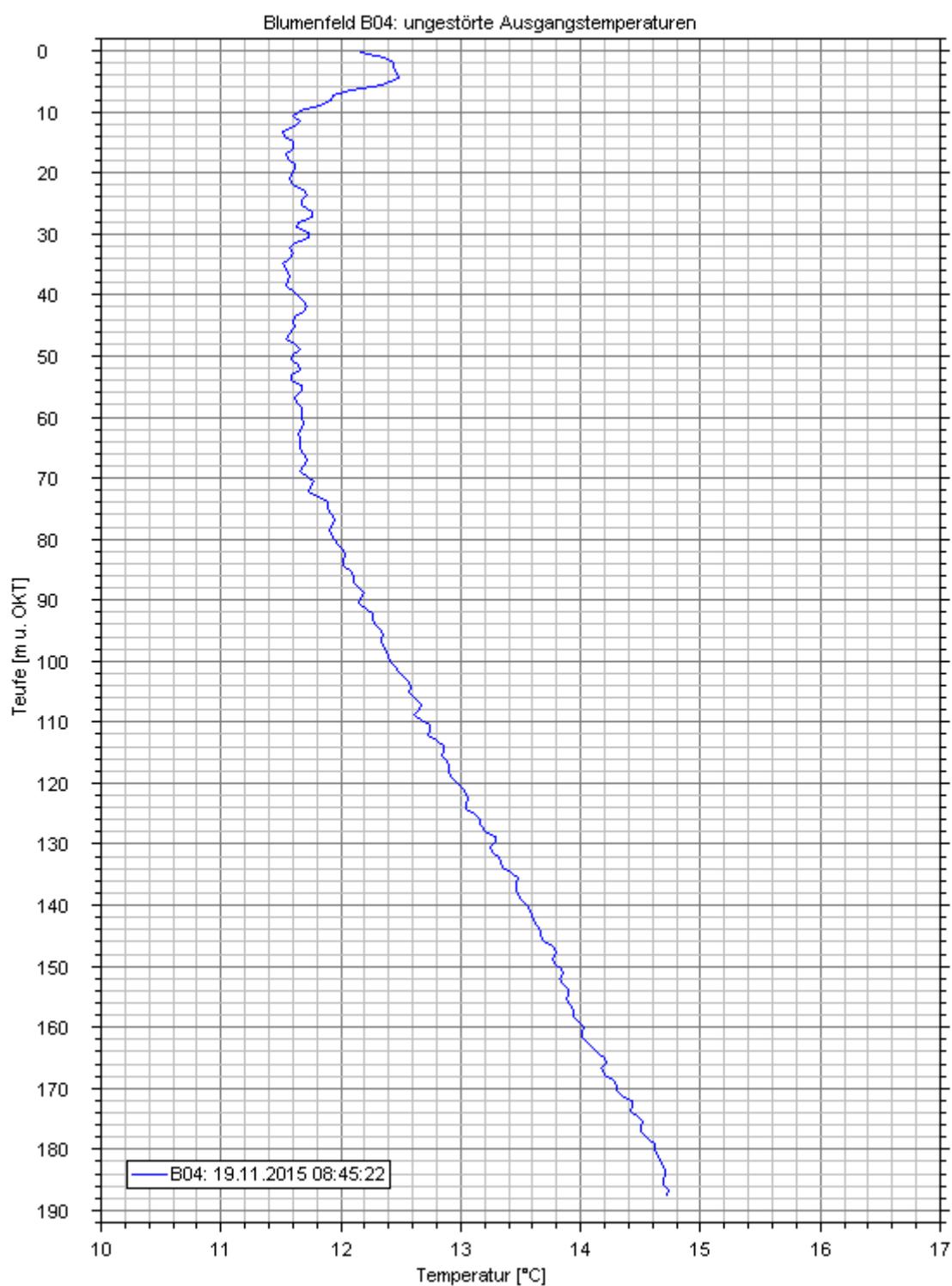
**Abbildung 8b**

Schulanlage Blumenfeld – B03: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



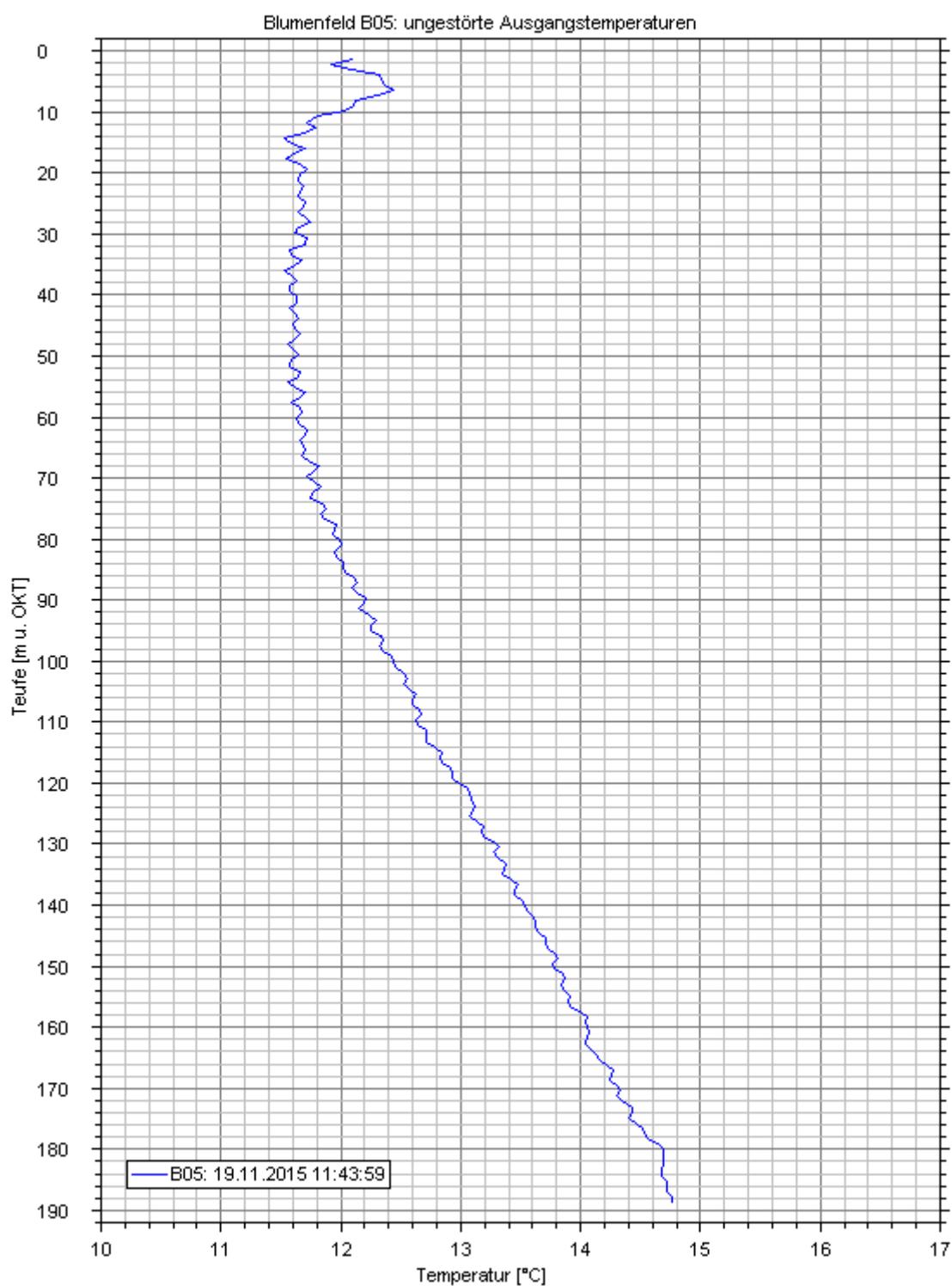
**Abbildung 8c**

Schulanlage Blumenfeld – B04: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



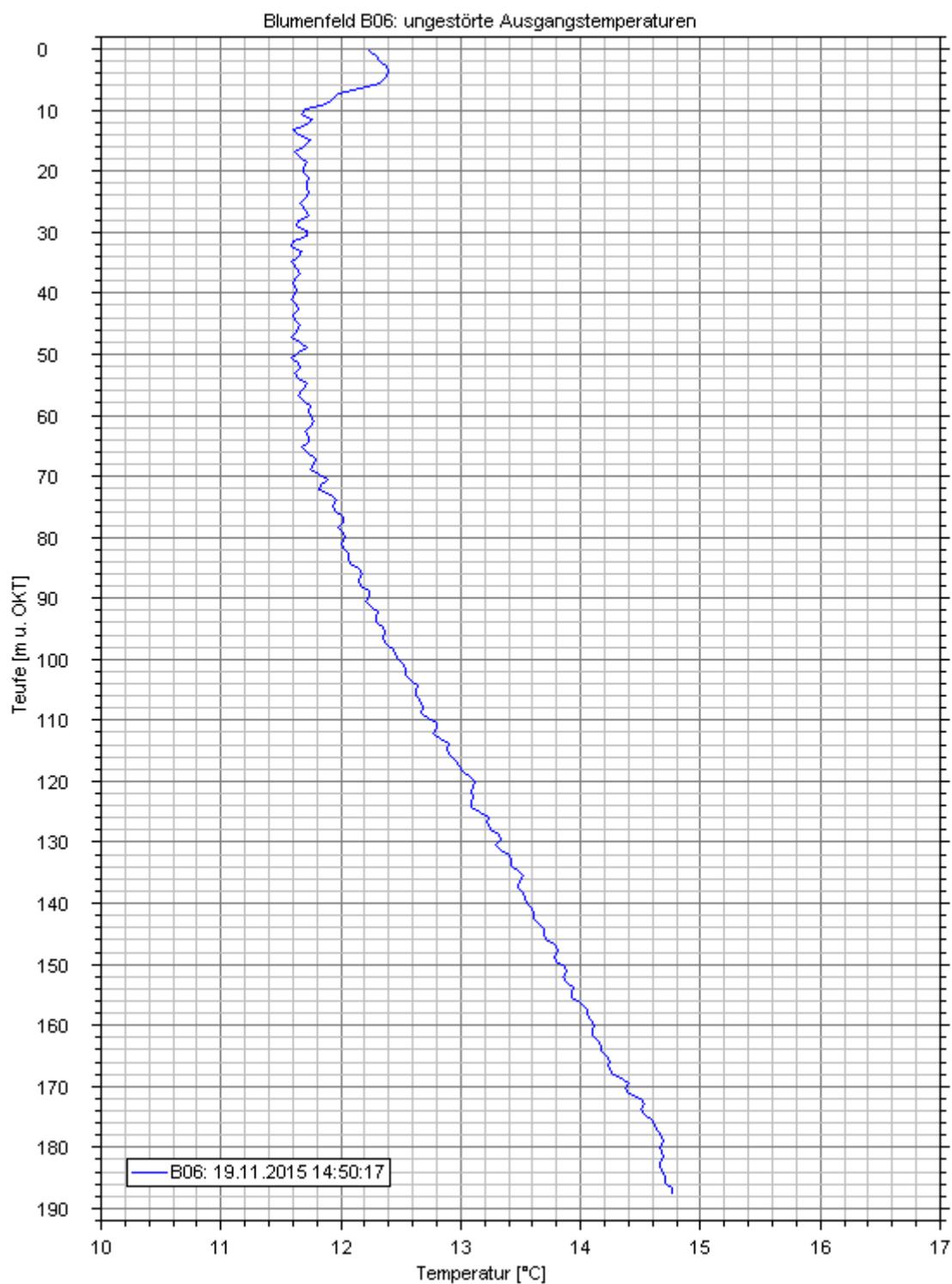
**Abbildung 8d**

Schulanlage Blumenfeld – B05: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



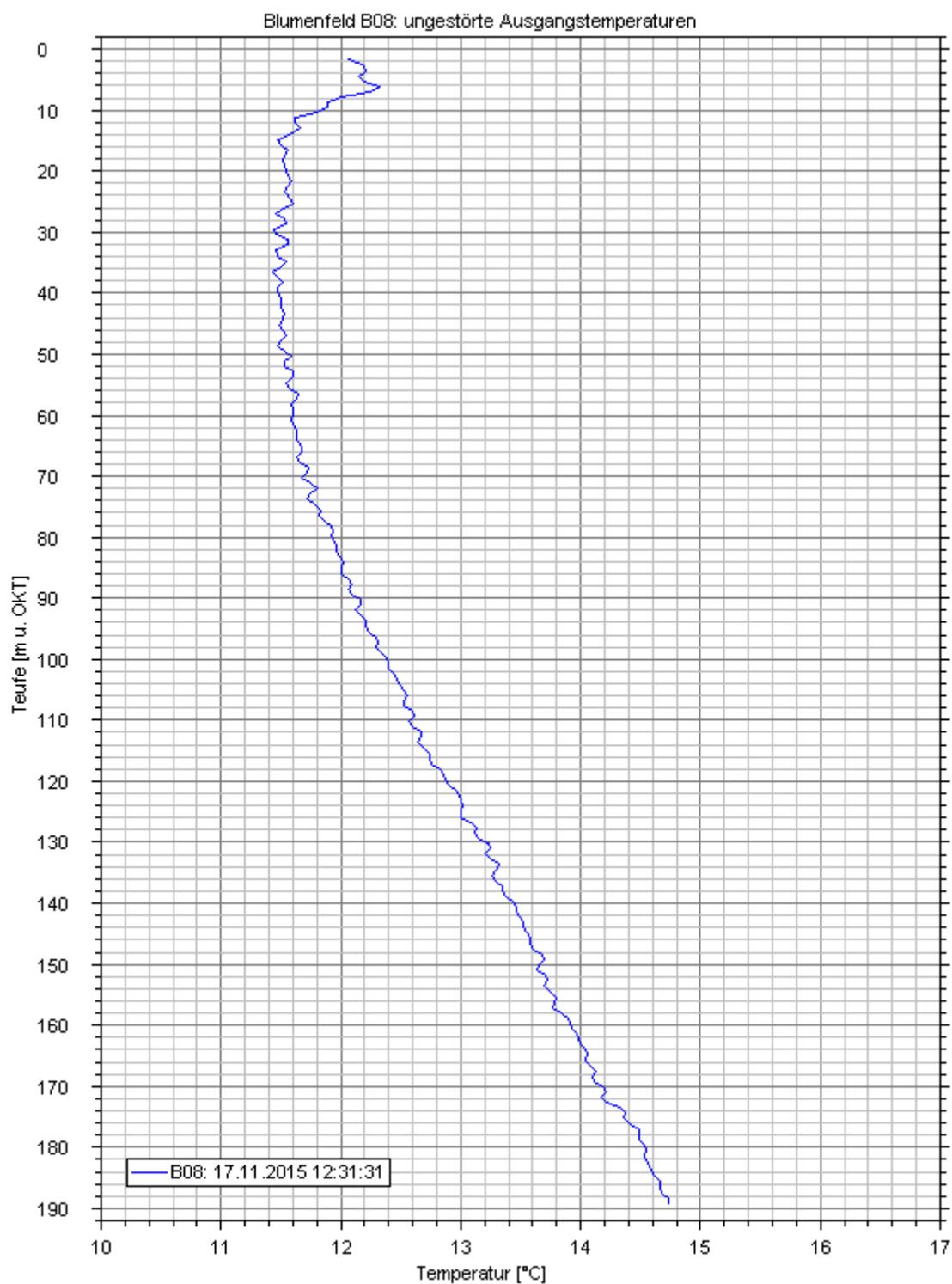
**Abbildung 8e**

Schulanlage Blumenfeld – B06: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



