

BV Blankweg
Gemarkung Dornholzhausen
Flur 16, Flurst. 158/0
35428 Langgöns - Dornholzhausen

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

erstellt von:



UBeG Dr. E. Mands & Dipl.-Geol. M. Sauer GbR
Reinbergstraße 2 35580 Wetzlar – Nauborn
Tel.: 06441/212910 Fax: 06441/212911
Email: UBeG@UBeG.de www.UBeG.de

Datum: 16. November 2022
Rev. 1

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORGANG UND AUFTRAG	3
2	BOHRUNG UND SONDENERSTELLUNG	3
3	GEOHERMAL RESPONSE TEST	4
3.1	Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten	6
3.2	Versuchsauswertung	6
3.2.1	Basisdaten	6
3.2.2	Messdaten	7
3.2.3	Ergebnis des Response-Tests	8
3.2.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	8
3.2.5	Temperaturprofile	9
4	ZUSAMMENFASSUNG	10
5	LITERATUR.....	11
6	PHOTODOKUMENTATION.....	12
7	ANHANG: INFORMATIONEN ZUM GEOHERMAL RESPONSE TEST (GERT)	13
7.1	Allgemeines zu Geothermal Response Tests.....	13
7.2	Durchführung eines GeRT.....	16
7.3	Auswertung eines GeRT	17
7.3.1	Auswertung mit Linienquellentheorie	17
7.3.2	Parameteridentifikation mit numerischer Simulation	19
7.3.3	Parameteridentifikation durch Superposition der Linienquellenapproximation (Superpositionsverfahren)	19
7.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	21

Rev. 1 (17.11.2022): Falsche Projektbezeichnung in Abschnitt 3.2.3 korrigiert.

1 Vorgang und Auftrag

Durch die LandesEnergieAgentur Hessen GmbH wurde UBeG beauftragt, am Standort „Blankweg“ in Langgöns, Gemarkung Dornholzhausen, Flur 16, Flurstück 158/0 an einer Testerdwärmesonde zur Bestimmung der thermischen Untergrundparameter Wärmeleitfähigkeit und Erdreichtemperatur sowie des thermischen Bohrlochwiderstands einen Geothermal Response Test auszuführen.

Vorgang und
Auftrag

Der Geothermal Response Test wurde in dem Zeitraum 09.11. – 11.11.2022 ausgeführt. Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der Testdurchführung dargestellt.

2 Bohrung und Sondenerstellung

Die Bohrung wurde durch die Fa. Handke Bohr- und Umwelttechnik GmbH, Bad Camberg bis ca. 100m Tiefe niedergebracht und bis ca. 96m zur Erdwärmesonde ausgebaut.

Die erbohrte Schichtenfolge wird durch Tonschiefer dominiert.

Bis zu einer Tiefe von 18m wurde eine temporäre Schutzverrohrung mit einem Durchmesser von 178 mm eingesetzt. Darunter beträgt der Bohrdurchmesser 152mm. Über die Sondenlänge ergibt sich somit ein mittlerer Bohrlochdurchmesser von 156,9 mm.

Es wurde eine Doppel-U-Erdwärmesonde DA 32 eingesetzt.

Die Verfüllung des Bohrlochringraumes erfolgte mit dem thermisch verbesserten und magnetisch dotierten Material der Fa. Schwenk, Fabrikat Füllbinder EWM plus.

Die Testerdwärmesonde wurde am 17.10.2022 fertig gestellt.

Die ungefähre Lage der Test-EWS ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

