

BV Corps Grand-Ducal
16, Allee John W. Leonard
7525 Mersch
Luxemburg

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes
mittels Geothermal Response Test (GeRT)

erstellt von:



UBeG GmbH & Co. KG
Reinbergstraße 2 35580 Wetzlar – Nauborn
Tel.: 06441/212910 Fax: 06441/212911
Email: UBeG@UBeG.de www.UBeG.de

Datum: 29. Oktober 2024

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORGANG UND AUFTRAG	3
2	BOHRUNG UND SONDENERSTELLUNG	3
3	GEOHERMAL RESPONSE TEST	3
3.1	Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten	4
3.2	Versuchsauswertung	4
3.2.1	Basisdaten	4
3.2.2	Messdaten	5
3.2.3	Ergebnis des Response-Tests	6
3.2.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	6
3.2.5	Temperaturprofile	7
4	ZUSAMMENFASSUNG	8
5	FOTODOKUMENTATION	9
6	LITERATUR.....	10
7	ANHANG: INFORMATIONEN ZUM GEOHERMAL RESPONSE TEST (GERT)	11
7.1	Allgemeines zu Geothermal Response Tests.....	11
7.2	Durchführung eines GeRT	13
7.3	Auswertung eines GeRT	14
7.3.1	Auswertung mit Linienquellentheorie	15
7.3.2	Parameteridentifikation mit numerischer Simulation	16
7.3.3	Parameteridentifikation durch Superposition der Linienquellenapproximation (Superpositionsverfahren)	17
7.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	18

1 Vorgang und Auftrag

Durch das ausführende Bohrunternehmen Ehlen & Söhne GmbH, Auf dem Lüh 1, 54578 Wiesbaum wurde UBeG beauftragt, am Standort des BV Corps Grand-Ducal, 16, Allee John W. Leonard in 7525 Mersch, Luxemburg an einer Erdwärmesonde einen Geothermal Response Test zur Bestimmung der Untergrundwärmeleitfähigkeit, des thermischen Bohrlochwiderstandes und der Untergrundtemperatur auszuführen.

Vorgang und
Auftrag

Der Geothermal Response Test wurde in dem Zeitraum **07.10. – 10.10.2024** ausgeführt. Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der Testdurchführung dargestellt.

2 Bohrung und Sondenerstellung

Die Bohrung wurde durch den Auftraggeber **bis ca. 50 m Tiefe** unter der aktuellen Geländeoberfläche niedergebracht und zur Erdwärmesonde ausgebaut.

EWS

Der Bohrdurchmesser beträgt bis zur Endtiefe 142 mm. Der Durchmesser der bis 11 m Tiefe mitgeführten Schutzverrohrung beträgt 168 mm. Daraus ergibt sich ein mittlerer Bohrlochdurchmesser über die Erdwärmesondenlänge von 147,8 mm.

Bei den Bohrarbeiten wurden überwiegend Mergel- und Sandsteine angetroffen.

Es wurde eine **Doppel-U-Erdwärmesonde PE 100 RC** mit der Rohrdimension **DA 32** eingesetzt.

Die Verfüllung des Bohrlochringraumes erfolgte mit dem Material **ThermoCem basic von Heidelberg Materials**.

Die Test-Erdwärmesonde wurden am 30.09.2024 fertig gestellt.

3 Geothermal Response Test

Allgemeine Informationen zum Aufbau, Durchführung und Auswertung eines Geothermal Response Tests sind im Anhang des vorliegenden Berichtes dargestellt und erläutert. Über einen Geothermal Response Test kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, sowie der thermische Bohrlochwiderstand der Erdwärmesonde bestimmt werden. Die Messung einer spezifischen Entzugsleistung der Erdwärmesonde ist über den Geothermal Response Test nicht möglich.

Informationen
zum GeRT

3.1 Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten

Am Montag, den 07.10.2024 wurde die Messapparatur an die Test-Erdwärmesonde angeschlossen und in Betrieb genommen.

Geländearbeiten

Der Test lief ohne Unterbrechung bis zum Donnerstag, den 10.10.2024.

Zur Ermittlung der Untergrundtemperatur wurde unmittelbar vor Testbeginn in der Erdwärmesonde ein Tiefen-Temperaturprofil aufgenommen.

Um das Abkühlverhalten der Erdwärmesonde zu ermitteln, wurden 1 h, 2 h und 3 h nach Testende in der Erdwärmesonde Tiefen-Temperaturprofile aufgenommen.

3.2 Versuchsauswertung

3.2.1 Basisdaten

- Erdwärmesondenlänge: ca. 49 m
- Erdwärmesondentyp: Doppel-U, DA 32
- Mittlerer Bohrlochdurchmesser: 147,8 mm
- Messzeitraum: 70,33 h

Basisdaten

3.2.2 Messdaten

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf am Gerät über den Messzeitraum, die vom Testgerät abgegebene thermische Leistung und die Durchflussrate.