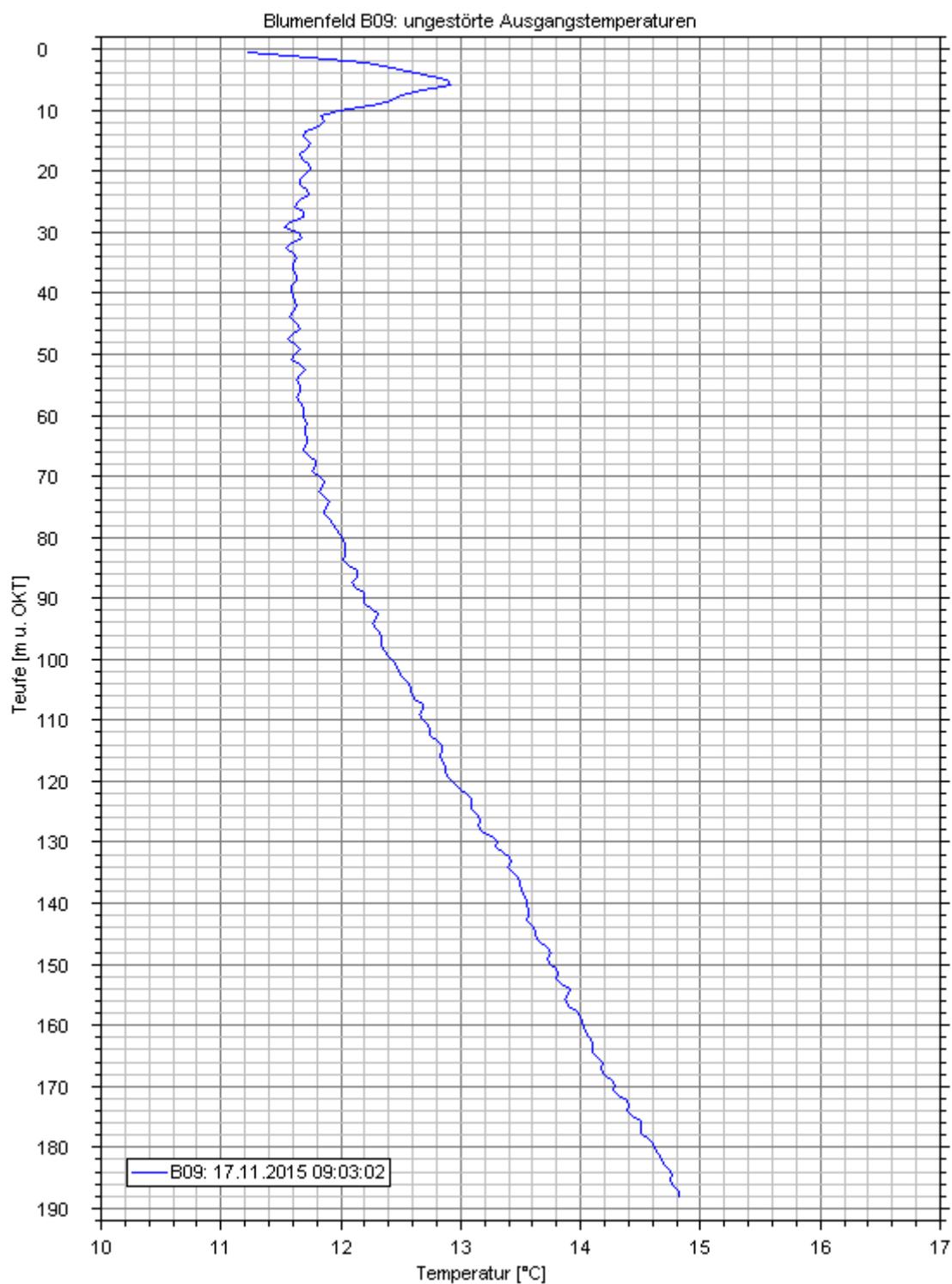
**Abbildung 8f**

Schulanlage Blumenfeld – B08: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



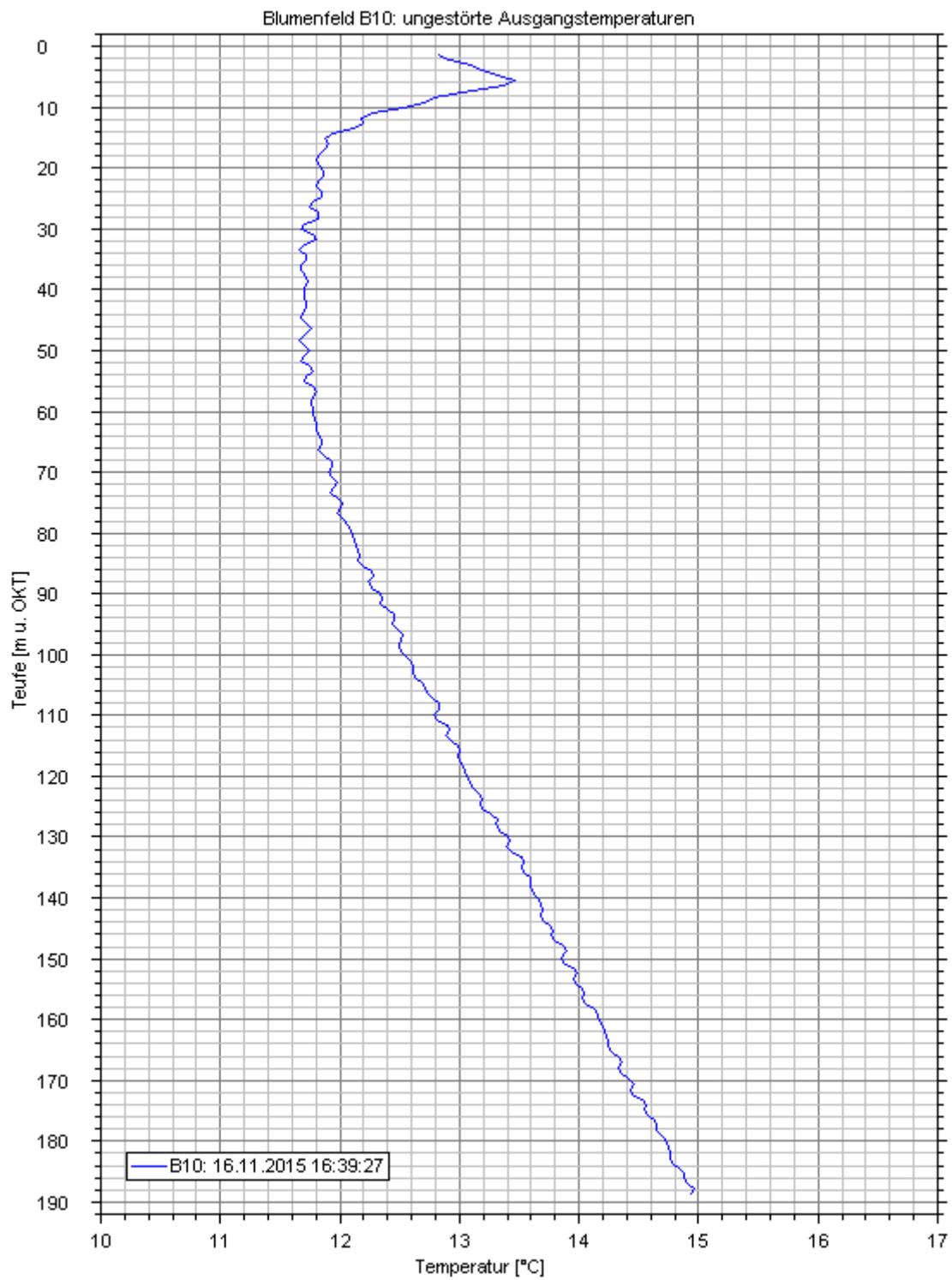
**Abbildung 8g**

Schulanlage Blumenfeld – B09: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



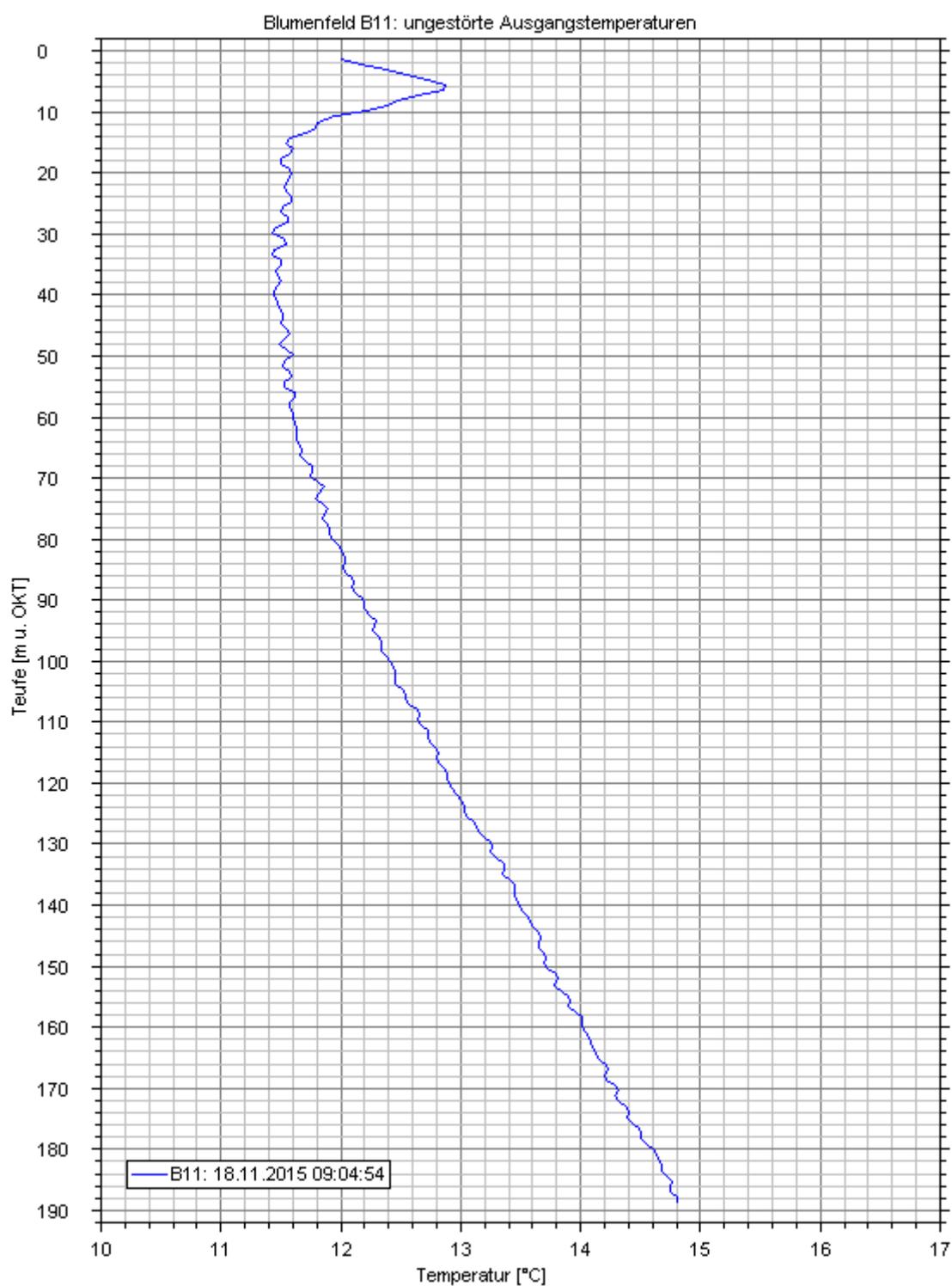
**Abbildung 8h**

Schulanlage Blumenfeld – B10: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



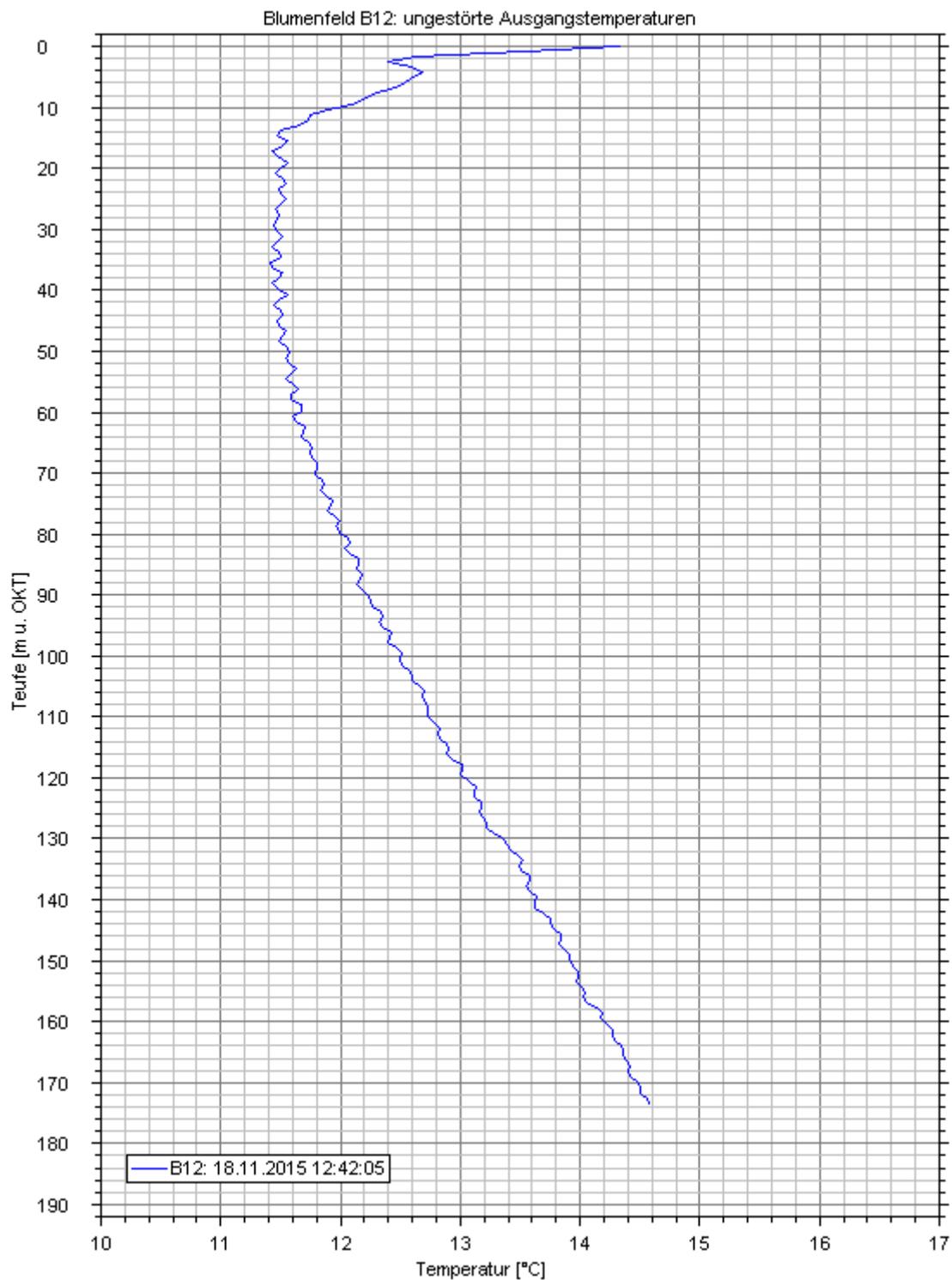
**Abbildung 8i**

Schulanlage Blumenfeld – B11: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