EWS

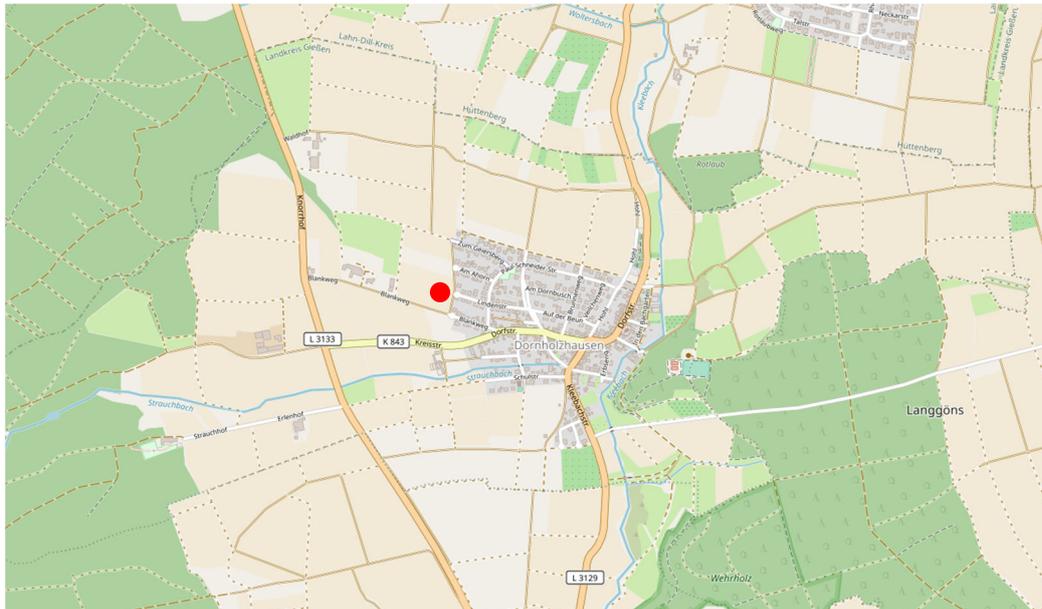


Abbildung 1: Ungefähre Lage der Test-EWS, Plangrundlage: OpenStreetMap

3 Geothermal Response Test

Allgemeine Informationen zum Aufbau, Durchführung und Auswertung eines Geothermal Response Tests sind im Anhang des vorliegenden Berichtes dargestellt und erläutert.

Informationen
zum GeRT

Der für den Standort Langgöns-Dornholzhausen gewählte Versuchsaufbau ist in der Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Messaufbau

Gemessen und aufgezeichnet werden die Vor- und Rücklauftemperaturen und Durchflussmengen im Gesamtstrom sowie separat für jeden Kreislauf der Erdwärmesonde. Die Temperaturmessungen im Gesamtstrom erfolgen innerhalb des Messgerätes. Die Temperaturmessungen der EWS-Kreisläufe erfolgen direkt am Sondenkopf. Alle Temperaturfühler sind pt500-Eintauchfühler und messen direkt im Wärmeträgermedium.

Die Durchflussmengen werden mittels Ultraschallmessung erfasst. Zur Testauswertung werden die Durchflussmengen und Temperaturen unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Wärmeträgermediums in Wärmeleistungen umgerechnet.

Die Daten des Gesamtkreislaufs und die der Einzelkreisläufe werden in 1min-Intervallen erfasst.

Die Durchflussraten der Einzelkreisläufe sind regulierbar und wurden so eingestellt, dass die Durchflussraten in den EWS-Kreisläufen gleich sind.

Die Heizleistung des Testgeräts ist stufenlos regulierbar. Die Steuerung erfolgt über ein SPS-Modul.

Es erfolgt weiterhin eine Aufzeichnung der Umgebungstemperatur, ebenfalls im 1min-Intervall.