Messdaten

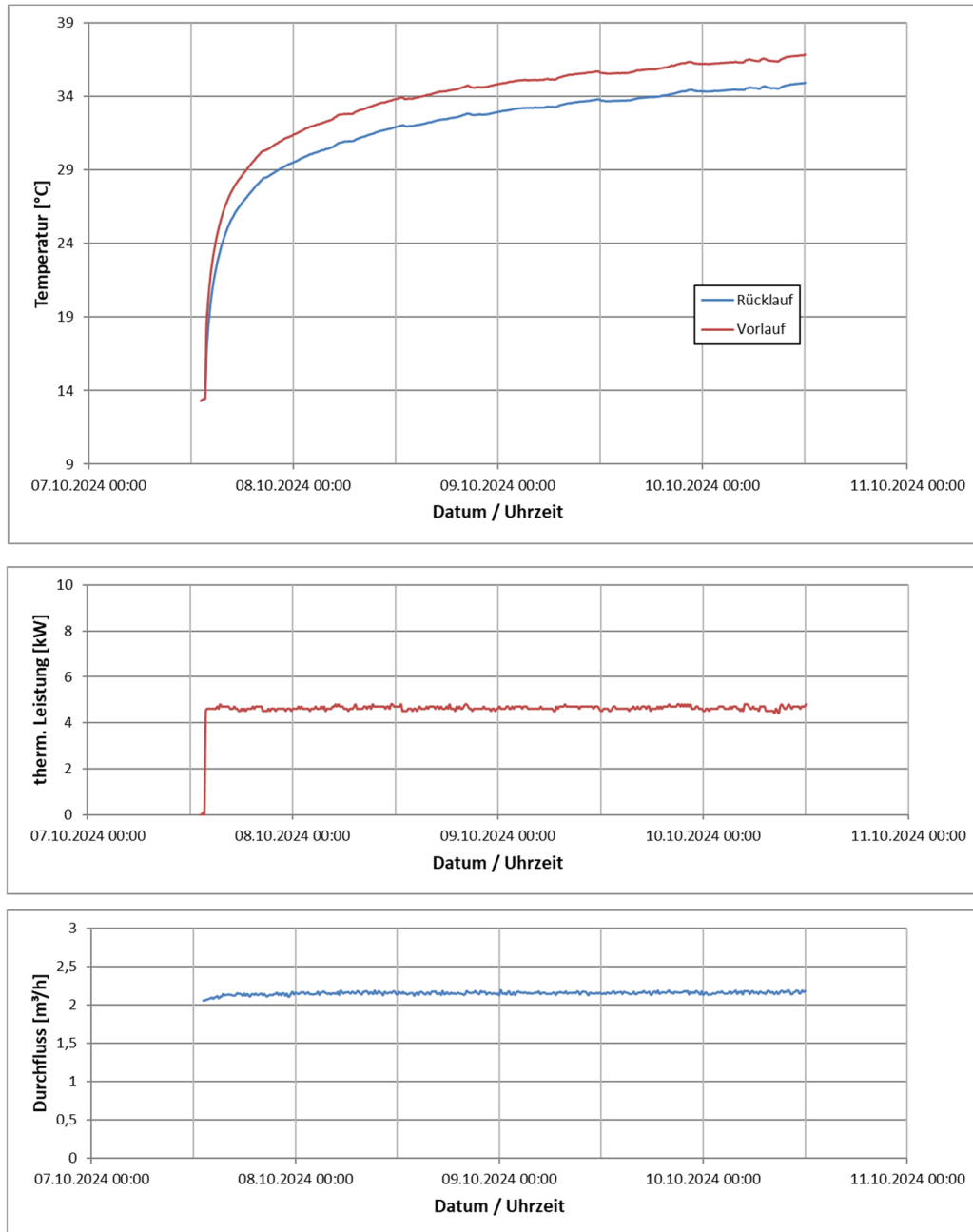


Abbildung 1: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung und Durchfluss des Testgeräts

- Mittlere Heizleistung des Testgeräts 4.642 W
- Heizarbeit über 70,33 h 326,5 kWh

3.2.3 Ergebnis des Response-Tests

Die Auswertung wurde mit der Software GeRT-CAL durchgeführt. Die Software arbeitet nach den in Abschnitt 7.3 dargestellten Rechenregeln.

Ergebnis

Der Geothermal Response Test ergibt für den Untergrund am Standort des BV Corps Grand-Ducal in Mersch, Luxemburg eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von

$$\lambda_{\text{eff}} = 2,8 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,097 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

errechnet.

3.2.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Für den durchgeführten Test ist das Ergebnis der stufenweisen Auswertung in der Abbildung 2 (blaue Kurve) dargestellt. Die roten Linien bezeichnen den gem. VDI 4640-5 zulässigen Variationsbereich ($\pm 5\%$). Die in der Richtlinie geforderte Konstanz über mindestens 20 Stunden wird eingehalten.

Stufenweise
Auswertung

Es sind die Ergebnisse ab Überschreitung des Mindestzeitkriteriums (6,3 h) dargestellt.

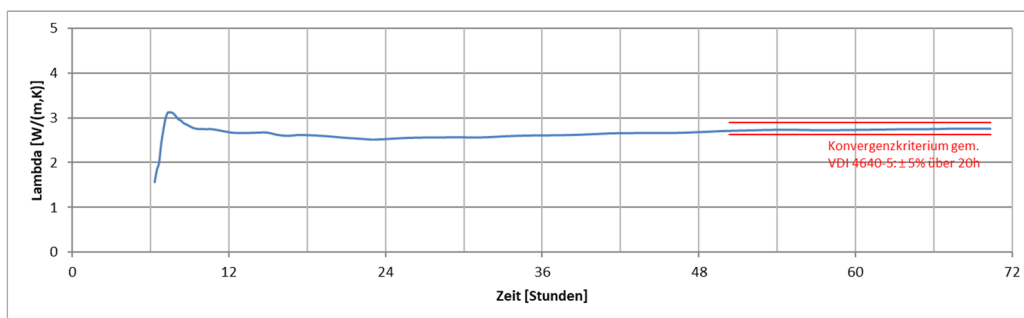


Abbildung 2: Stufenweise Auswertung

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich das Testergebnis bei einem Wert von ca. 2,8 W/(m·K) stabilisiert. Die Testzeit ist ausreichend lang.

3.2.5 Temperaturprofile

Zur Ermittlung der initialen Untergrundtemperatur wurde unmittelbar vor Testbeginn in der Erdwärmesonde ein Tiefen-Temperaturprofil in ca. 1 m-Schritten aufgenommen.

Temperaturprofile

Um das Abkühlverhalten der Erdwärmesonde zu ermitteln, wurden 1 h, 2 h und 3 h nach Testende in der Erdwärmesonde Tiefen-Temperaturprofile aufgenommen.

Die Messwerte sind in Abbildung 3 dargestellt.