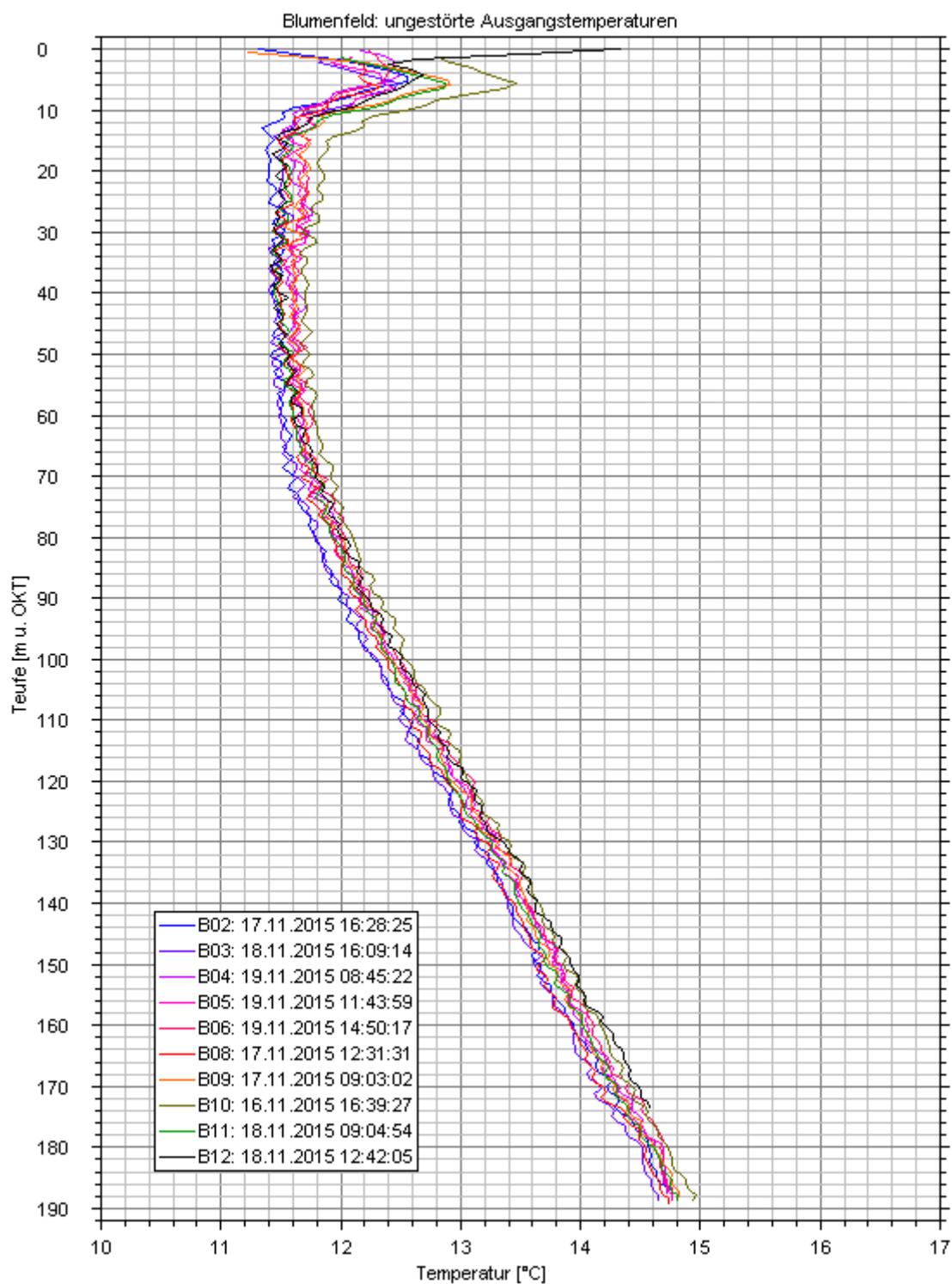
**Abbildung 8j**

Schulanlage Blumenfeld – B12: Temperatur-Tiefen-Profil vor Beginn des Heizens



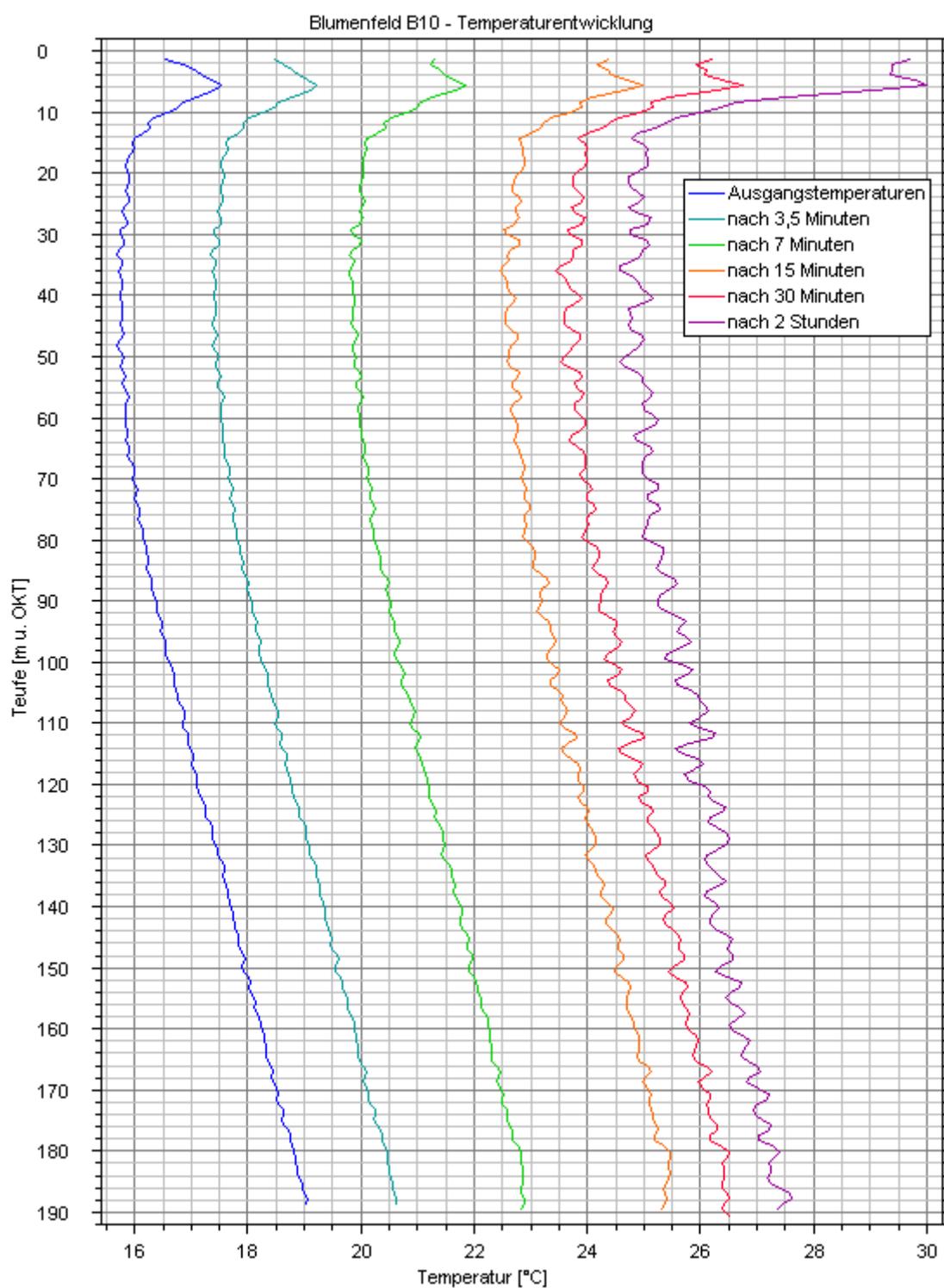
**Abbildung 9**

Schulanlage Blumenfeld – Vergleich der Temperatur-Tiefen-Profile vor Beginn des Heizens



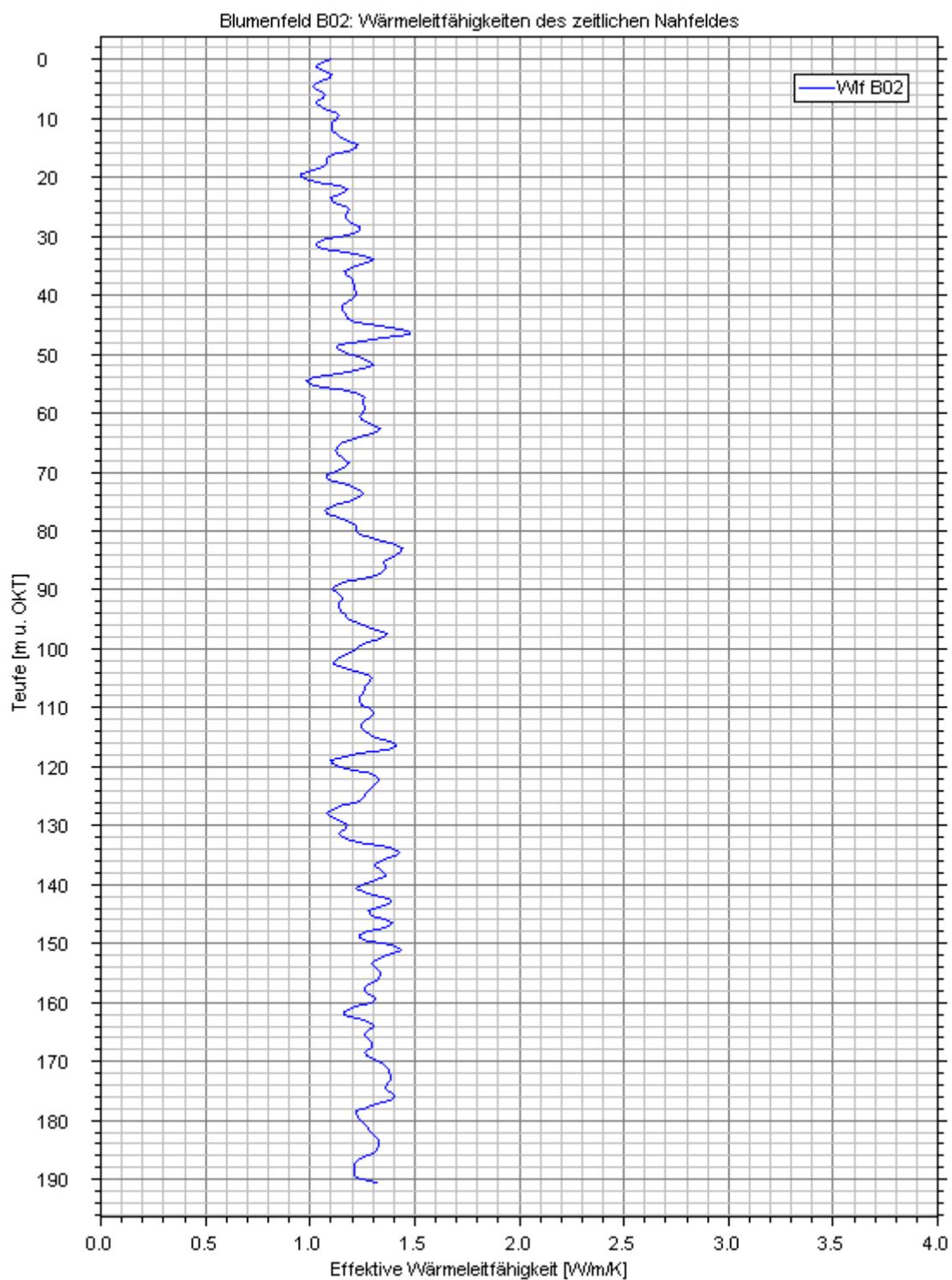
**Abbildung 10**

Schulanlage Blumenfeld – Ausgewählte Temperatur-Tiefen-Profile während des Kurz-EGRT



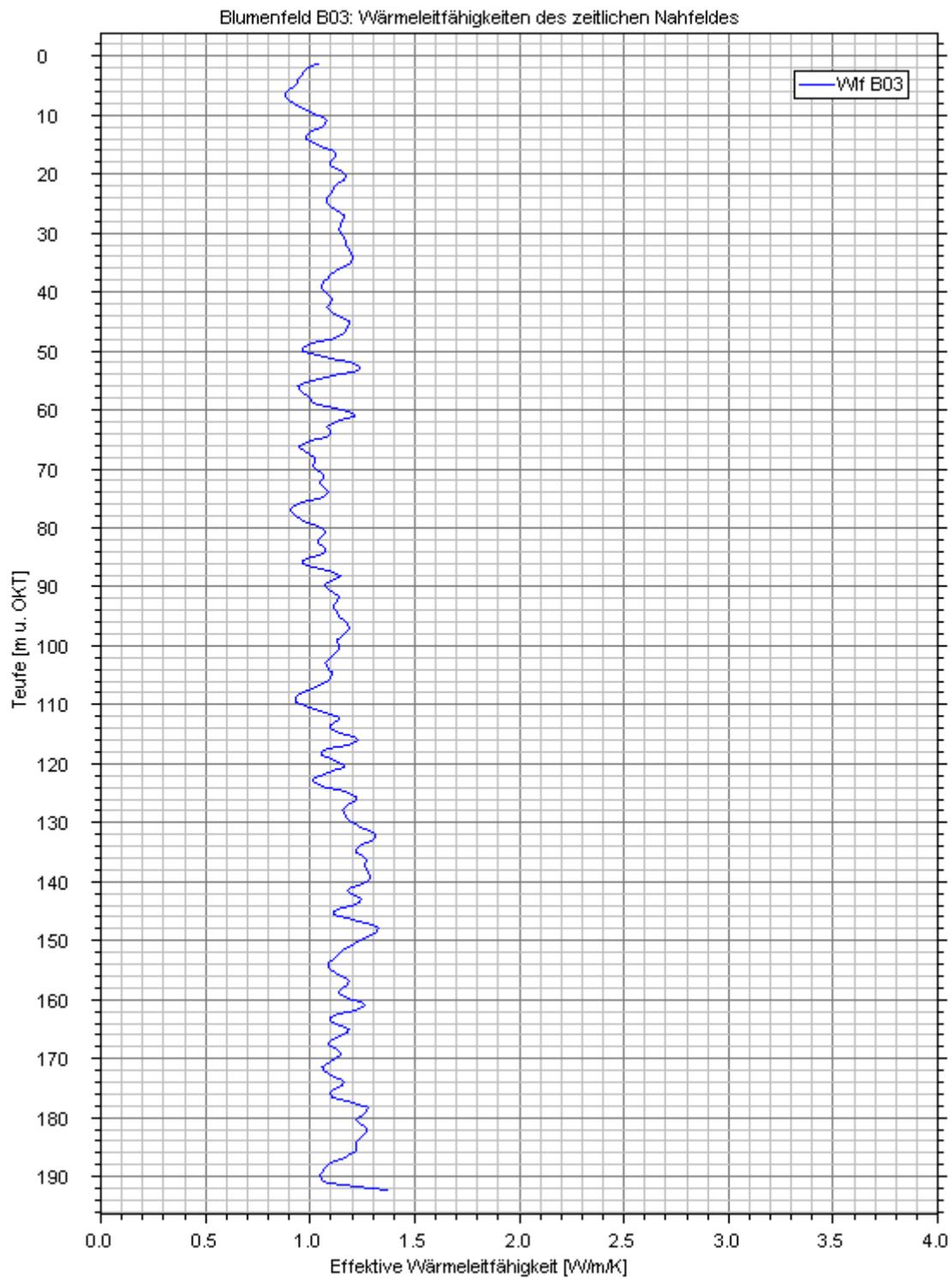
**Abbildung 11a**

Schulanlage Blumenfeld – B02: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