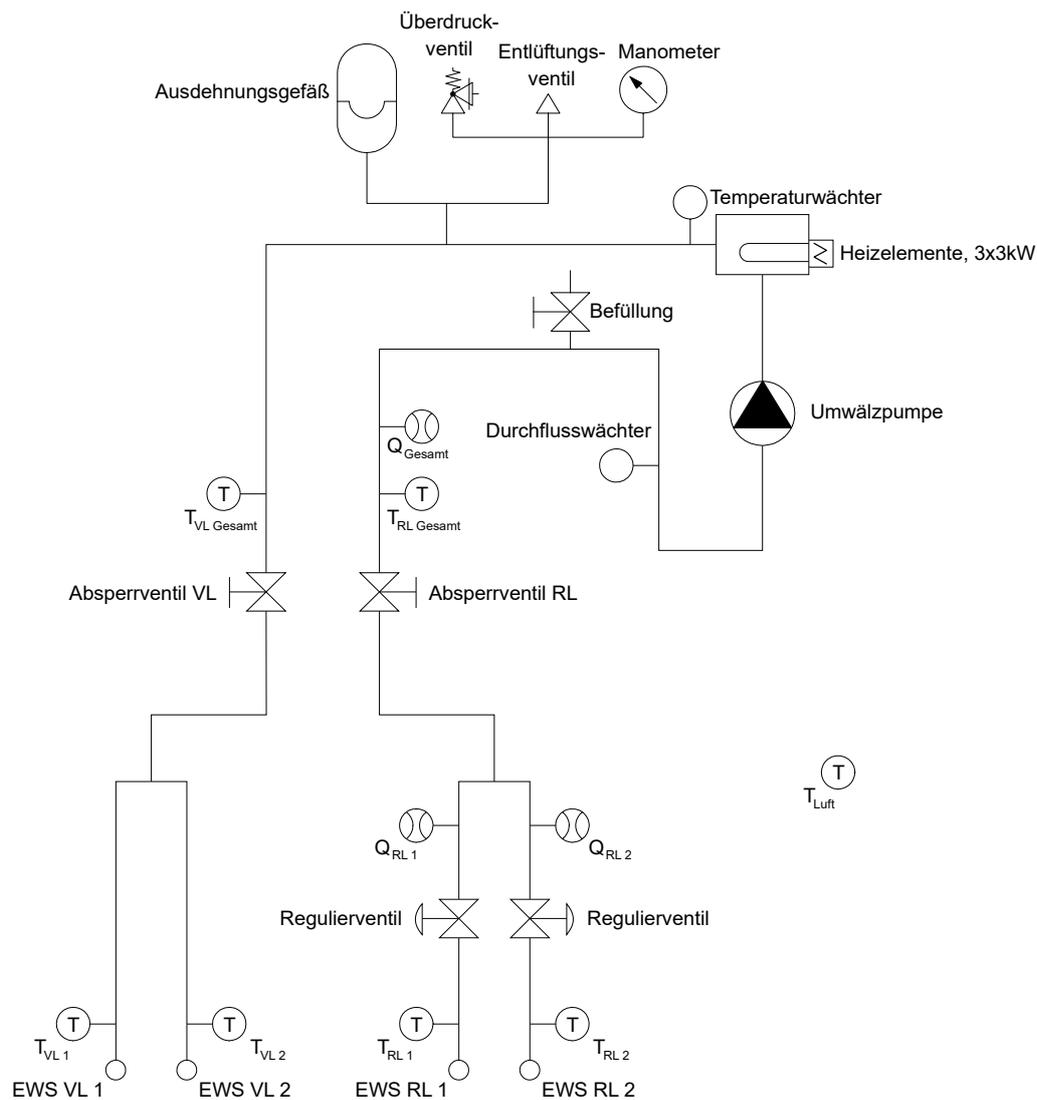


Abbildung 2: Schema Messaufbau

Die Testauswertung erfolgt unter Verwendung der am Sondenkopf aufgezeichneten Temperaturdaten, wobei jeweils aus den beiden Vor- und Rücklauftemperaturen Mittelwerte gebildet wurden. Die Durchflussraten der Einzelkreisläufe wurden zur Berechnung der Heizleistung aufsummiert.

3.1 Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten

Geländearbeiten

Am Mittwoch, den 09.11.2022 wurde die Messapparatur an die Test-Erdwärmesonde angeschlossen und in Betrieb genommen.

Der Test lief ohne Unterbrechung bis zum Freitag, den 11.11.2022.

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

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

Die Stromversorgung über den Testzeitraum erfolgte mittels mobilem Stromgenerator.

3.2 Versuchsauswertung

3.2.1 Basisdaten

- | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|------------|
| ▪ Erdwärmesondenlänge: | ca. 96 m | Basisdaten |
| ▪ Erdwärmesondentyp: | Doppel-U, DA 32 | |
| ▪ Mittlerer Bohrlochdurchmesser: | 157 mm | |
| ▪ Messzeitraum: | 46,4 h | |
| ▪ Spez. Wärmekapazität (angenommen): | 2,3 MJ/(m ³ ,K) | |

3.2.2 Messdaten

Messdaten

Die Abbildung 3 zeigt die über den Messzeitraum aufgezeichneten Temperatur- und Durchflussraten sowie die berechneten Heizleistungen.