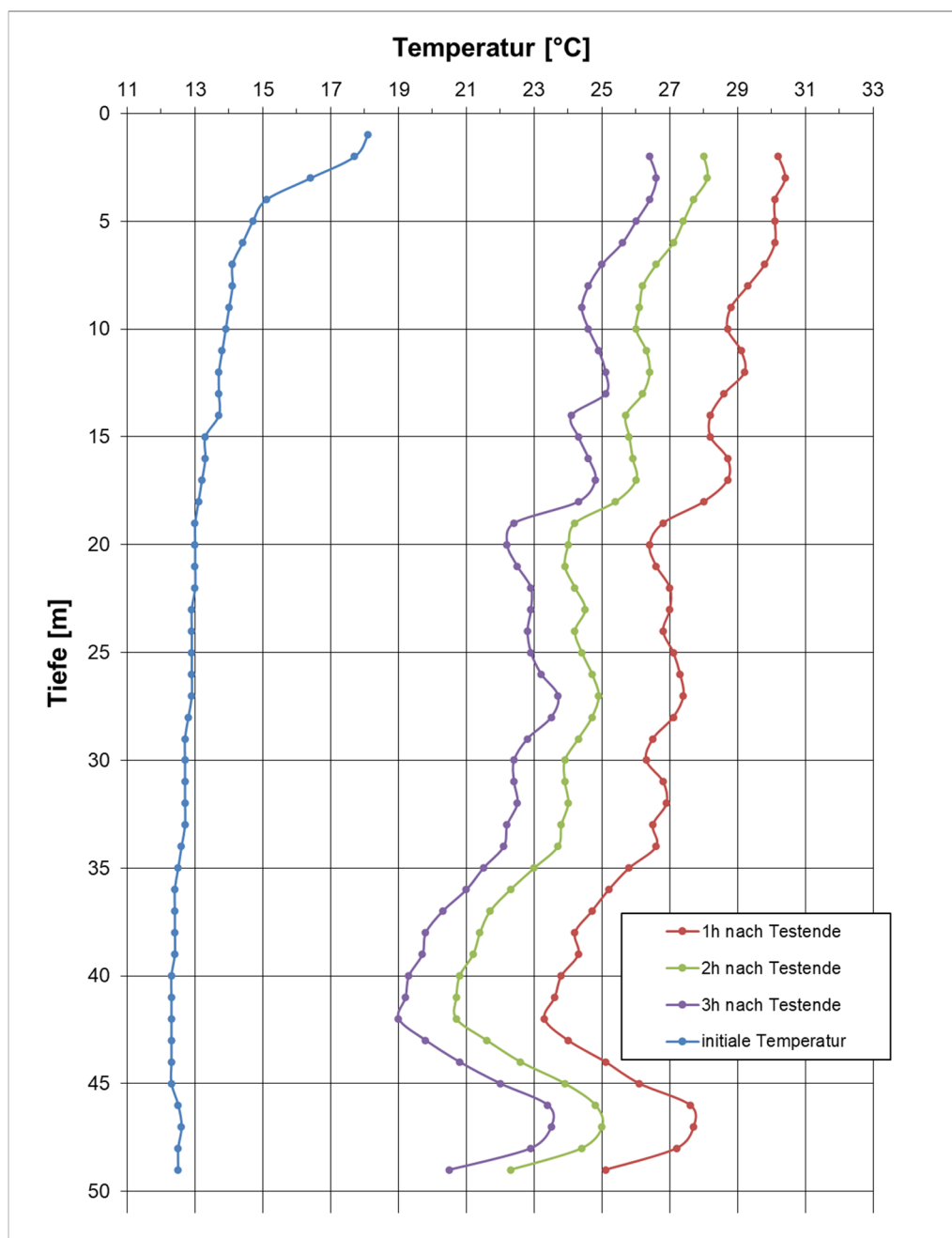


Abbildung 3: Temperaturprofile

Die Messungen vor dem Test wurden mit einer kabelgebundenen Messsonde (Temperatur-Lichtlot) Fabrikat HT-Hydrotechnik durchgeführt.

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10 m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils vor der Testausführung eine mittlere Erdreichtemperatur von ca. 12,8 °C.

Aus der qualitativen Auswertung der nach Testende aufgenommenen Tiefentemperaturprofile ist über den erfassten Tiefenbereich **keine signifikante Beeinflussung der Testsonde durch fließendes Grundwasser zum Zeitpunkt der Messung erkennbar**.

4 Zusammenfassung

Am Standort der Baumaßnahme Corps Grand-Ducal, 16, Allee John W. Leonard in 7525 Mersch, Luxemburg wurde an einer ca. 49 m tiefen Erdwärmesonde in dem Zeitraum vom 07.10. bis 10.10.2024 ein Geothermal Response Test ausgeführt.

Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst:

Wärmeleitfähigkeit λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	2,8
Thermischer Bohrlochwiderstand r_b [$\frac{m \cdot K}{W}$]	0,097
Erdreichtemperatur T_0 [°C] (10 m bis Endteufe)	12,8

Diese Stellungnahme gilt nur in ihrer Gesamtheit.