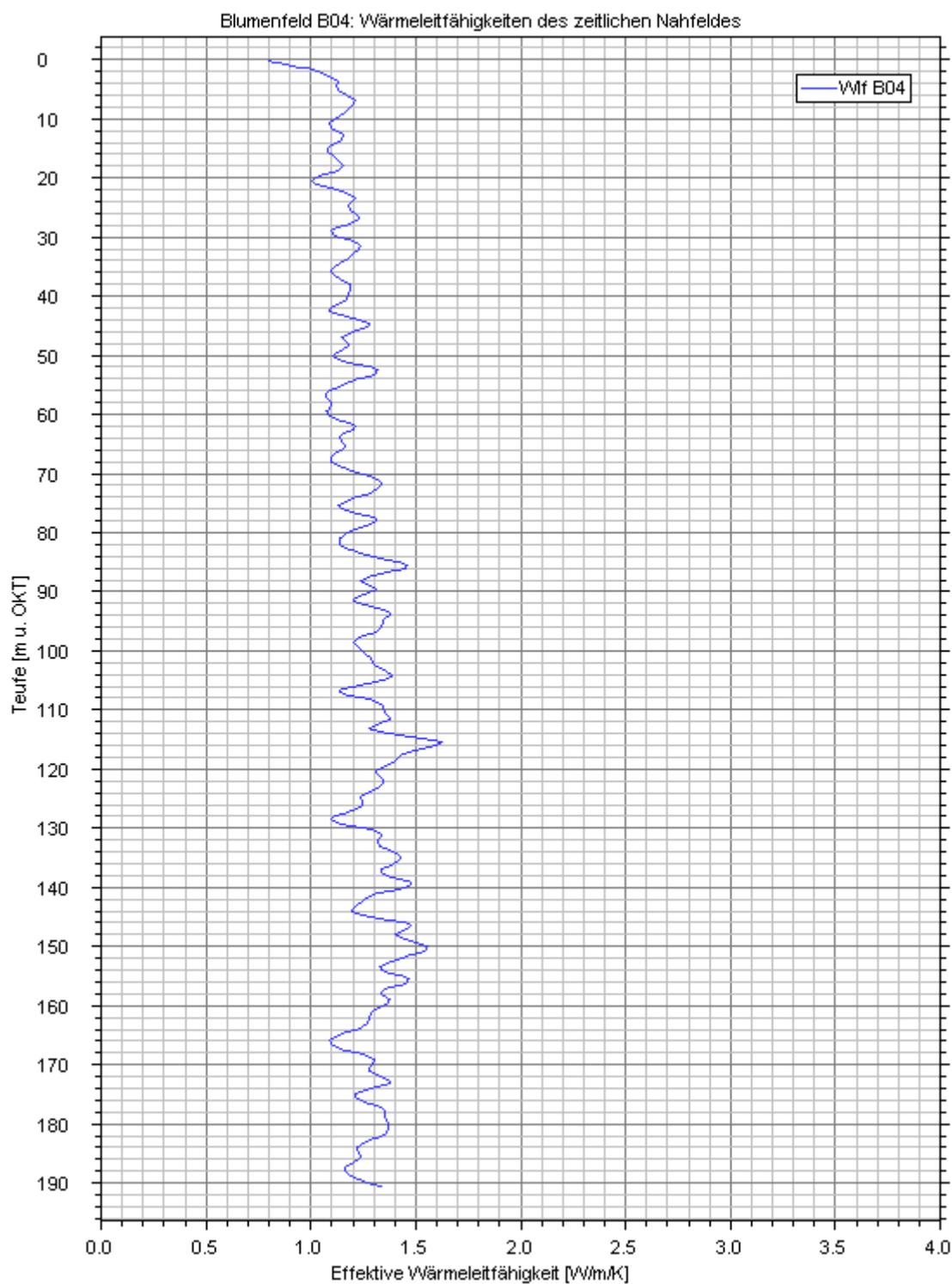
**Abbildung 11b**

Schulanlage Blumenfeld – B03: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



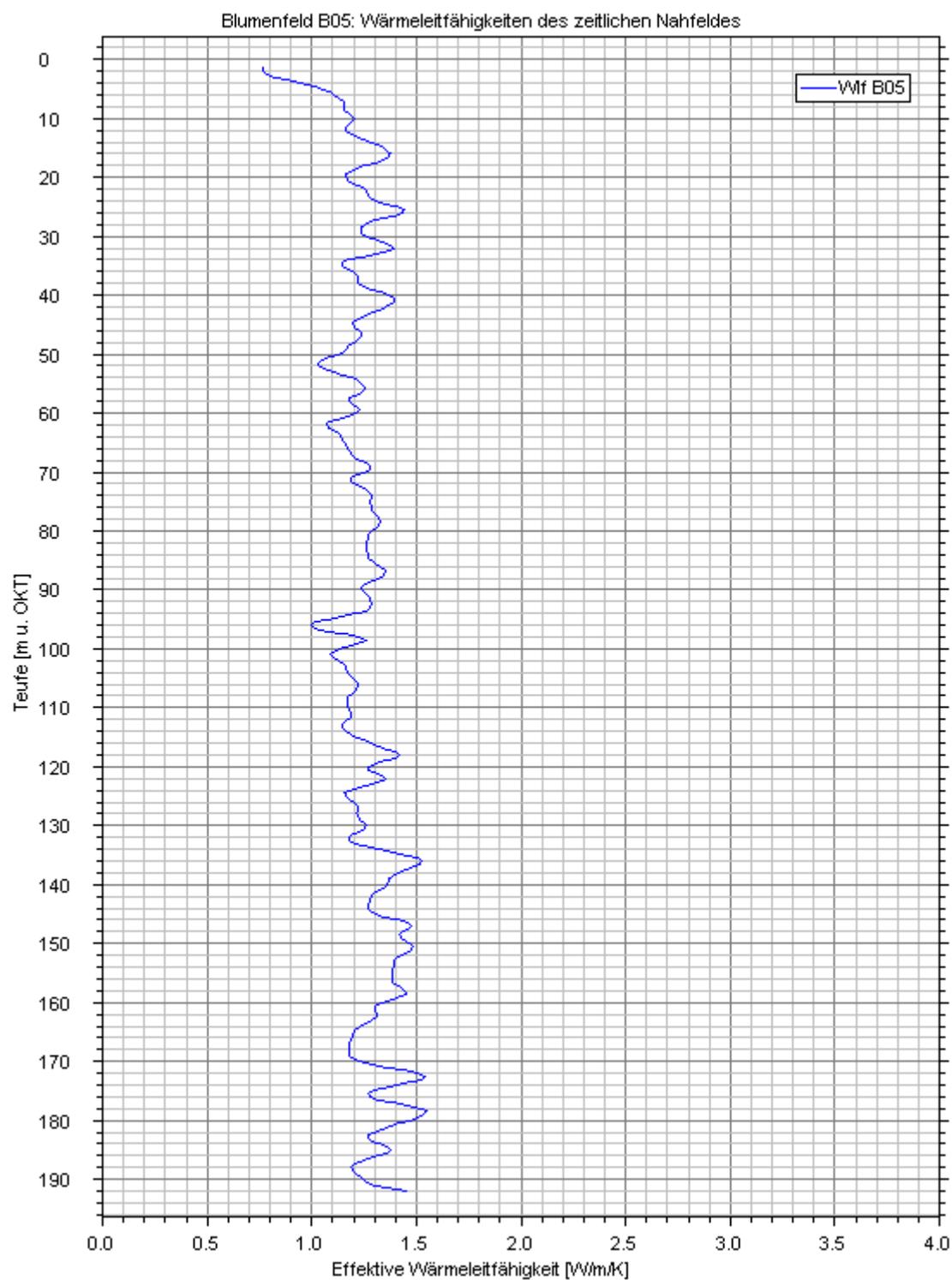
**Abbildung 11c**

Schulanlage Blumenfeld – B04: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



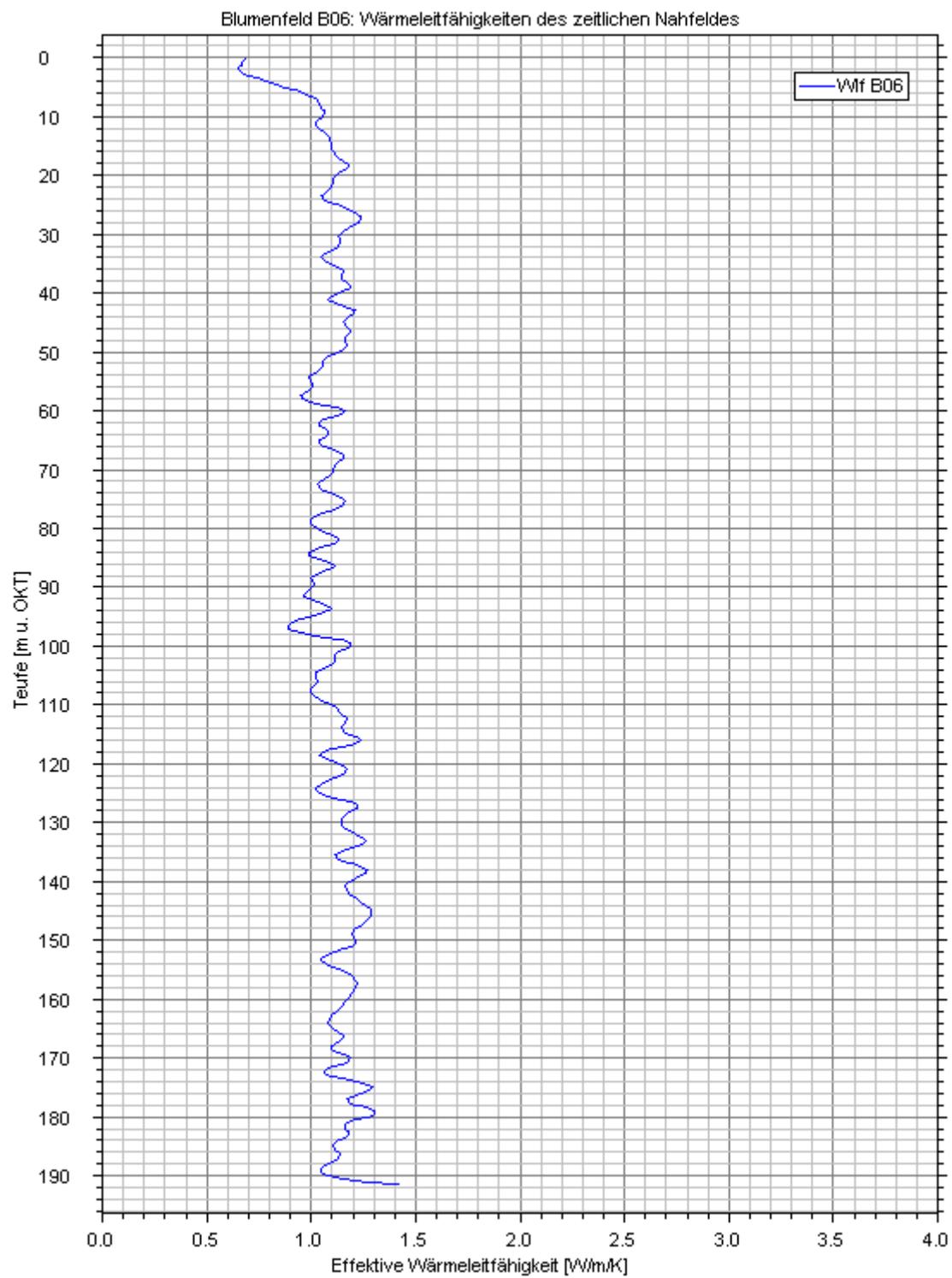
**Abbildung 11d**

Schulanlage Blumenfeld – B05: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



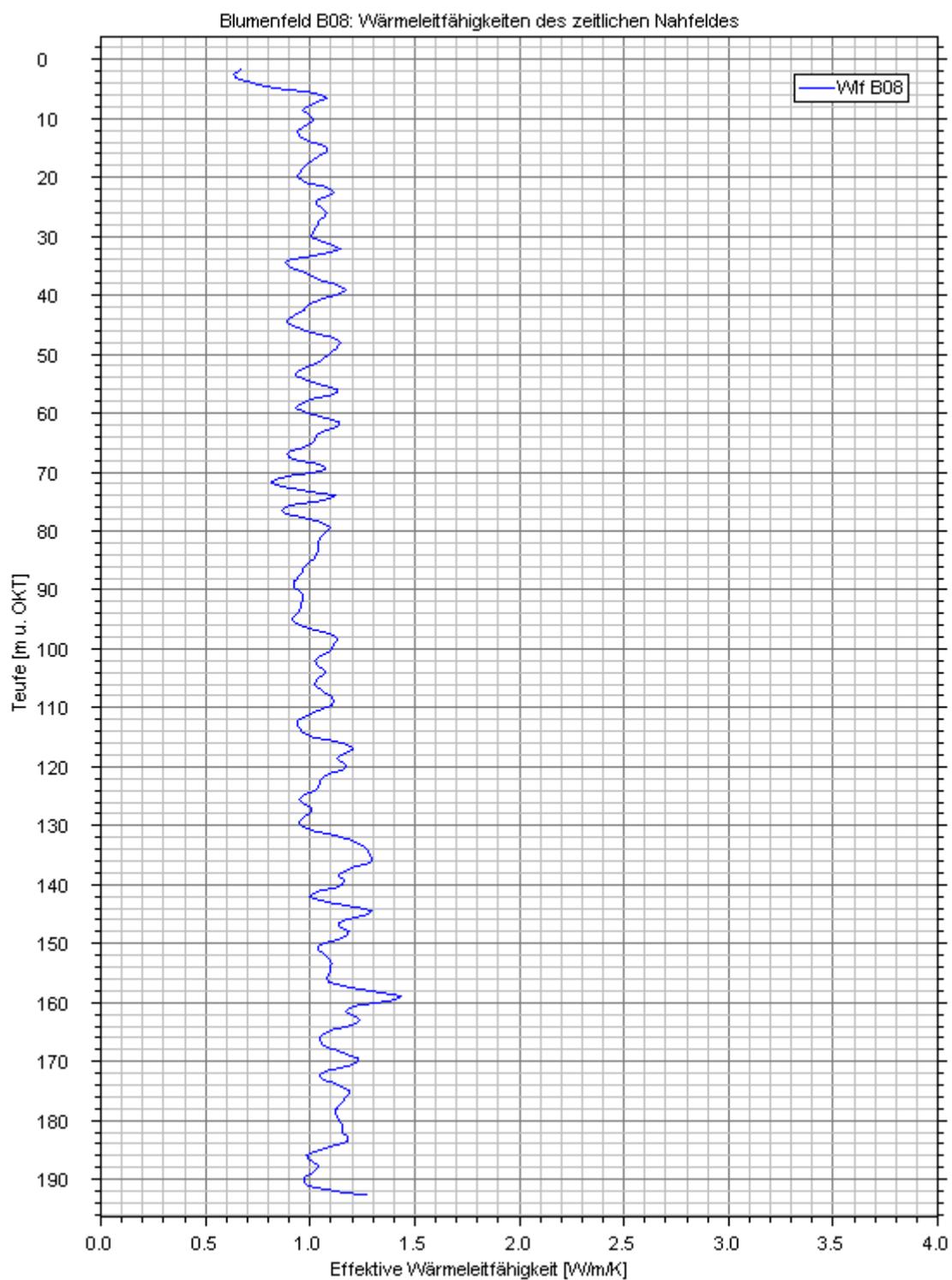
**Abbildung 11e**

Schulanlage Blumenfeld – B06: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