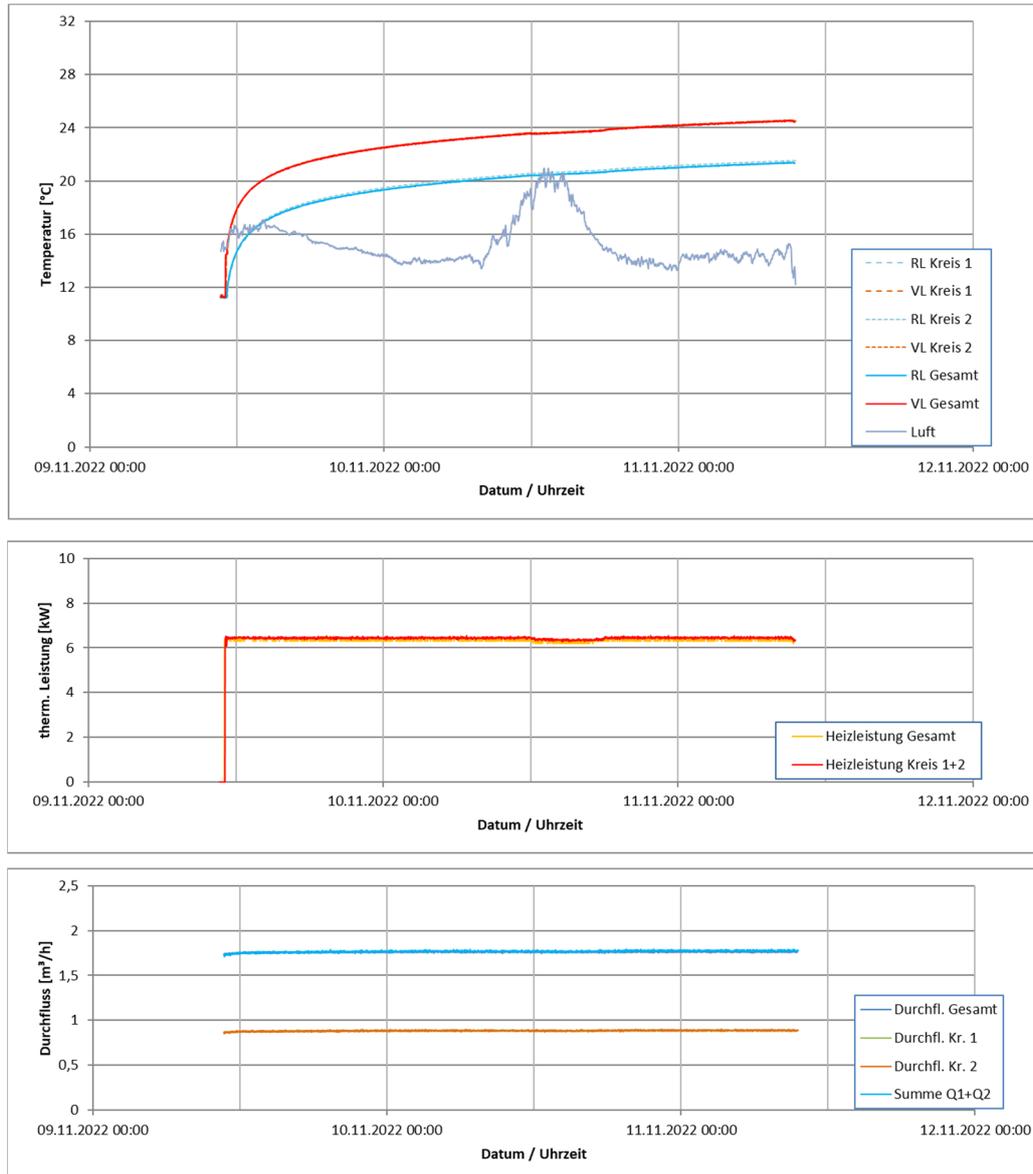


Abbildung 3: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung und Durchfluss

- Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde 6.439 W
- Heizarbeit über 46,4 h 298,8 kWh

3.2.3 Ergebnis des Response-Tests

Ergebnis

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

Der Geothermal Response Test ergibt für den Untergrund am Standort Langgöns, Gemarkung Dornholzhausen, Flur 16, Flurstück 158/0 eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von

$$\lambda_{\text{eff}} = 3,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}.$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,069 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$$

errechnet.

3.2.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Für den durchgeführten Test ist das Ergebnis der stufenweisen Auswertung in der Abbildung 4 (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 (5,9 h) dargestellt.

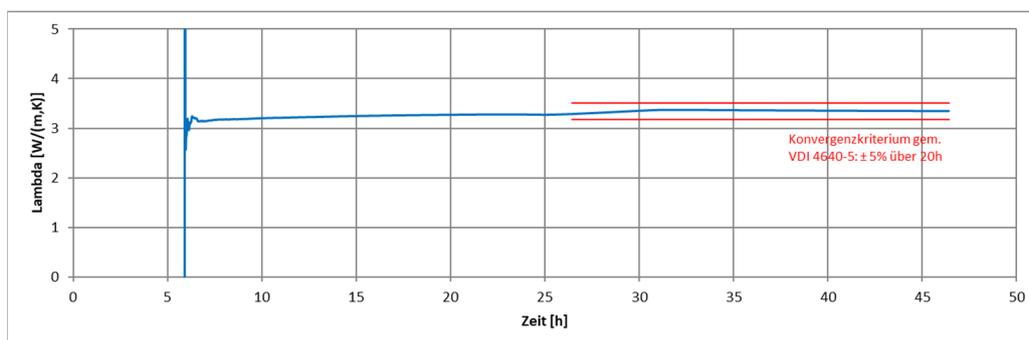


Abbildung 4: Stufenweise Auswertung

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich das Testergebnis bei einem Wert von 3,3 W/m/K stabilisiert. Die Testzeit ist ausreichend lang.

Eine während des Testzeitraumes wirksame Beeinflussung durch fließendes Grundwasser ist nicht zu erkennen.

3.2.5 Temperaturprofile

Zur Ermittlung der 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 1h, 2h und 3h nach Testende in der Erdwärmesonde Tiefen-Temperaturprofile in ca. 1 m - Schritten aufgenommen. Die Messwerte sind in Abbildung 5 dargestellt.