Wetzlar, den 29.10.2024

UBeG GmbH & Co. KG


 Dipl.-Geol. Marc Sauer



5 Fotodokumentation



Foto 1: Durchführung des Geothermal Response Test



Foto 2: Erdwärmesonde nach Abbau des Geothermal Response Tests

6 Literatur

Literatur

SANNER, B., REUSS, M. & MANDS, E. (1999): Thermal Response Test - eine Methode zur In-Situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. - Geothermische Energie 24-25/99, S. 29-33, Geeste

VDI 4640 (2020): Thermische Nutzung des Untergrunds, Bl. 5 – Beuth-Verlag, Berlin

MANDS, E., SANNER, B. & GRUNDMANN, E. (2001): Kommerzielle Thermal Response Tests in Deutschland. - in: Eugster, W. & Laloui, L., Proc. Workshop Geothermische Response Tests Lausanne, S. 30-36, GtV, Geeste

SANNER, B., HELLSTRÖM, G., SPITLER, J. & GEHLIN, S. (2005): Thermal Response Test – current status and world-wide application. – Proc. WGC 2005, paper No. 1436, CD-ROM, IGA, Reykjavik

SANNER, B., MANDS, E., SAUER, M. & GRUNDMANN, E. (2007): Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test, Proceedings, EGC 2007 Unterhaching

SAUER, M., MANDS, E., SANNER, B. & GRUNDMANN, E. (2007): Wirtschaftliche Aspekte beim Einsatz von Geothermal-Response-Tests, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2007 Bochum

SAUER, M., MANDS, E., SANNER, B. & GRUNDMANN, E. (2008): Thermal Response Tests in Europa – von Irland bis Griechenland, Tagungsband, Der Geothermiekongress 2008, Karlsruhe

MANDS, E., SAUER, M., GRUNDMANN, E., LANGGUTH, K., SANNER, B. & GÄBLER, W. (2008): Stand der technischen Entwicklung oberflächennaher Geothermie in Deutschland, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 59, 12/08, Bonn

SANNER, B., MANDS, E., SAUER, M. & GRUNDMANN, E. (2009): Economic aspects of thermal response test – Advantages, technical improvements, commercial application, Proceedings, Effstock 2009, Stockholm

SAUER, M. (2009): Praxiserfahrungen mit der Auswertung des Geothermal Response Tests, Tagungsband, Symposium 10 Jahre Thermal Response Test in Deutschland, Göttingen, 2009

SAUER, M., MANDS, E., GRUNDMANN, E. & SANNER, B. (2010): Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten des Geothermal Response Test: Bestimmung der Erdwärmesondenlänge mittels Thermoimpuls. – Tagungsband Geothermiekongress 2010, Karlsruhe, paper F11.4, 7 p., GtV-BV, Berlin

SAUER, M. (2013): Evaluating improper response test data by using superposition of line source approximation, Proceedings, EGC 2013 Pisa

7 Anhang: Informationen zum Geothermal Response Test (GeRT)

7.1 Allgemeines zu Geothermal Response Tests

Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrunds eine Grundvoraussetzung. Während bei kleinen Anlagen die Werte meist geschätzt werden und bei der Auslegung entsprechende Sicherheiten berücksichtigt werden müssen oder die Auslegung gleich nach Erfahrungswerten vorgenommen wird, sind für größere Anlagen Untergrunduntersuchungen bis hin zu Probebohrungen erforderlich. Über solche Probebohrungen, die Teil der Gesamtanlage werden, lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds mittels Geothermal Response Test bestimmen.

Allgemeines

Der Geothermal Response Test (GeRT) wird international auch als Thermal Response Test (TRT) bezeichnet. Für einen GeRT wird eine definierte Wärmelast (Heizen oder Kühlen) an eine Erdwärmesonde angelegt und die Temperaturentwicklung des Wärmeträgermediums bei Sondenein- und -austritt über die Zeit aufgezeichnet. Diese Temperaturänderung erlaubt die Ermittlung thermischer Parameter und die Vorhersage der zukünftigen Temperaturentwicklung in den Erdwärmesonden. Ein Verfahren dazu ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds als Grundlage weiterer Berechnungen, wobei vorwiegend konduktiver Wärmetransport im Untergrund vorausgesetzt wird. Bei Untergrundverhältnissen, die nach vorliegenden Informationen oder als Ergebnis einer Bohrung einen deutlichen Grundwasserfluss erwarten lassen, kann ein GeRT keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern. Ob ein GeRT bei Vorhandensein von Grundwasser noch gültig ist, kann z.B. durch eine stufenweise Auswertung geprüft werden (s. 7.4).

Der GeRT wird mit einer mobilen Einrichtung durchgeführt, die direkt zum Bohrloch gebracht wird (Abbildung A1). Gerät und Testdurchführung müssen folgenden Bedingungen genügen:

- Die Wärme- oder Kälteleistung muss so gleichmäßig wie möglich sein.
- Die Temperaturen sind am Ein- und Austritt der Erdwärmesonde zu messen.
- Die Minstdauer eines Tests (eine Leistungsstufe) beträgt ca. 48 Stunden.

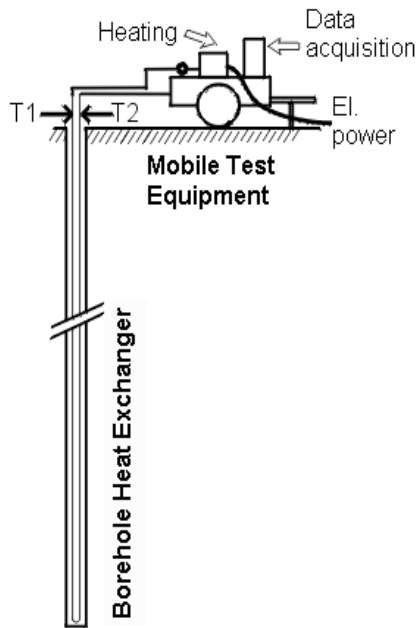
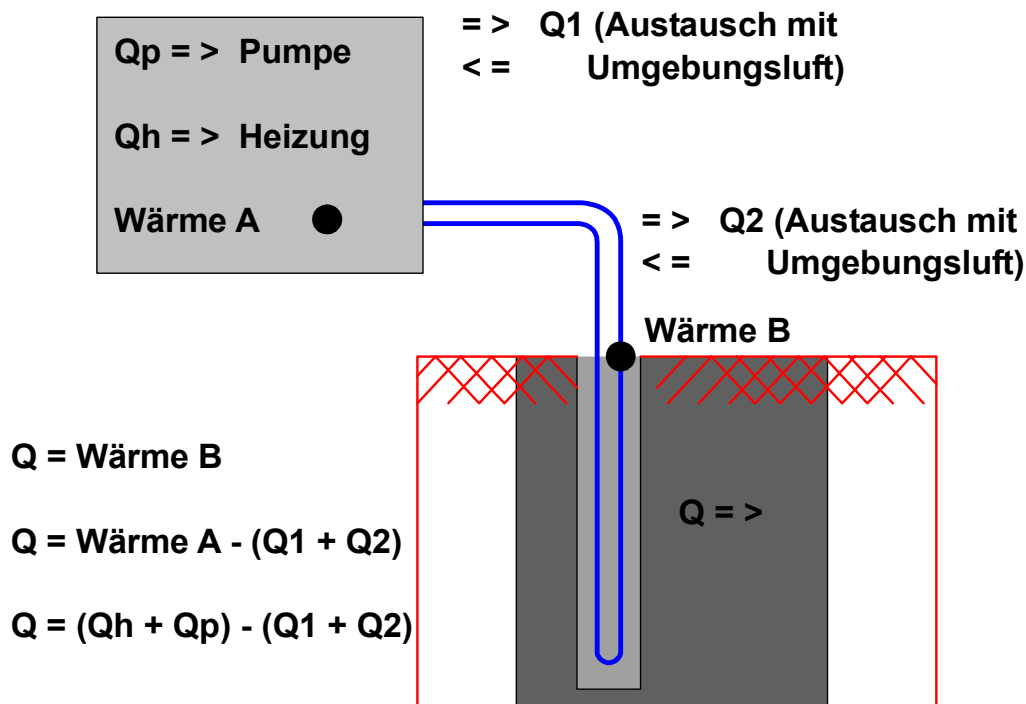