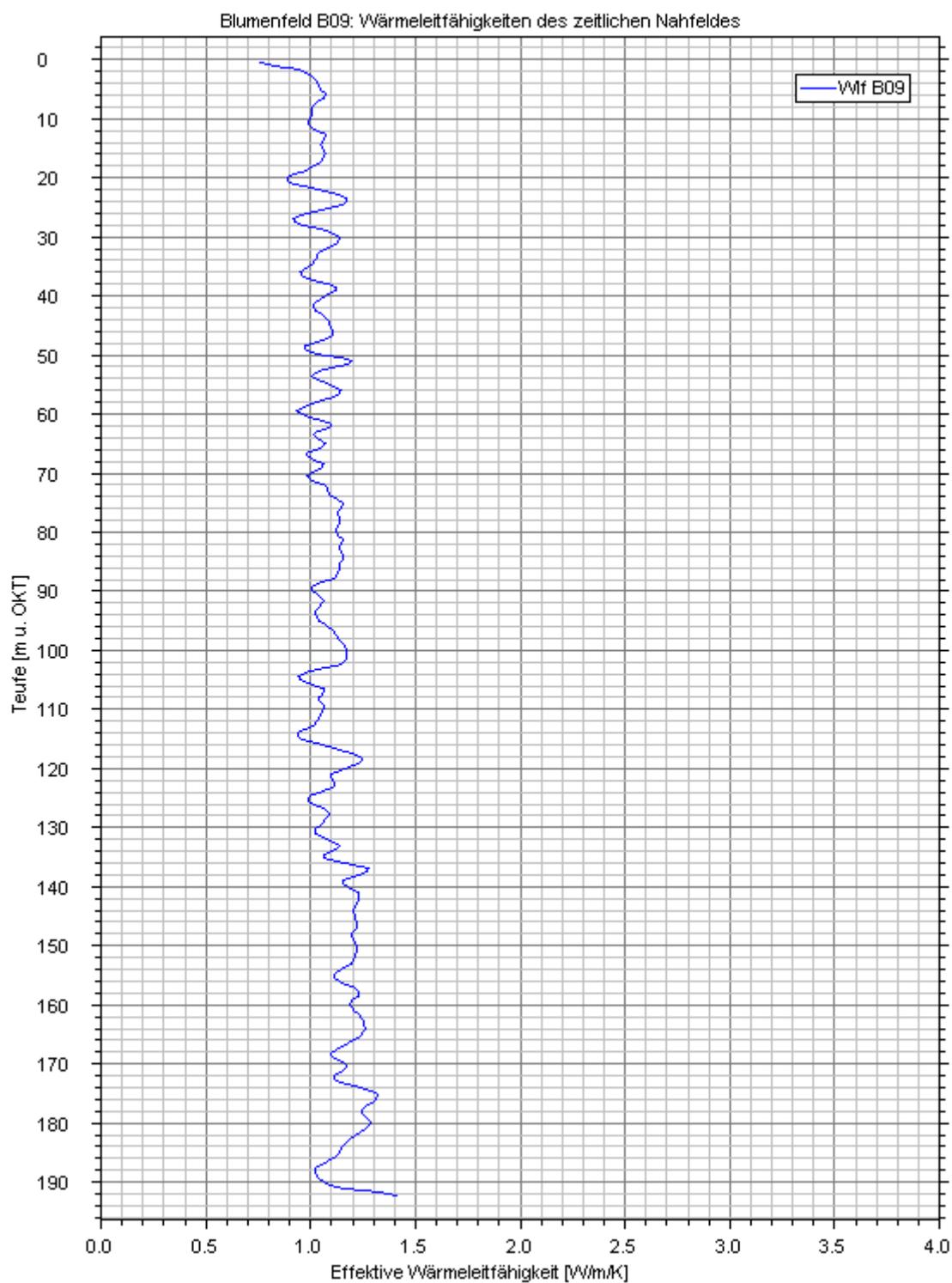
**Abbildung 11f**

Schulanlage Blumenfeld – B08: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



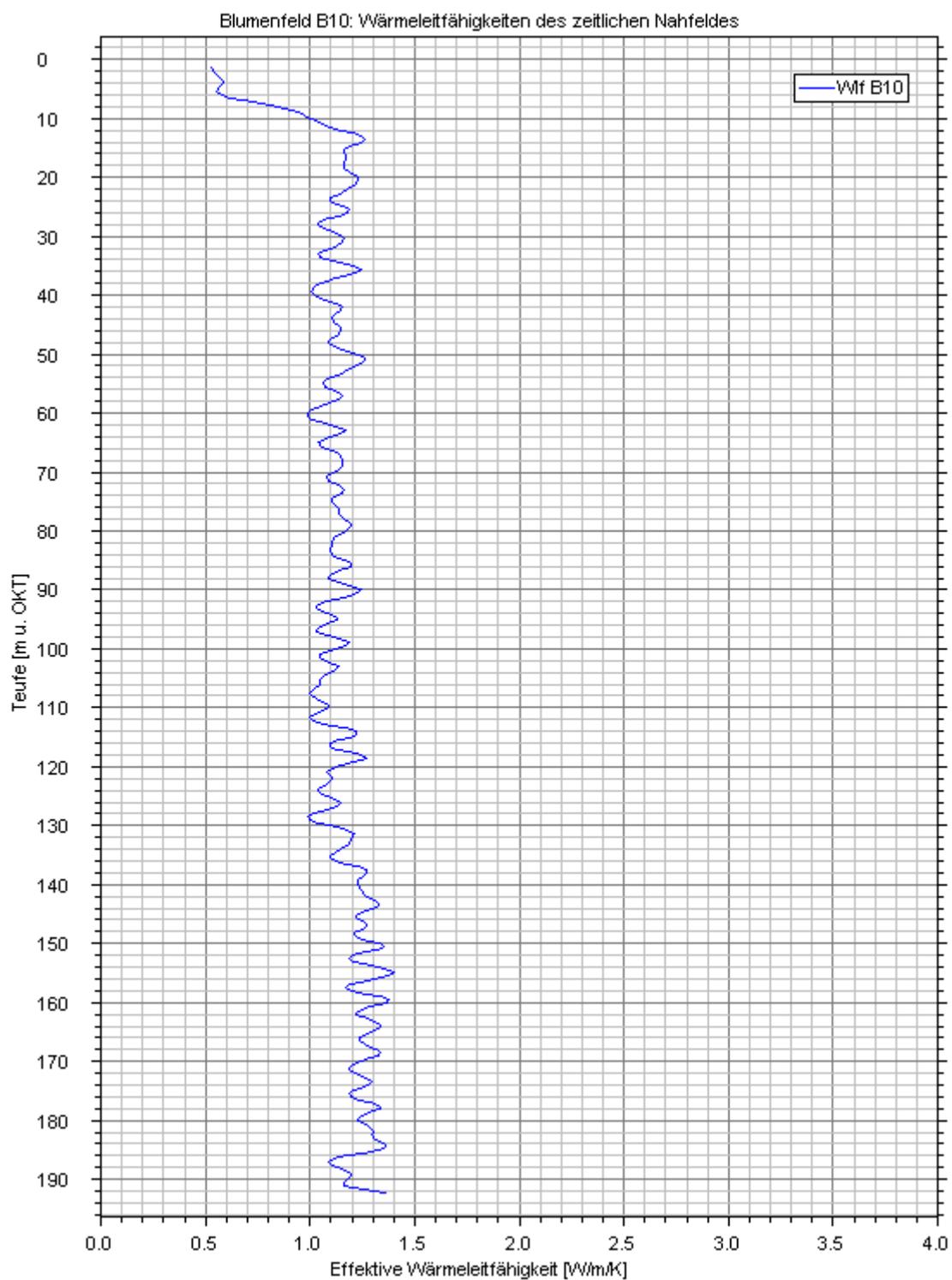
**Abbildung 11g**

Schulanlage Blumenfeld – B09: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



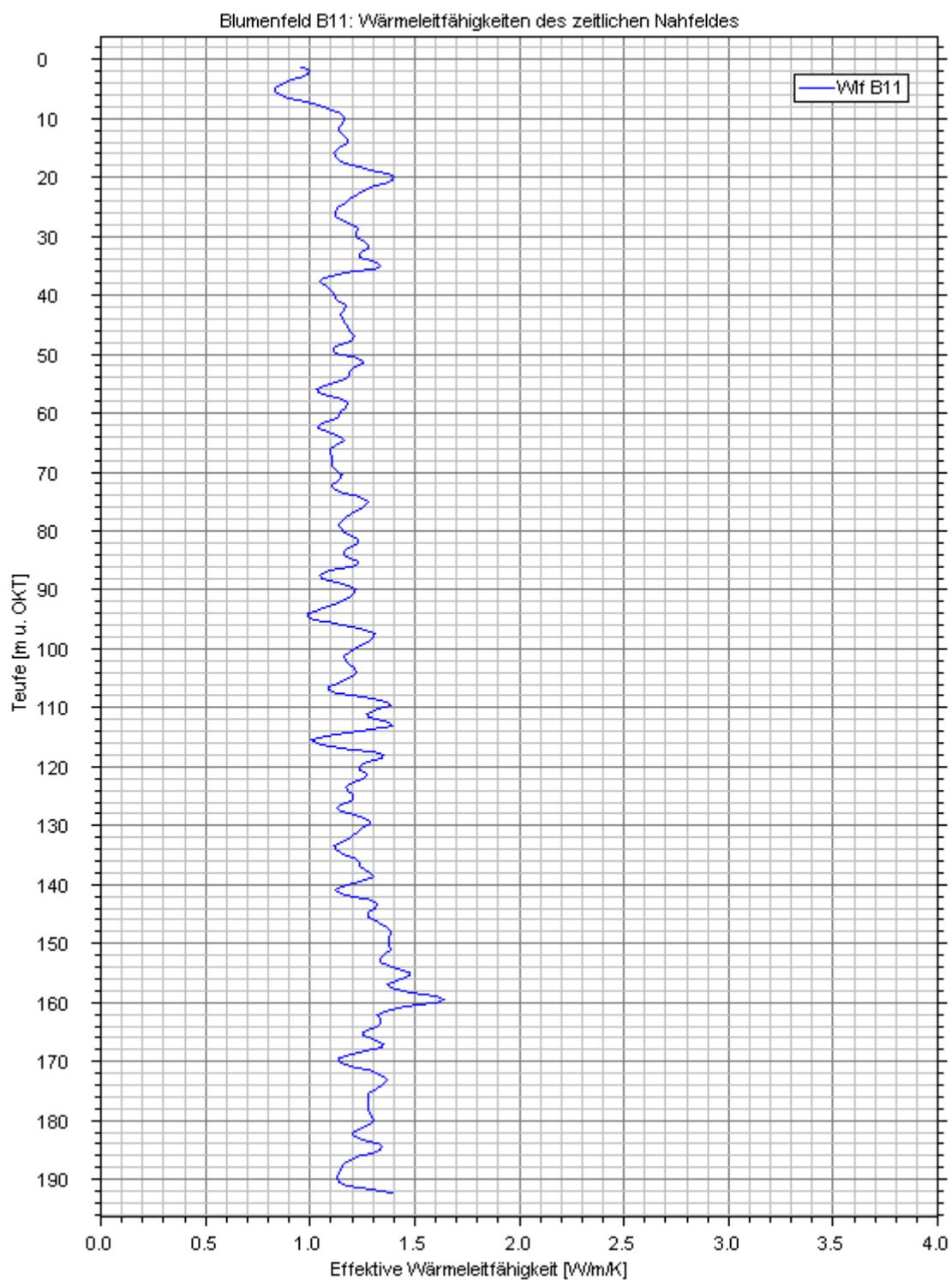
**Abbildung 11h**

Schulanlage Blumenfeld – B10: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



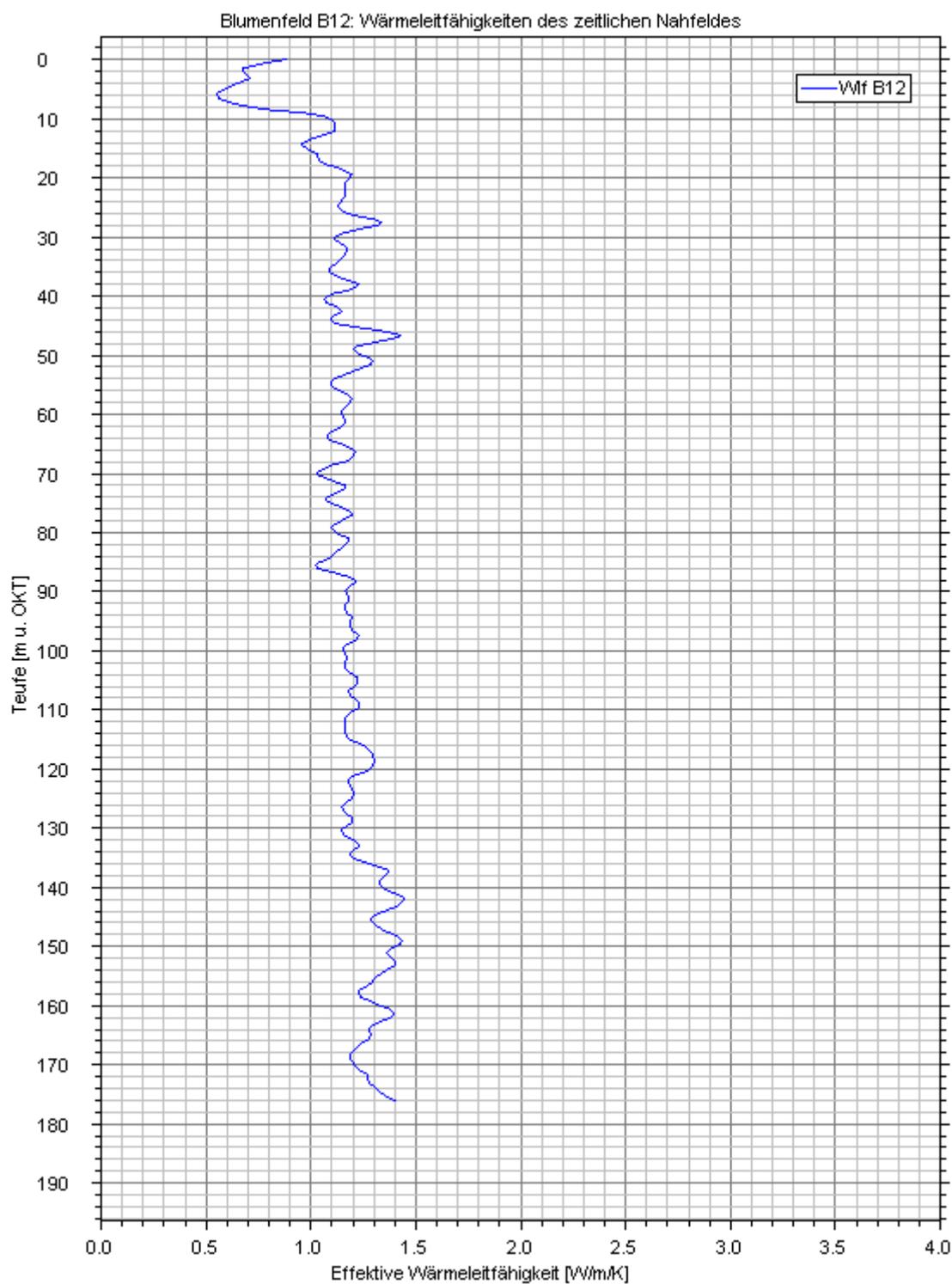
**Abbildung 11i**

Schulanlage Blumenfeld – B11: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