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

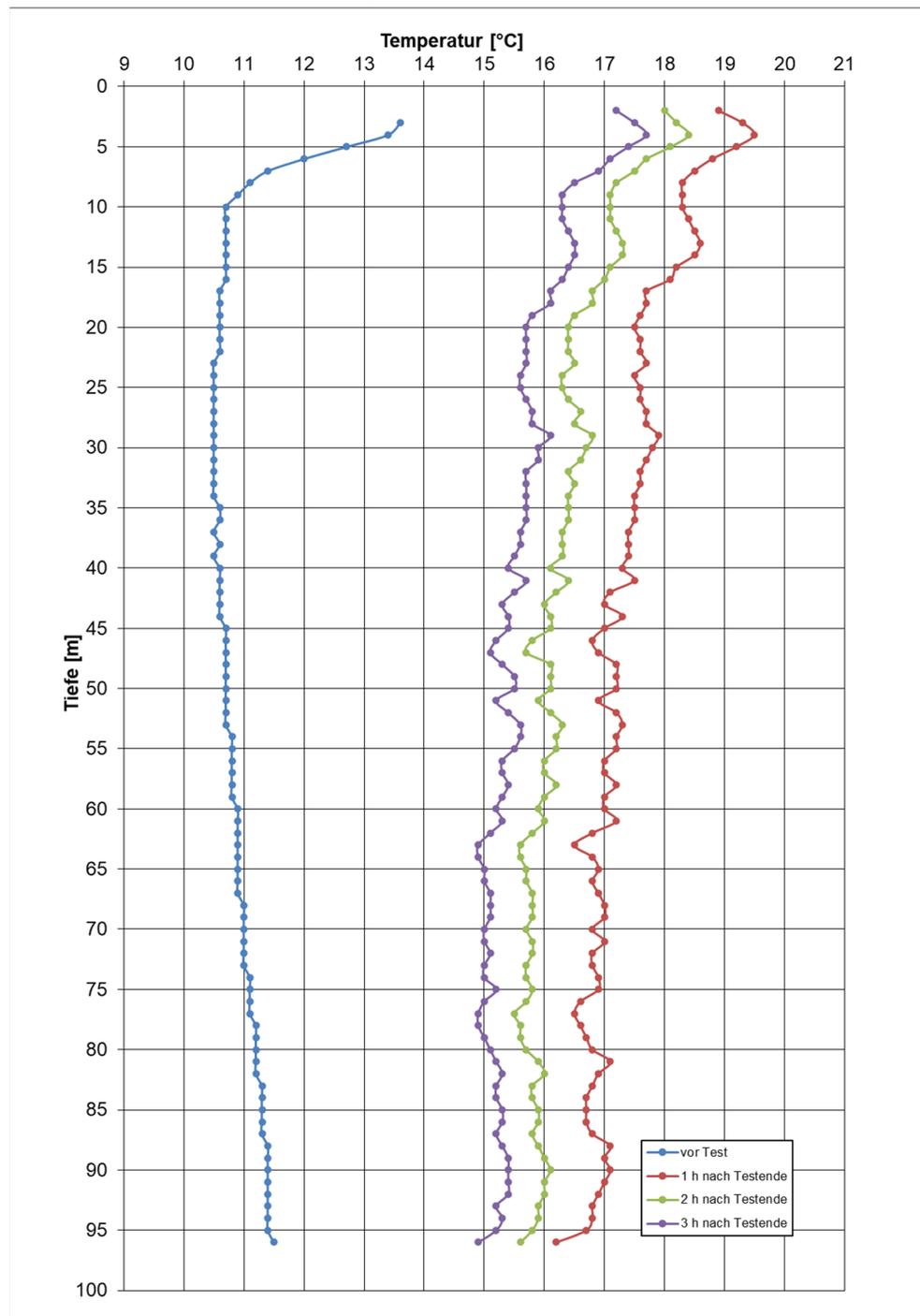


Abbildung 5: Temperaturprofile

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. 10,9 °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 Blankweg in Langgöns, Gemarkung Dornholzhausen, Flur 16, Flurstück 158/0 wurde an einer ca. 96m tiefen Erdwärmesonde in dem Zeitraum 09.11. bis 11.11.2022 ein Geothermal Response Test ausgeführt.

Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst:

Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	3,3
Thermischer Bohrlochwiderstand R_b [(m·K)/W]	0,069
Erdreichtemperatur T_0 [°C] (10m bis Endteufe)	10,9

Diese Stellungnahme gilt nur in ihrer Gesamtheit.

Wetzlar, den 16.11.2022

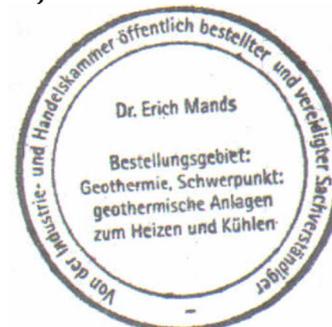
UBeG GbR



Dipl.-Geol. Marc Sauer




Dr. Erich Mands



5 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

6 Photodokumentation



Photodoku-
mentation

Foto 1: Durchführung des Geothermal Response Test



Foto 2: EWS nach Abbau des Testgeräts

7 Anhang: Informationen zum Geothermal Response Test (GeRT)

7.1 Allgemeines zu Geothermal Response Tests

Allgemeines

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.

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.