Abbildung A1: Schema eines Geothermal Response Test (GeRT, links) und Durchführung eines Geothermal Response Test mit modernem Gerät von UBeG (rechts)

Das Gerät muss in der Lage sein, eine stabile thermische Leistung zu erbringen. Dabei sollte die Einstellung verschiedener Laststufen möglich sein. Auch die immer erforderliche Umwälzpumpe muss eine Anpassung der Umwälzmengen erlauben. Sicherheitseinrichtungen gegen Überhitzung, Durchflussprobleme etc. sollten vorgesehen werden.



System mit Wärmeeintrag in den Untergrund

Abbildung A2: Schema eines Geothermal Response Tests mit möglichen Wärmeflüssen

Die tatsächlich in den Untergrund eingeleitete, bzw. diesem entzogene Wärmemenge muss nach den Angaben in Abbildung A2 gemessen werden. Dies kann z.B. durch Messung der Temperaturdifferenz am Punkt B und der Umwälzmenge berechnet werden.

Die Temperaturen sollten mindestens am Punkt B gemessen und aufgezeichnet werden, mit einer maximalen zeitlichen Auflösung von 10 Minuten.

Um den Einfluss von Q1 und Q2 (Abbildung A2) zu minimieren, ist eine Wärmedämmung der Messeinrichtung und der Verbindungsrohre zur Erdwärmesonde nötig (s. Abbildung). Diese Verbindung muss auf jeden Fall so kurz wie möglich gehalten werden. Erdwärmesonde, Rohre und Gerät müssen mit einem Wärmeträgermedium (nach Möglichkeit Wasser) gefüllt und sorgfältig entlüftet sein; Entlüftungsventile sind z.B. am Anschluss zum Sondenkopf und/oder an der höchsten Stelle im Gerät selbst vorzusehen.

7.2 Durchführung eines GeRT

Zwischen der Installation der Erdwärmesonde einschließlich Verpressung und dem Testbeginn müssen mindestens zwei Tage liegen. Falls ein früherer Beginn unerlässlich ist, muss mindestens das Verpressmaterial bereits abgebunden haben und die Temperaturen der Sole sind durch Umwälzen ohne Wärmezufuhr über mindestens eine Stunde auf Konstanz zu prüfen.

Testdurchführung

Mit dem Einschalten der Umwälzpumpe muss auch die Temperaturaufzeichnung beginnen. Für die Bestimmung der anfänglichen Untergrundtemperatur gibt es zwei Möglichkeiten:

- Messung des Temperaturprofils in der Erdwärmesonde oder, bei offenen Bohrlöchern im Ringraum, ohne Umwälzung in der Erdwärmesonde.
- Aufzeichnung der Temperaturen in den ersten 10-20 Minuten nach Einschalten der Umwälzpumpe in hoher zeitlicher Auflösung (z.B. 10 Sekunden), ohne Heizen oder Kühlen. Die Daten zeigen dann die natürlichen mittleren Untergrundtemperaturen.

Danach kann die thermische Leistung (Heizung) eingeschaltet werden. Die Leistung sollte dabei so gewählt werden, dass die zu erwartende Temperaturänderung (bei geschätzter Wärmeleitfähigkeit) im Bereich der Temperaturen des späteren Anlagenbe-

triebs liegt. Für erdgekoppelte Wärmepumpen können hier z.B. 30 W/m für geringe Wärmeleitfähigkeiten und bis zu 80 W/m für Untergrund mit hoher Wärmeleitfähigkeit eingesetzt werden.

Die Testdauer richtet sich nach:

- der Ausbildung der Erdwärmesonde (Bohrlochdurchmesser, Verfüllmaterial), wobei der Ausdruck

$$t_1 = \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (\text{mit}) \quad \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad [1]$$

mit	r_0	Bohrlochradius	[m]
	λ	geschätzte Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
	ρc_p	volumenbezogene Wärmekapazität	[J/(m³·K)]

die Minstdauer bis zum eigentlichen Beginn der Bestimmung der Gesteins-Wärmeleitfähigkeit angibt, und danach noch mindestens 30 Stunden Messzeit verbleiben müssen.

- und nach der Konstanz der thermischen Leistung; sind z. B. deutliche Temperaturfluktuationen zu sehen, muss die Messzeit verlängert werden, damit sich diese Schwankungen statistisch ausgleichen können (nicht erforderlich bei Auswertung mit Parameterschätzung).