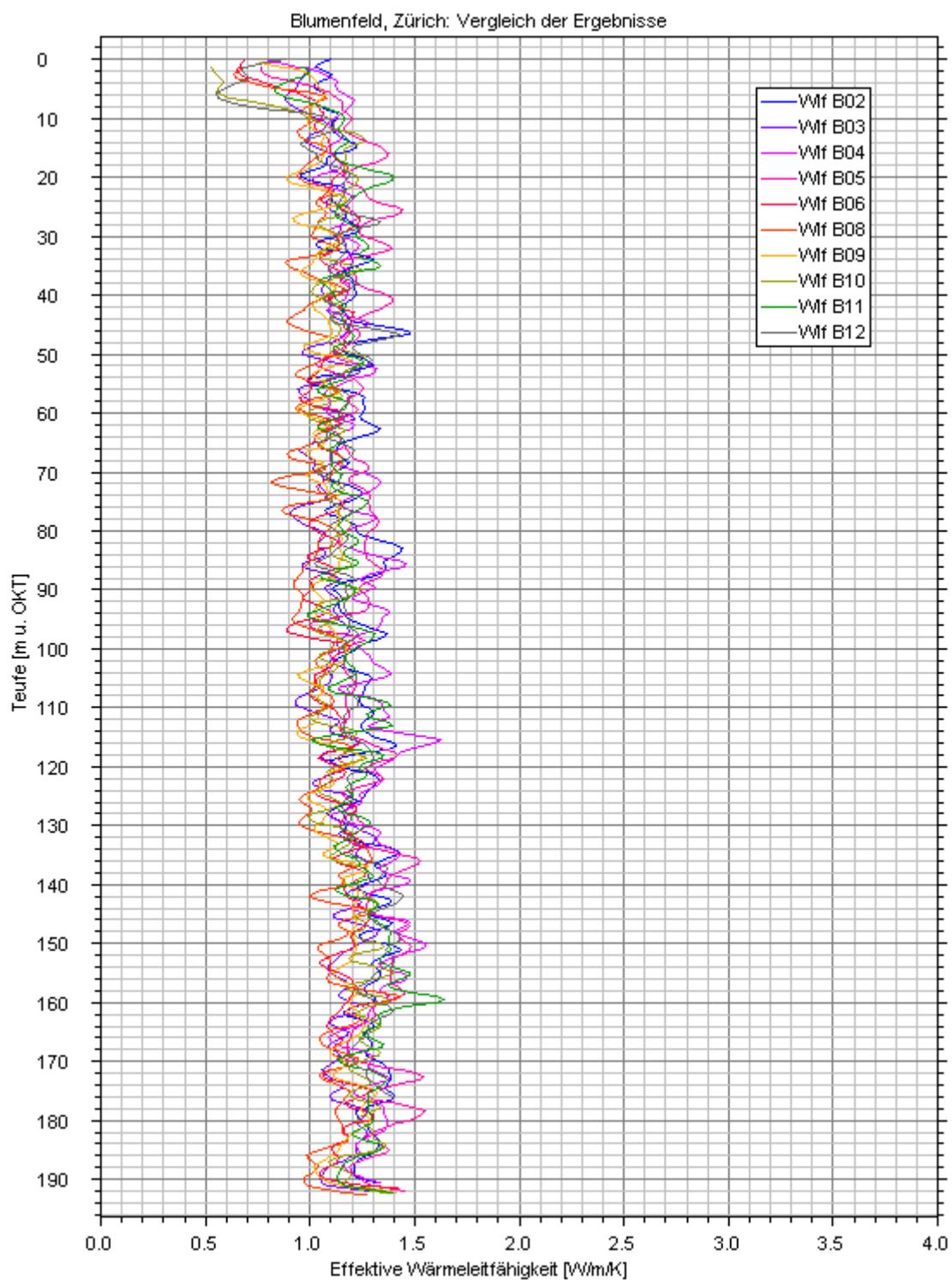
**Abbildung 11j**

Schulanlage Blumenfeld – B12: Effektive Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profil des zeitlichen Nahfeldes



**Abbildung 12**

Schulanlage Blumenfeld – Vergleich der Effektiven Wärmeleitfähigkeit-Tiefen-Profile des zeitlichen Nahfeldes



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

### **Einleitung**

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 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.

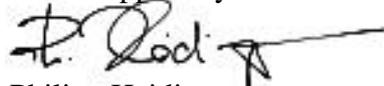
## Beispiele

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 .....	48
2.	Unvollständige Hinterfüllung mit Tonpellets .....	50
3.	Mangelhafte Hinterfüllung am Bohrlochtiefsten .....	52
4.	Anomalie am Bohrlochtiefsten.....	53
5.	Probleme bei der Hinterfüllung im Karst.....	54
6.	Fehlende Hinterfüllung .....	55
7.	Anomalie oberflächennah und im Bohrlochtiefsten.....	56
8.	Anomalien und erfolgreiche Abdichtung eines gespannten Aquifers.....	57

Karlsruhe, den 29. Januar 2016

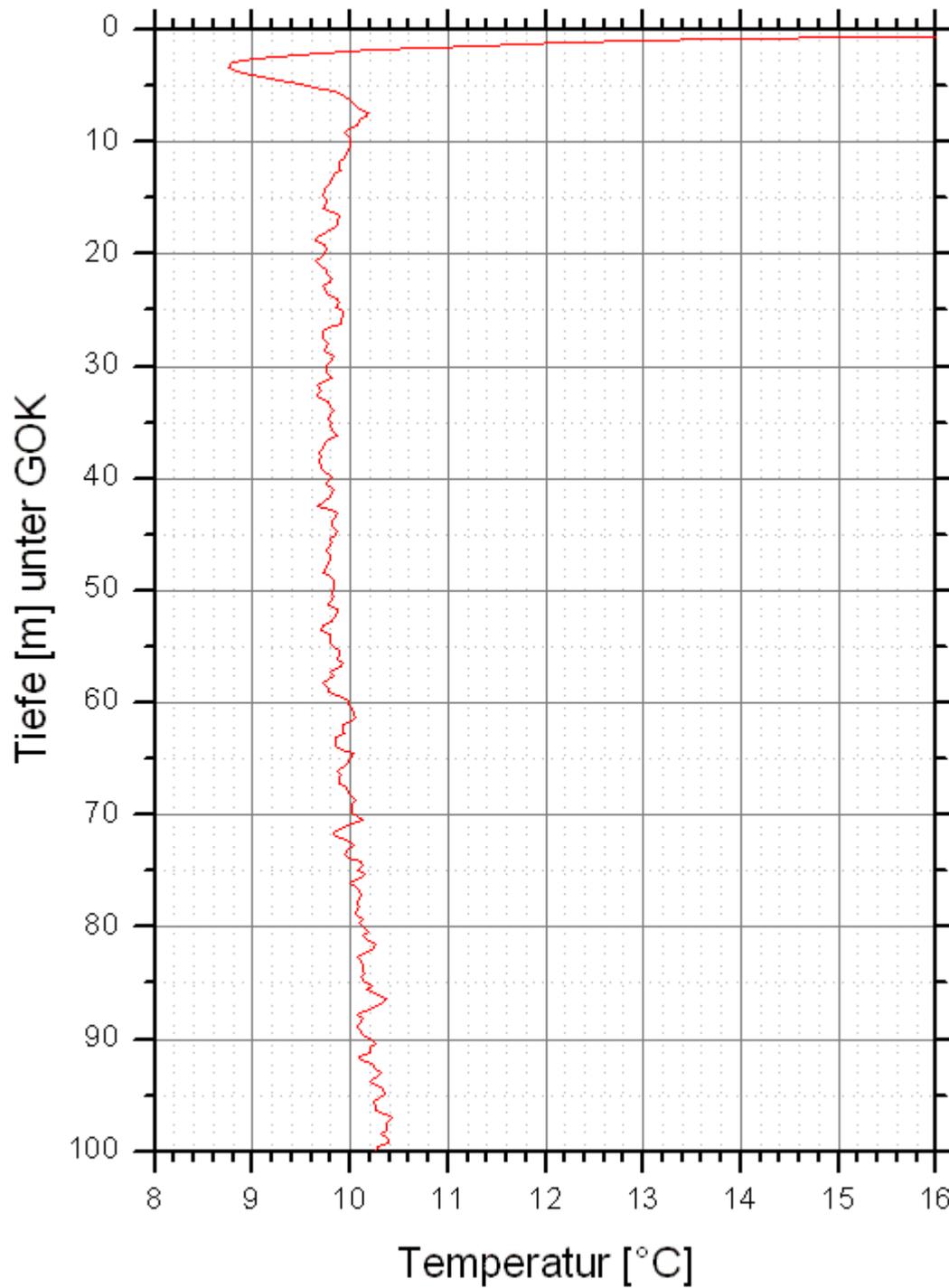
GTC Kappelmeyer GmbH

  
Philipp Heidinger

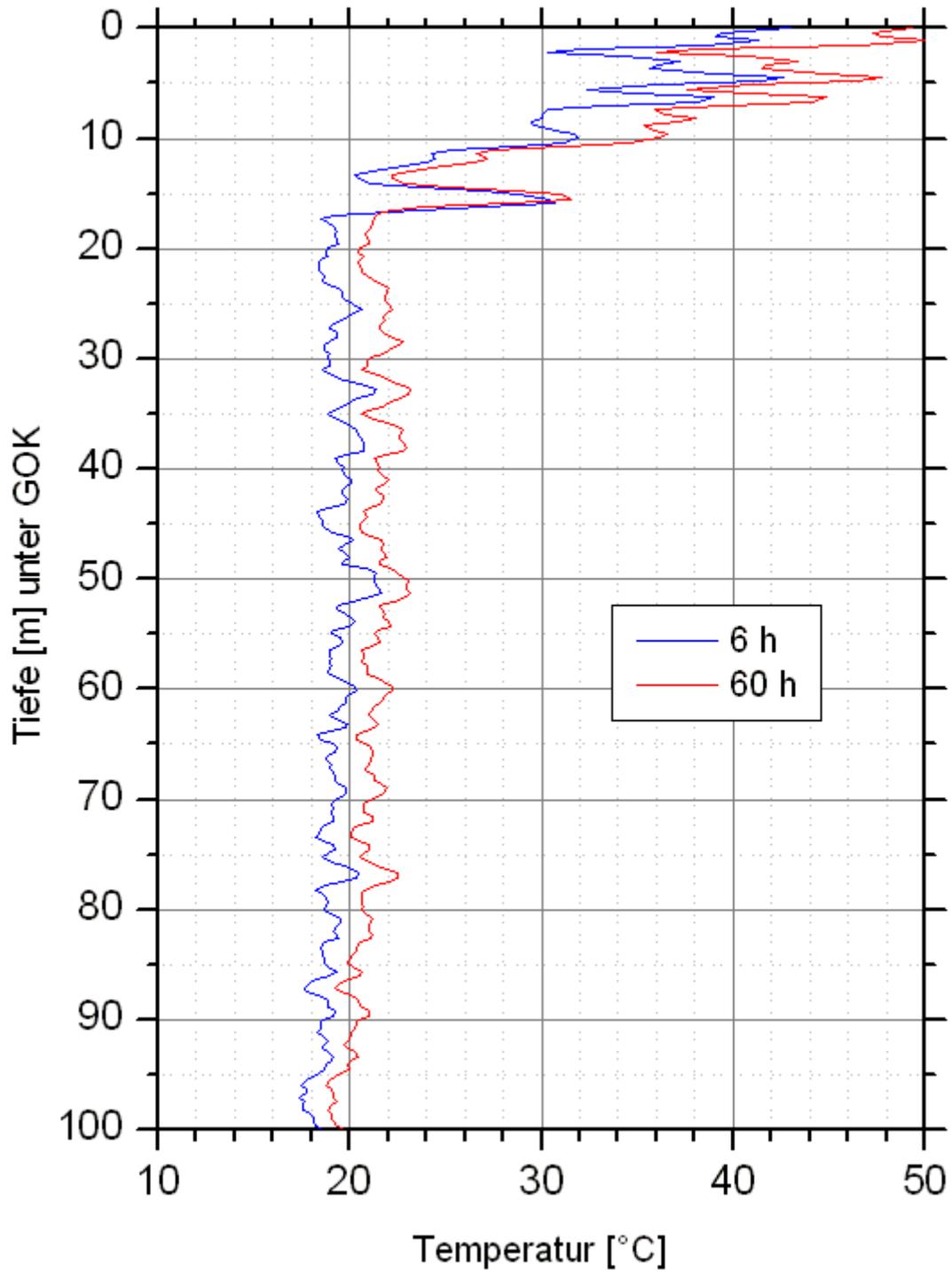
  
Axel Fabritius

### 1. Mangelhafte Ringraumverfüllung in etwa 15 m Tiefe

Besonderes, es wurde keine Auswertung des zeitlichen Nahfeldes durchgeführt.



**Abb. 1:** Temperatur – Tiefenprofil vor Beginn des Aufheizens



**Abb. 2:** Temperatur – Tiefenprofile für zwei verschiedene Zeiten ab Heizbeginn. Im luftgefüllten Hohlraum findet eine starke Aufheizung statt.