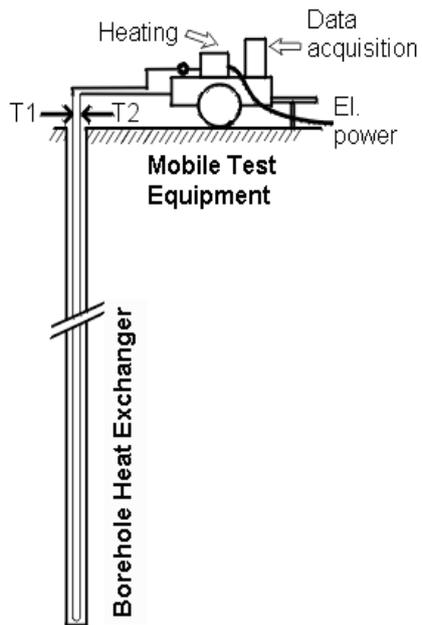


Abbildung A1: Schema eines Geothermal Response Test (GeRT, links) und Durchführung eines Geothermal Response Test mit modernem Gerät von UBeG (rechts)

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.

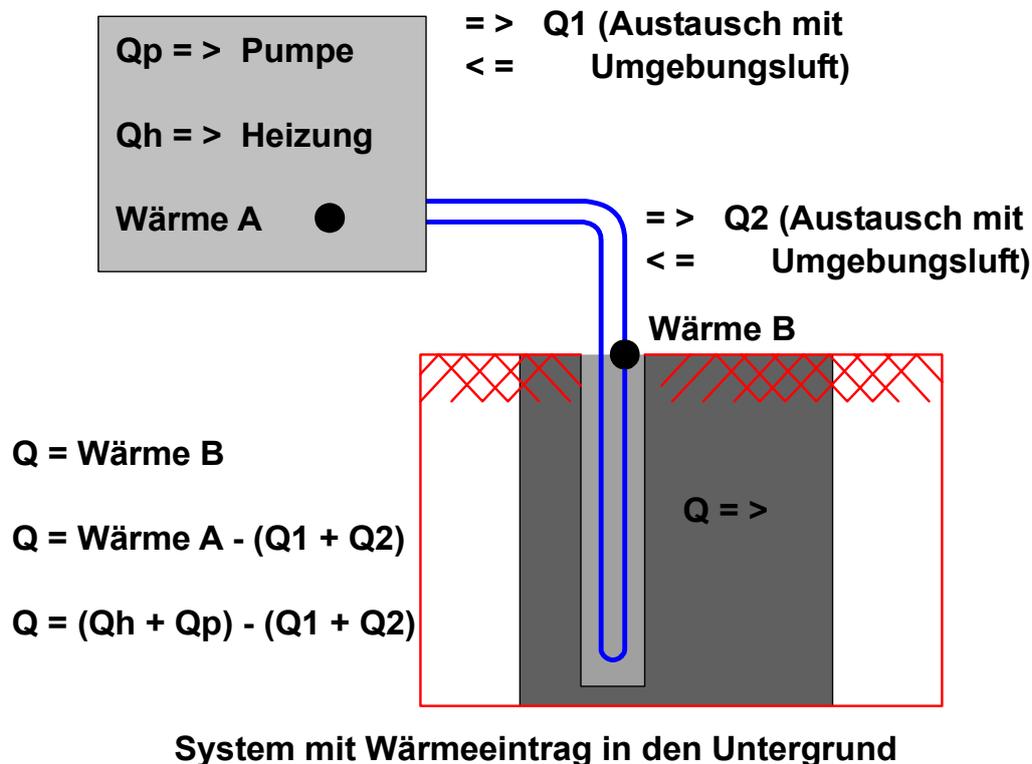


Abbildung A2: Schema eines Geothermal Response Tests mit möglichen Wärmeflüssen

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 Q_1 und Q_2 (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

Testdurchführung

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.

Mit dem Einschalten der Umwälzpumpe muss auch die Temperaturlaufzeichnung 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 Anlagenbetriebs 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 angesetzt 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/(m ³ ·K)]

die Mindestdauer 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.

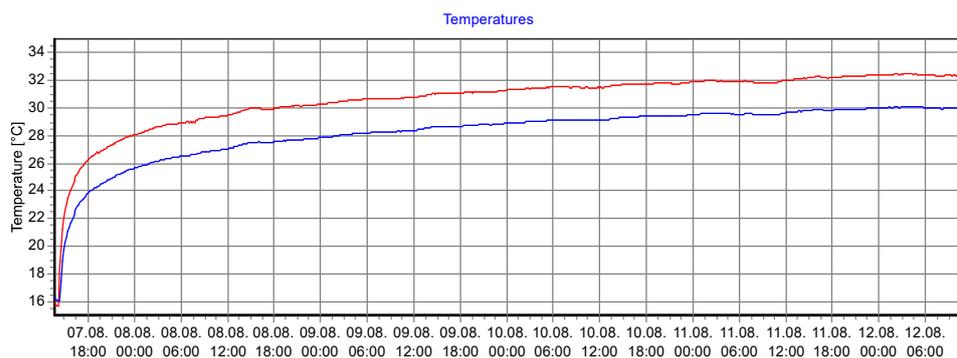


Abbildung A3: Typische Temperaturkurve eines Geothermal Response Test (GeRT)