7.3 Auswertung eines GeRT

Die Abbildung A3 zeigt eine typische Messkurve eines GeRTs. Für die Auswertung gibt es grundsätzlich zwei Verfahren:

Auswertung GeRT

- Bestimmung durch Approximation der Linienquellentheorie
- Parameterbestimmung mit numerischen Modellen

Beide Verfahren setzen konduktiven Wärmetransport voraus. Da im Untergrund aber auch andere Wärmetransportmechanismen wie z.B. Konvektion vorkommen, wird das Ergebnis als „effektive Wärmeleitfähigkeit“ bezeichnet.

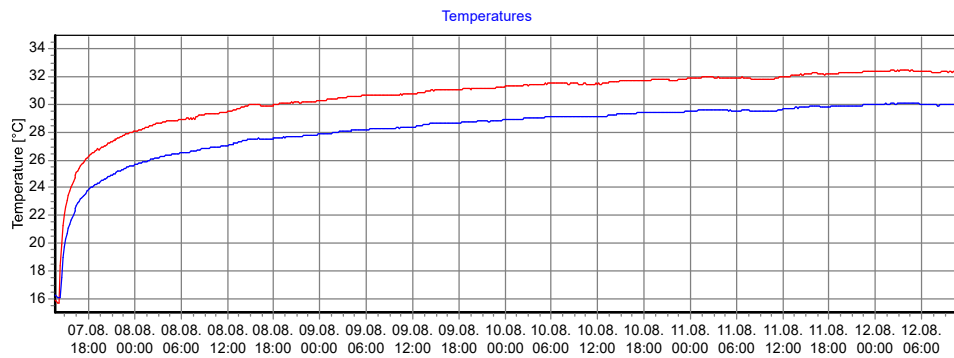


Abbildung A3: Typische Temperaturkurve eines Geothermal Response Test (GeRT)

7.3.1 Auswertung mit Linienquellentheorie

Damit die Approximation der Linienquellentheorie angewendet werden kann, muss die Temperaturkurve nach der Anfangsperiode bei logarithmischer Zeitachse eine Gerade ergeben oder lediglich solche periodischen Abweichungen aufweisen, die sich über die Messzeit statistisch ausgleichen. Die Anfangsperiode beträgt rund 10-20 Stunden und kann nach Gleichung [1] bestimmt werden; da dies zuerst mit einer geschätzten Wärmeleitfähigkeit erfolgt, ist bei starkem Abweichen der als Ergebnis erhaltenen Wärmeleitfähigkeit die Auswertung mit einer nach Gleichung [1] neu berechneten Anfangszeit zu wiederholen.

Zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird die Steigung k der Temperaturgeraden bei logarithmischer Zeitachse bestimmt und in die Gleichung [2] eingesetzt:

$$\lambda_{eff} = \frac{q}{k \cdot 4 \cdot \pi \cdot H} \quad [2]$$

mit	λ_{eff}	effektive Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
	q	thermische Leistung [W]
	H	Erdwärmesondenlänge	[m]

Bei der Linienquellentheorie ist eine stufenweise Auswertung zur Überprüfung der Aussagekraft des Tests möglich. Dazu wird von der mit Gleichung [1] berechneten Anfangszeit an (oder noch etwas später) jeweils ein zunehmend längeres Stück der Temperaturkurve ausgewertet und die erhaltene effektive Wärmeleitfähigkeit gegen den Endzeitpunkt des ausgewerteten Kurvenabschnitts aufgetragen. Nach anfänglichen Schwankungen sollte sich die Kurve auf einen gleich bleibenden Endwert einschwingen.

Mit bekannter Wärmeleitfähigkeit, einem verlässlichen Anfangswert für die ungestörte Erdreichtemperatur und Berücksichtigung der vollständigen Temperaturkurve kann auch der thermische Bohrlochwiderstand R_b berechnet werden:

$$R_b = \frac{H}{Q} \cdot (T_f - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - 0,5772 \right) \quad [3]$$

mit	Q	Wärmeeintrag	[W]
	H	Bohrlochtiefe	[m]
	T ₀	Ungestörte Erdreichtemperatur	[°C]
	T _f	Fluidtemperatur zum Zeitpunkt t	[°C]
	λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
	α	Temperaturleitfähigkeit λ/ρc _p	[m ² /s]
	r ₀	Bohrlochradius	[m]

7.3.2 Parameteridentifikation mit numerischer Simulation

Hierbei wird ein numerisches Simulationsmodell eingesetzt, um mit gemessenen Werten für die thermische Leistung über die Messzeit die erhaltene Temperaturkurve zu berechnen. Die Parameter für die Gesteins-Wärmeleitfähigkeit und für den thermischen Bohrlochwiderstand (oder die Leitfähigkeit der Bohrlochverfüllung) werden solange variiert, bis die tatsächlich gemessene Temperaturkurve erhalten wird. Die dafür eingesetzten Parameter sind dann das Ergebnis. Diese Methode ist insgesamt erheblich aufwendiger, erlaubt aber die genaue Auswertung auch bei stark schwankender thermischer Leistung.

Die Simulation erfolgt mit der Software FEFLOW in der Version 6.0 (p6, 2D+3D). FEFLOW verwendet das Finite-Elemente (FE)-Verfahren zur numerischen Lösung der Strömungsgleichungen. Dazu wird über dem Modellgebiet ein FE-Netz aus homogenen Dreieckselementen generiert, um das Modellgebiet in Teilelemente zu zerlegen. Entlang der entstehenden Netz-Knoten erfolgt dann die Lösung der Strömungs- und der Wärmetransportgleichungen. Der Übergang in die Dreidimensionalität wird durch die senkrechte Projektion der Dreieckselemente realisiert. Dadurch entstehen Tetraeder-Elemente, deren obere und untere Begrenzung zwei Flächen bilden, die jeweils eine Schicht – so genannte Modellgrundwasserleiter begrenzen. Es können beliebig viele Schichten übereinander gelegt werden, deren Anzahl sich aus dem hydrogeologischen Modell bzw. der Aufgabenstellung ableitet. Durch horizontale und vertikale Diskretisierung kann das FE-Netz beliebigen geologischen und hydrogeologischen Strukturen und Randbedingungen angepasst werden. Die damit zunehmende Anzahl der zu lösenden Gleichungen beeinflusst die Genauigkeit der Simulation. Allerdings sind mit steigender Netzverfeinerung auch ein höherer Rechenaufwand und damit längere Rechenzeiten verbunden.