## 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

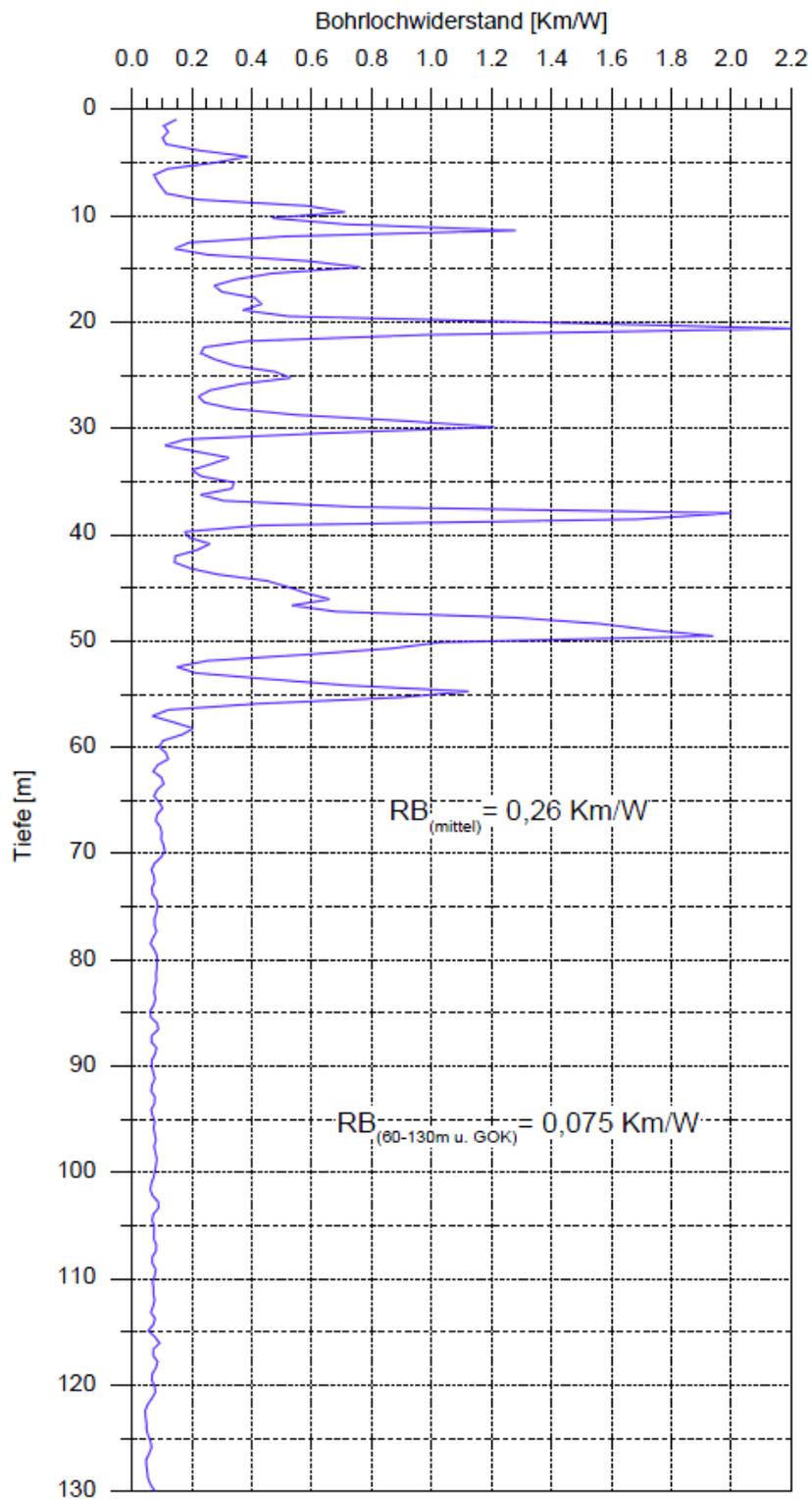
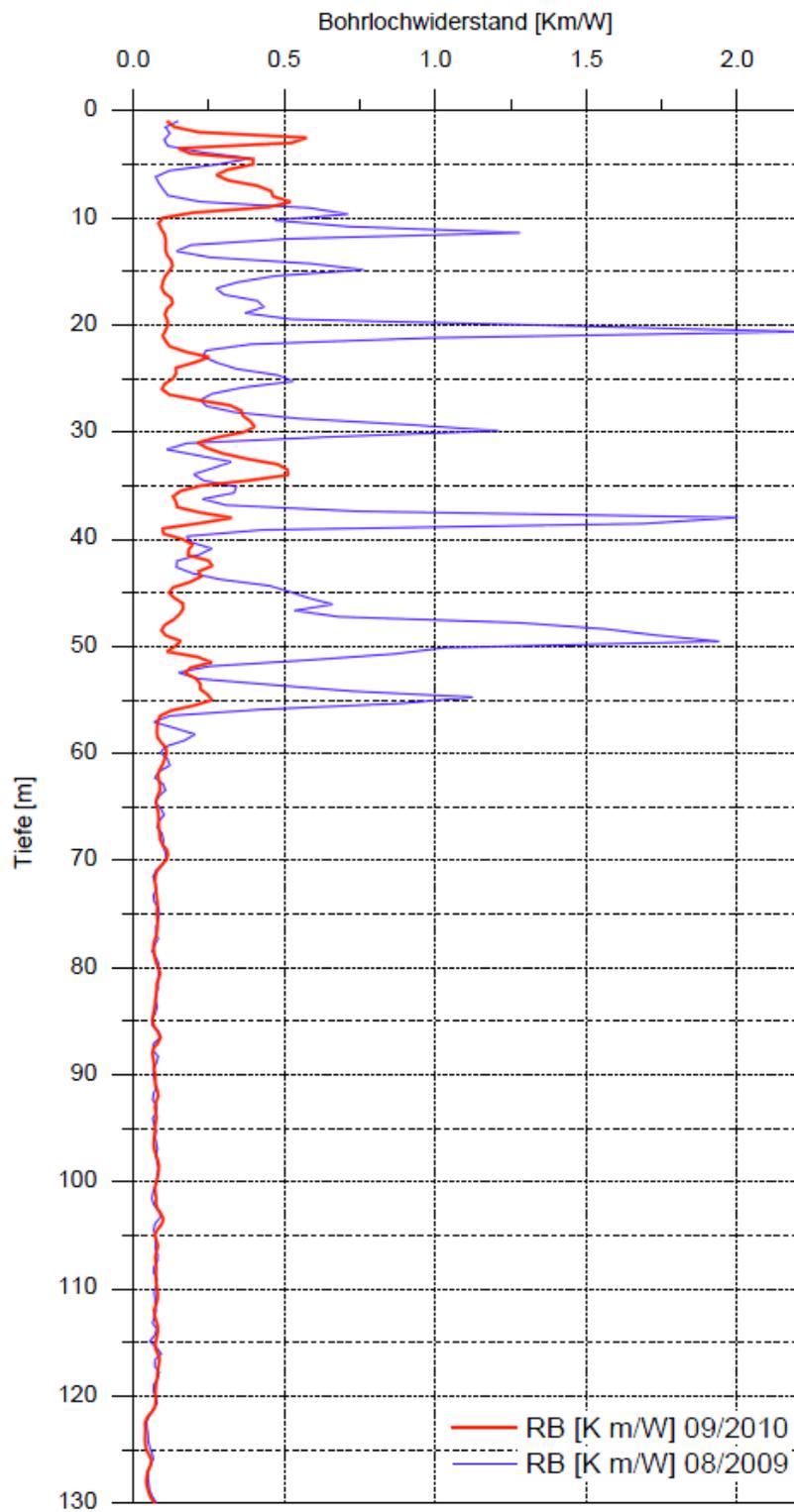


Abb. 3: Bohrlochwiderstand

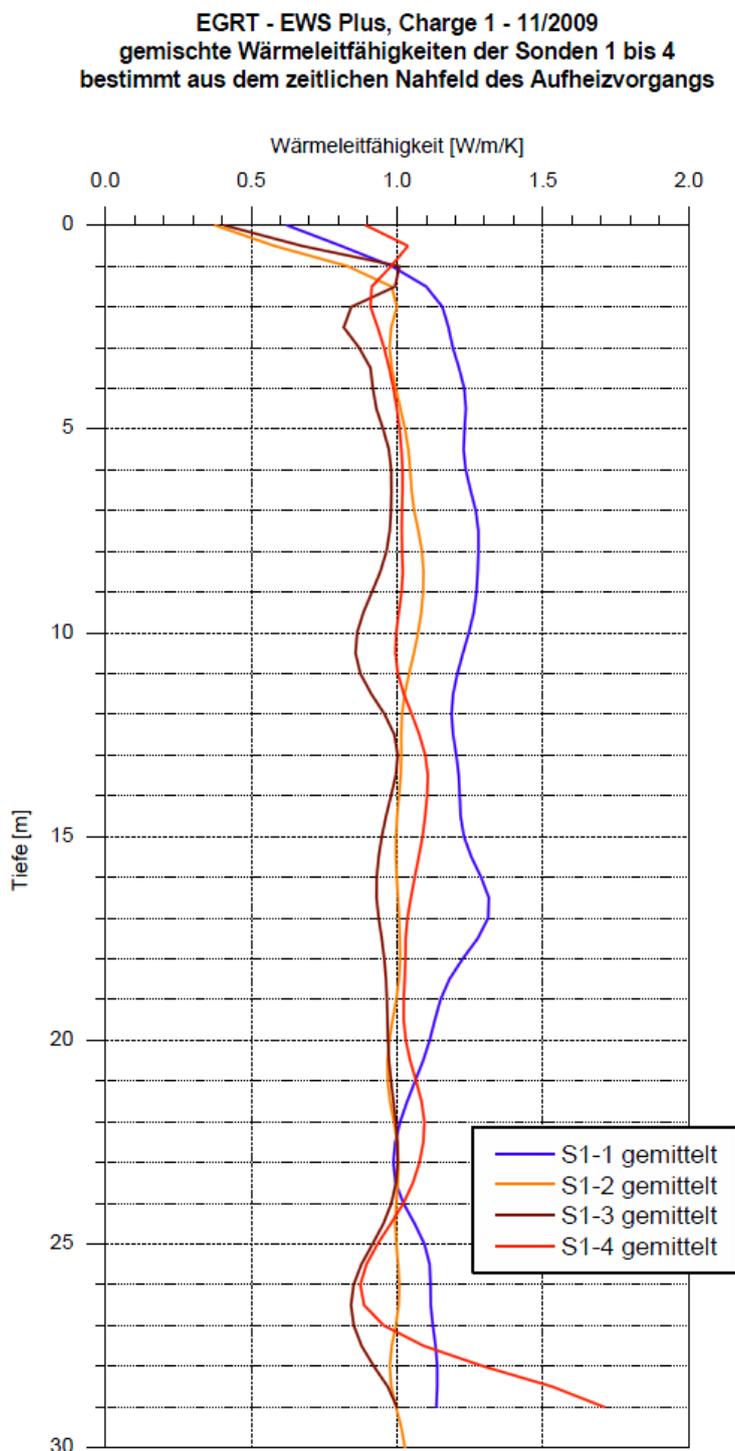
Die Messung wurde ein Jahr später wiederholt. Wie zu sehen ist, quellen die Tonpellets langsam nach.



**Abb. 4:** Bohrlochwiderstand

### 3. Mangelhafte Hinterfüllung am Bohrlochtiefsten

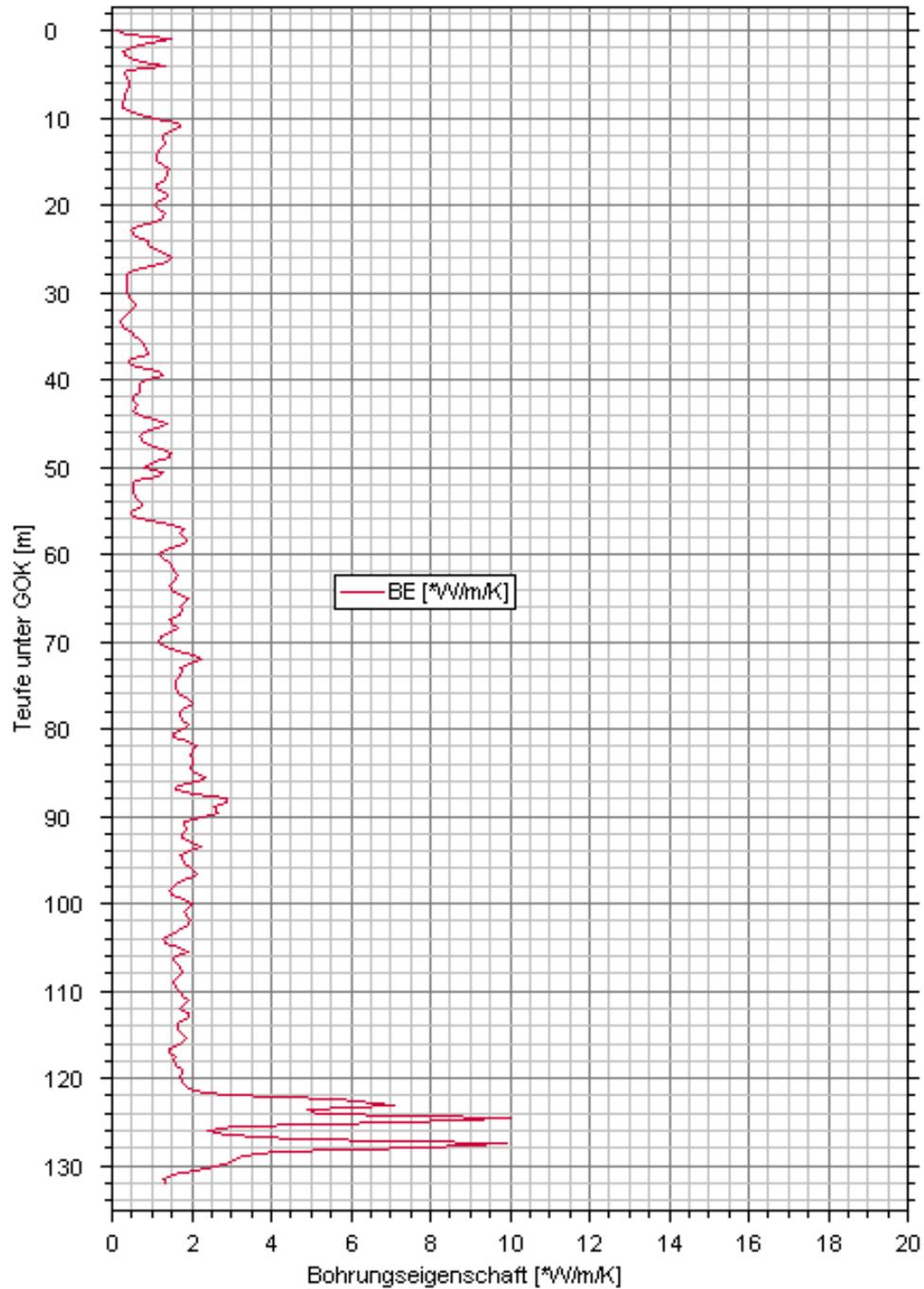
Besonderes: Nicht anonymisiert, da Forschungsprojekt. Verschiedene Füllmaterialien. Sonde 4 (S1-4 in der Graphik: Charge 1 - Bohrung 4) am Bohrlochtiefsten (ab 28 m bis 30,5 m Tiefe) nicht hinterfüllt, absichtliche Fehlstelle.