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:

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

mit	λ_{eff}	effektive Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
	q	thermische Leistung [W]
	H	Erdwärmesondnlänge	[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 gleichbleibenden 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 $\lambda/\rho c_p$	[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 z.B. mit der Software FEFLOW. Die Software verwendet das Finite-Elemente (FE)-Verfahren zur numerischen Lösung der Strömungsgleichungen. Dazu wird über dem Modellgebiet ein FE-Netz aus homogenen Dreiecks-Elementen 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 Dreiecks-Elemente 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 übereinandergelegt 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 Liniquellenapproximation (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 fortpflanzen 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. A3 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. A4) überlagert den ersten Impuls. Die Summe ergibt den aus beiden Impulsen resultierenden Temperaturverlauf (Abb. A5).

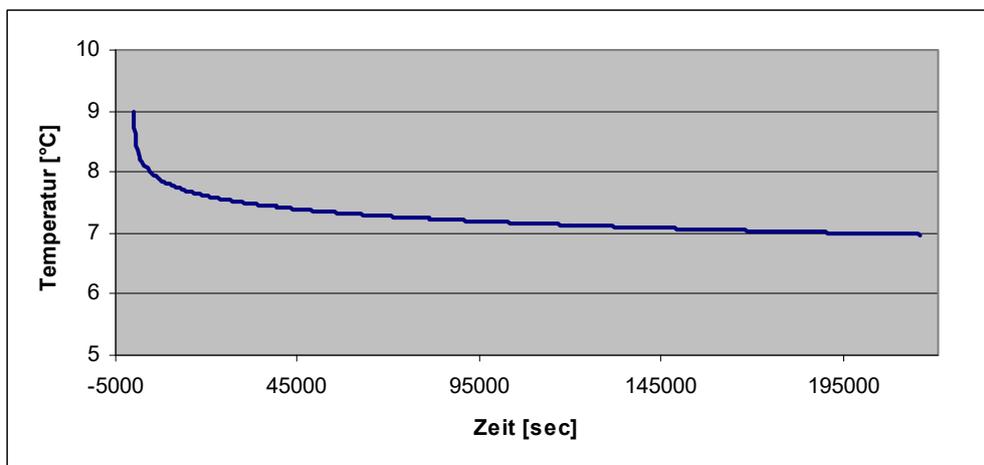


Abbildung A3: Impuls 1: 10 W/m für 60 Stunden (Stunde 1 bis Stunde 60)

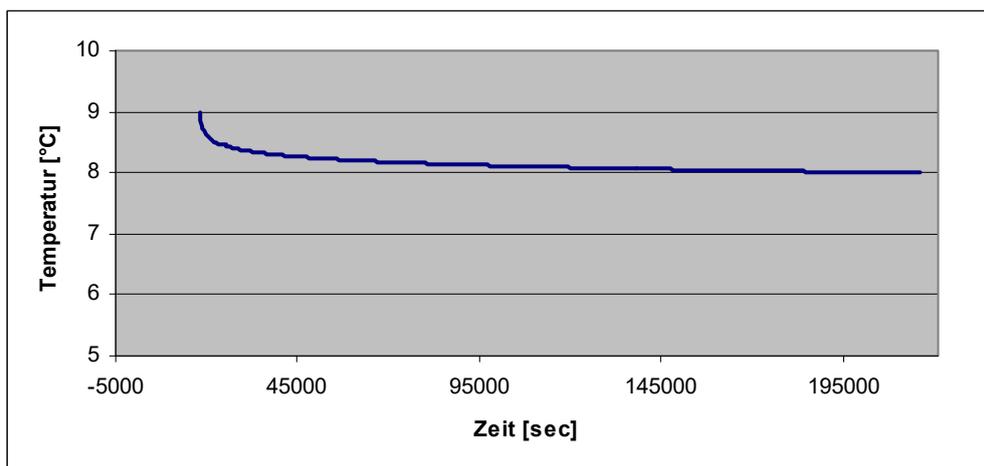


Abbildung A4: Impuls 2: 5 W/m für 54 Stunden (Stunde 6 bis Stunde 60)