Bei einem rein konduktiven Transport im Untergrund und einer konstanten thermischen Leistung ergeben beide Verfahren (analytisch und numerisch) die gleichen Werte.

7.3.3 Parameteridentifikation durch Superposition der Linienquellenapproximation (Superpositionsverfahren)

Bei stark schwankenden Leistungen und/oder Stromausfällen während der Testlaufzeit kann mittels Parameteridentifikation durch Verwendung des Superpositionsverfahrens eine Näherungslösung gefunden werden.

Die Temperaturentwicklung des Wärmeträgerfluids in der Erdwärmesonde wird bei wechselnden Heiz-(oder Entzugs-)leistungen durch endliche Einzelimpulse beschrieben, die sich infinit fortplanzen und dabei überlagern (addieren):

$$T_{f_n} = T_0 - \sum_{n=1}^N \frac{Q_n - Q_{n-1}}{H} \left(R_b + \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) + \ln(t - t_n) - \gamma \right) \right) \quad [4]$$

In den nachfolgenden Abbildungen ist das Prinzip verdeutlicht. In Abb. A4 ist die Temperaturentwicklung für einen konstanten Wärmeentzug von 10 W/m über den Zeitraum von 60 Stunden dargestellt.

Nach 5 Stunden wird die Entzugsleistung um 5 W/m auf insgesamt 15 W/m erhöht und ein zweiter Impuls, beginnend mit der 6. Stunde (Abb. A5) überlagert den ersten Impuls. Die Summe ergibt den aus beiden Impulsen resultierenden Temperaturverlauf (Abb. A6).

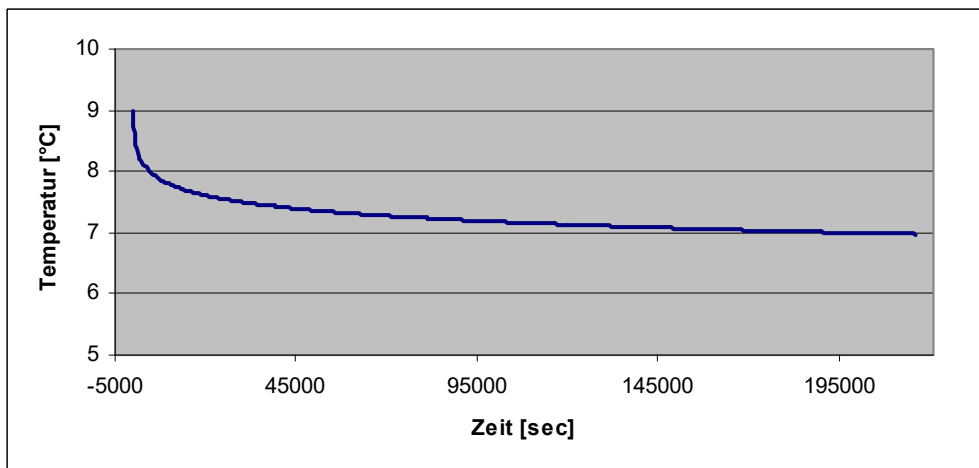


Abbildung A4: Impuls 1: 10 W/m für 60 Stunden (Stunde 1 bis Stunde 60)

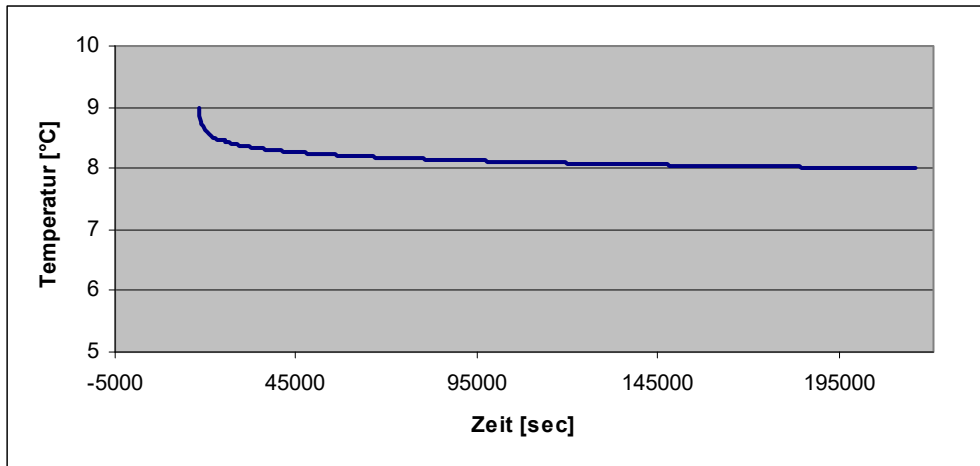


Abbildung A5: Impuls 2: 5 W/m für 54 Stunden (Stunde 6 bis Stunde 60)