**Abb. 5:** Effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes

#### 4. Anomalie am Bohrloch tiefsten

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



**Abb. 6:** Effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes

## 5. Probleme bei der Hinterfüllung im Karst

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

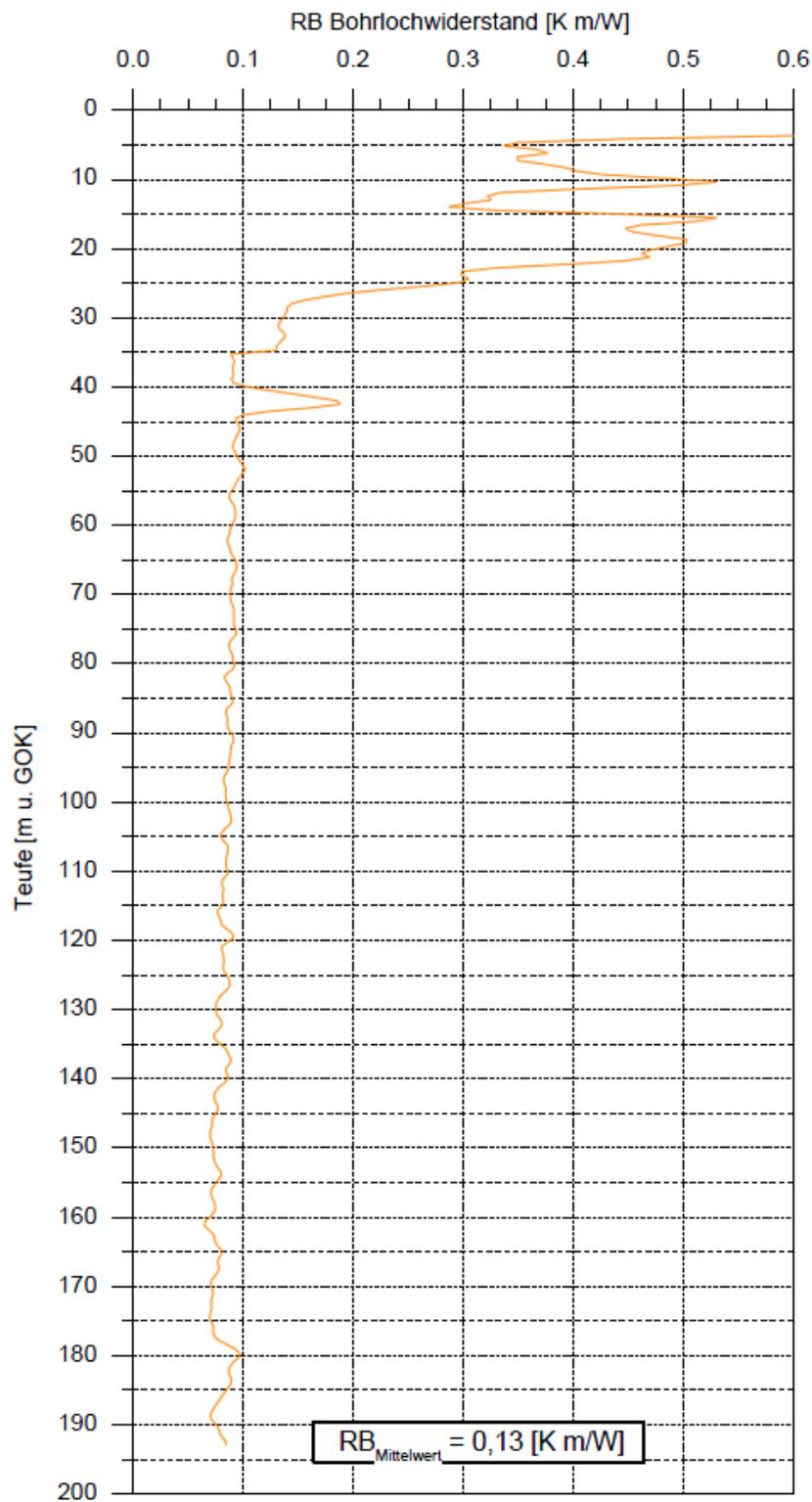
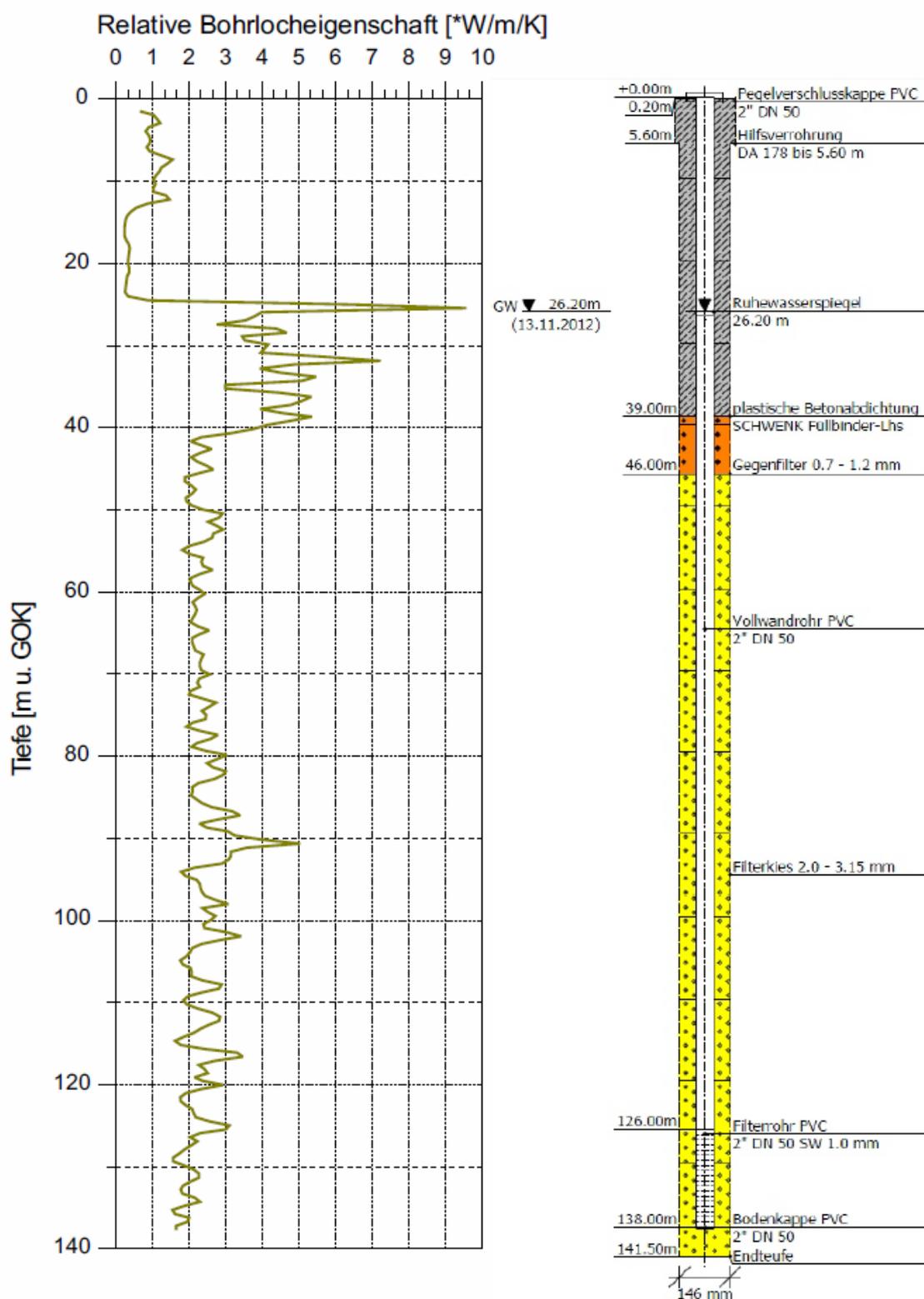


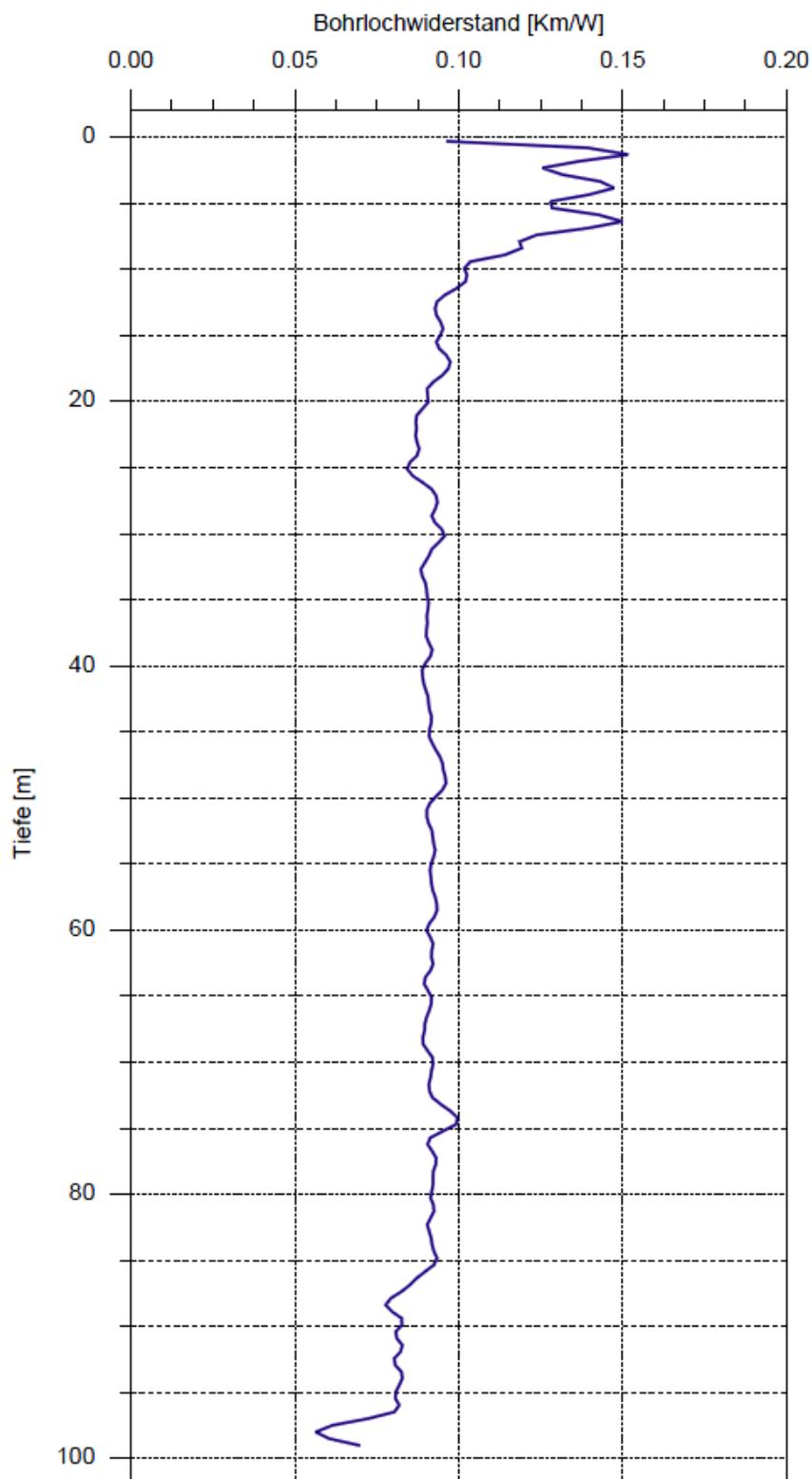
Abb. 7: Bohrlochwiderstand

## 6. Fehlende Hinterfüllung



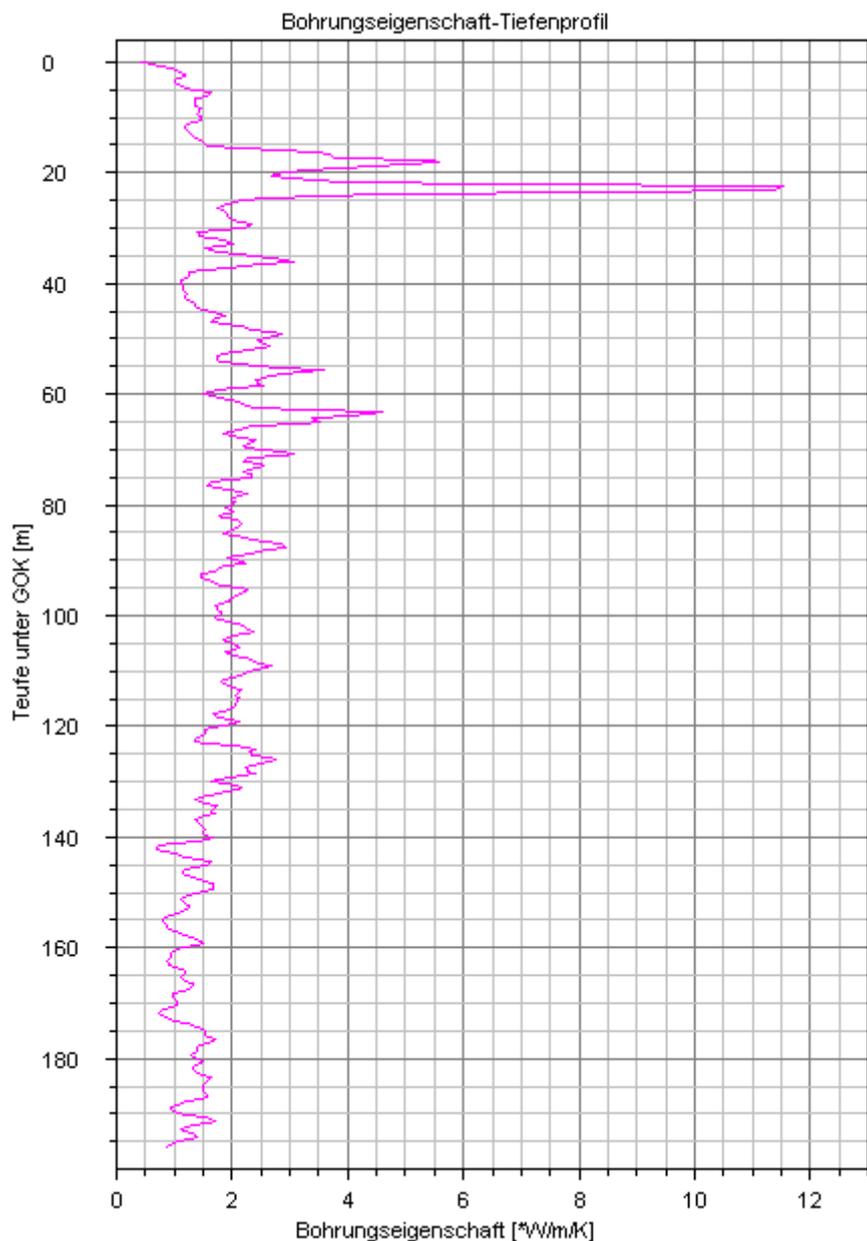
**Abb. 8:** Effektive Wärmeleitfähigkeiten des zeitlichen Nahfeldes. Deutlich zu erkennen das Verhalten bei fehlender Hinterfüllung: in Luft geringe Wlf und in Wasser sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten.

## 7. Anomalie oberflächennah und im Bohrlochtiefsten



**Abb. 9:** 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.

## 8. Anomalien und erfolgreiche Abdichtung eines gespannten Aquifers



**Abb. 10:** Dargestellt ist die effektive Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes, hier Bohrungsseigenschaft genannt. Es sind mehrere unterschiedlich stark ausgeprägte Anomalien zu erkennen: im Bereich von 15 bis 25 m sowie im Bereich von 55 bis 65 m u. GOK. Hingegen wurde ein wichtiger und problematischer Bereich ab 100 m Tiefe, wo ein gespannter Aquifer mit einem Zufluss von ca. 170 L/min angetroffen wurde, erfolgreich abgedichtet. Dies konnte dadurch, dass dort keine Anomalien erkennbar sind und auch das Ruheprofil und die absoluten Temperaturänderungen beim EGRT (beides hier nicht dargestellt) sich dort unauffällig zeigten, nachgewiesen werden.