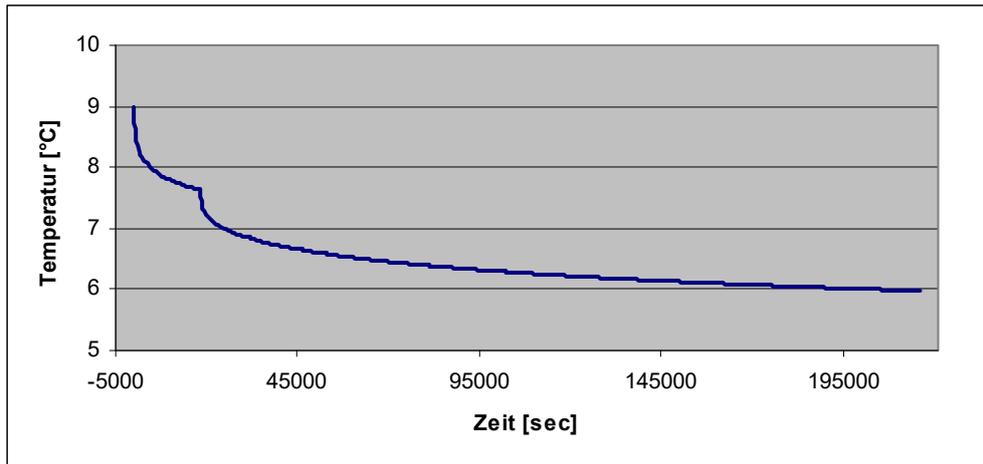


Abbildung A5: Summe Impuls 1 + Impuls 2

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. Gem. VDI 4640-5 muss das Ergebnis über die letzten 20 Stunden der Testzeit konstant sein. Als konstant gilt das Ergebnis, wenn die Einzelergebnisse nicht mehr als $\pm 5\%$ vom Endergebnis abweichen.

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:

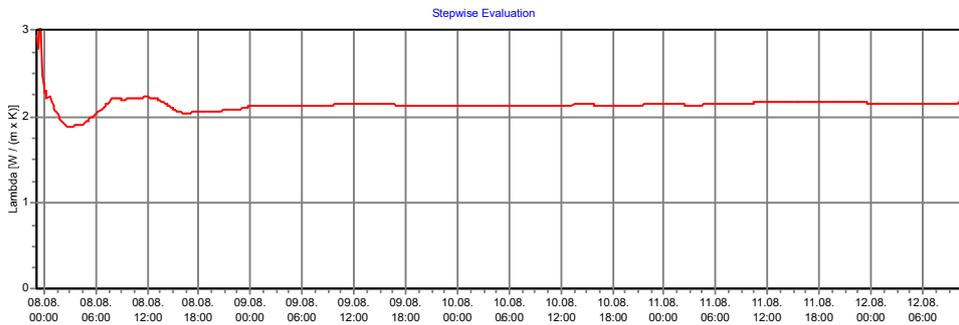


Abbildung A6: Stufenweise Auswertung eines GeRT, stabiles Ergebnis

b) Grundwassereinfluss:

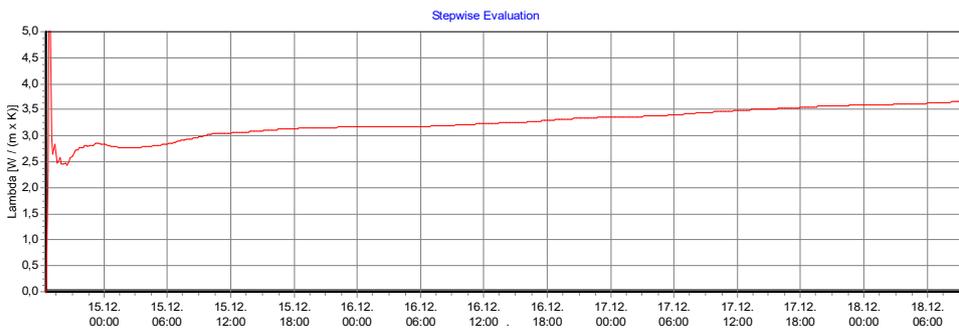


Abbildung A7: Stufenweise Auswertung eines GeRT, Grundwassereinfluss

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

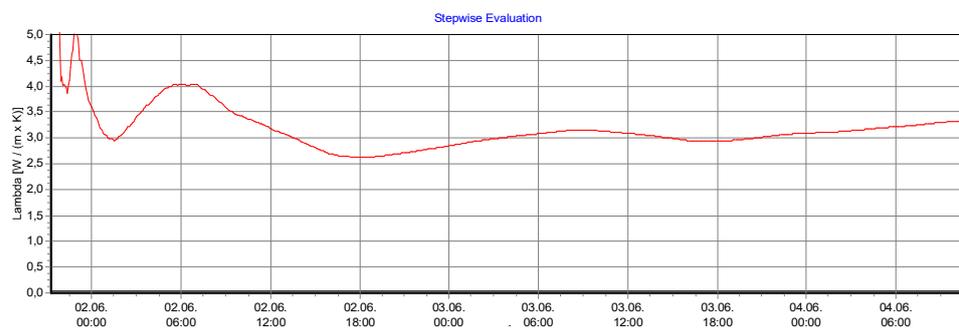


Abbildung A8 Stufenweise Auswertung eines GeRT, Testzeit zu kurz