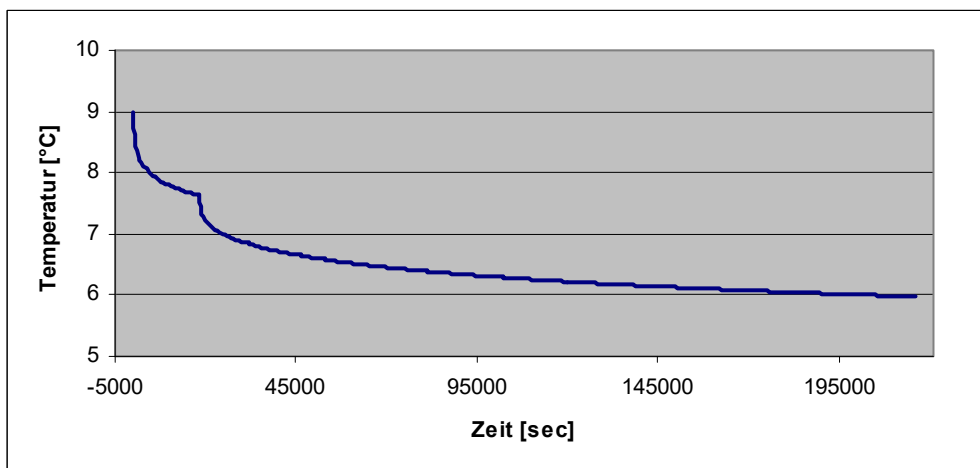


Abbildung A6: Summe Impuls 1 + Impuls 2

Innerhalb eines definierten Suchrasters werden unter Variation von Wärmeleitfähigkeit und thermischen Bohrlochwiderstand die resultierenden Temperaturkurven berechnet und mit den gemessenen Temperaturen verglichen. Als Maß der Übereinstimmung wird die Standardabweichung zwischen simulierter und gemessener Temperaturkurve errechnet.

Die angesetzten Parameter der Kurve mit der besten Übereinstimmung (niedrigsten Standardabweichung) werden als Ergebnis der Parameteridentifikation angesehen.

7.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Die stufenweise Auswertung ermöglicht eine verfahrenstechnische Plausibilitätsprüfung und Fehlerabschätzung des Testergebnisses.

Stufenweise
Auswertung

Dabei wird für jeden Zeitschritt bei gleichem Startzeitpunkt der Wärmeleitfähigkeitswert berechnet und in einem Graph gegen die Zeitachse dargestellt. Üblicherweise kann zu

Beginn der Messung ein starkes Schwanken der Kurve beobachtet werden. Danach zeigt ein achsenparalleler (Abszisse) Verlauf der Kurve ein belastbares Testergebnis an.

Ein weiteres Schwanken der Kurve zeigt an, dass die Testzeit verlängert werden muss. Ein stetiger Anstieg der Kurve deutet auf einen starken Grundwasserfluss hin.

Beispiele:

a) Stabiles Testergebnis:

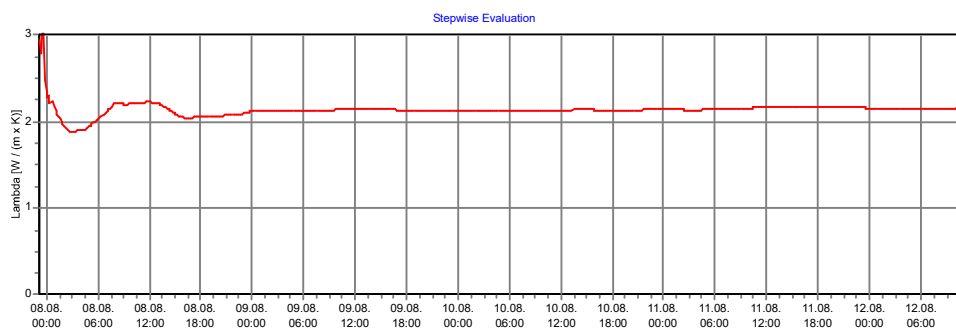


Abbildung A7: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, stabiles Ergebnis

b) Grundwassereinfluss:

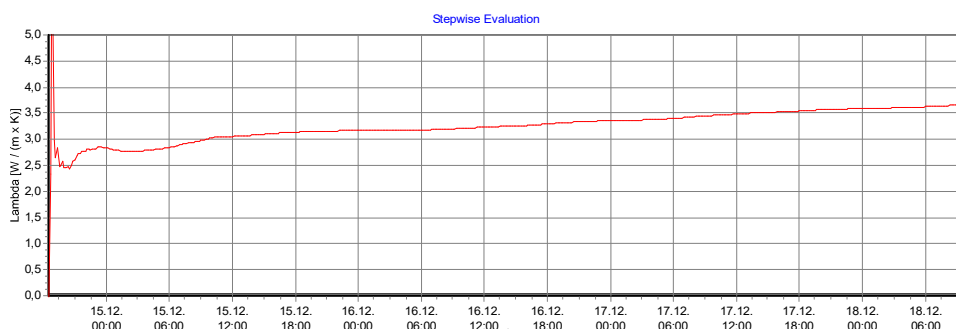


Abbildung A8: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, Grundwassereinfluss

c) Testergebnis noch nicht stabil, Messzeit muss verlängert werden:

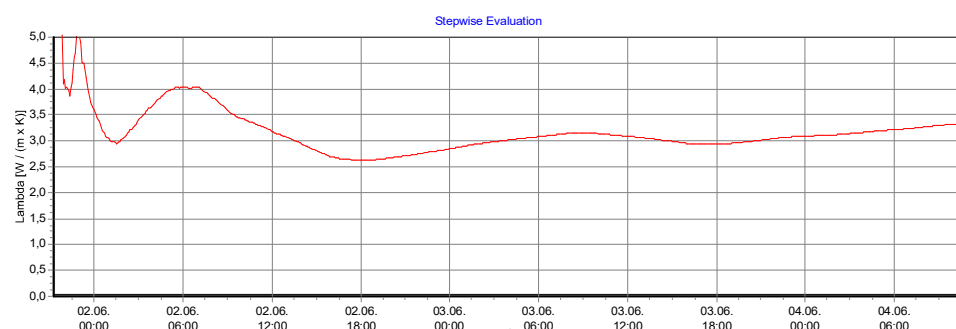


Abbildung A9: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, Testzeit zu kurz