

BV Kaltes Nahwärmenetz
NBG „Im Steinert“ in 55435 Gau-Algesheim

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: 31. Juli 2020

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORGANG	3
2	BOHRUNG UND SONDENERSTELLUNG	3
3	GEOTHERMAL RESPONSE TESTS	5
3.1	Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten	5
3.2	Versuchsauswertung EWS 1 (Süd).....	5
3.2.1	Basisdaten EWS 1.....	5
3.2.2	Messdaten EWS 1.....	6
3.2.3	Ergebnis des Response-Tests EWS 1	7
3.2.4	Superpositionsverfahren EWS 1	7
3.2.5	Temperaturprofile EWS 1	8
3.3	Versuchsauswertung EWS 2 (Nord)	9
3.3.1	Basisdaten EWS 2.....	9
3.3.2	Messdaten EWS 2.....	9
3.3.3	Ergebnis des Response-Tests EWS 2	10
3.3.4	Superpositionsverfahren EWS 2	11
3.3.5	Temperaturprofile EWS 2.....	11
4	ZUSAMMENFASSUNG	13
5	PHOTODOKUMENTATION.....	14
6	LITERATUR.....	16
7	ANHANG: INFORMATIONEN ZUM GEOTHERMAL RESPONSE TEST (GERT)	17
7.1	Allgemeines zu Geothermal Response Tests.....	17
7.2	Durchführung eines GeRT.....	20
7.3	Auswertung eines GeRT	21
7.3.1	Auswertung mit Linienquellentheorie	21
7.3.2	Parameteridentifikation mit numerischer Simulation	23
7.3.3	Parameteridentifikation durch Superposition der Linienquellenapproximation (Superpositionsverfahren)	23
7.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	25

1 Vorgang

Die Stadt Gau-Algesheim beabsichtigt die Erschließung des Neubaugebietes „Im Steinert“. Es ist vorgesehen, dass die Wohngebäude jeweils mit einer erdgekoppelten Wärmepumpe zur Erzeugung von Heizwärme und zur Warmwasserbereitung ausgestattet werden. Als Wärmequelle für die Wärmepumpen soll ein zentrales Erdwärmesondenfeld errichtet werden. Die einzelnen Gebäude werden über eine mit Sole gefüllte Ringleitung an die Erdwärmesonden angeschlossen (kaltes Nahwärmenetz).

Vorgang

Hierzu wurde durch UBeG auf Basis geschätzter thermischer Untergrundparameter eine Vordimensionierung ausgeführt (s. unser Bericht vom 14.06.2019).

Zur Feststellung der Bohrbarkeit des Gebirges und exakten Bestimmung der thermischen Untergrundparameter wurden durch die Firma Sadurski Erdbohrungen am Projektstandort zwei Testerdwärmesonden errichtet und an diesen durch UBeG jeweils ein Geothermal-Response-Test ausgeführt.

Die Bohrarbeiten wurden in dem Zeitraum 29.06. bis 06.07.2020 ausgeführt. Die Response-Tests wurden durch UBeG in dem Zeitraum 07.07. bis 16.07.2020 ausgeführt.

In dem vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der Testdurchführung dargestellt.

2 Bohrung und Sondenerstellung

Die Bohrungen wurden im Spülbohrverfahren durch die Sadurski Erdbohrungen GmbH & Co. KG bis jeweils ca. 200m Tiefe ausgeführt.

EWS

Bei den Bohrarbeiten wurden unter einer ca. 15,5m mächtigen Lockergesteinsauflage (Kies, Sand, Schluff) bis zur Enteufe Tone angetroffen.

Die Sondenrohre konnten jedoch nur bis zu Tiefen von 109m (EWS 1 bzw. Süd) und 97m (EWS 2 bzw. Nord) eingebaut werden.

Die Einbauschwierigkeiten sind auf das nicht standfeste Gebirge in den tieferen Bereichen (Zuquellen des Bohrlochs) und Widerstände beim Einbau der Sondenrohre aufgrund des Kontakts der Rohre mit dem plastischen Ton (Kohäsion) zurückzuführen.

Über die Sondenlänge ergeben sich gemittelte Bohrlochdurchmesser von 187mm (EWS Süd) und 188mm (EWS Nord).

Es wurden Doppel-U-Erdwärmesonden mit den Maßen 40 mm x 3,7 mm eingesetzt. Die Hinterfüllung des Bohrlochringraumes erfolgte mit dem thermisch verbesserten Verfüllmaterial ThermoCem Plus dotiert.

Die ungefähre Lage der Erdwärmesonden ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Ungefähre Lage der Test-EWS

3 Geothermal Response Tests

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

Informationen
zum GeRT

3.1 Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten

Am Dienstag, dem 07.07.2020 wurde die Messapparatur an die Test-Erdwärmesonde EWS 1 (EWS Süd) angeschlossen und in Betrieb genommen. Am Nachmittag des 08.07. wurde die Stromzufuhr durch Unbekannt unterbrochen und der Test vorzeitig beendet. Da die Testdauer mit nur etwa 27,5h nicht ausreichend lang für die Auswertung war, wurde der Test am 10.07. neu gestartet und lief dann unterbrechungsfrei bis zum 13.07.

Geländearbeiten

Unmittelbar im Anschluss wurde die Testapparatur auf die EWS 2 (Nord) umgesetzt. Dort lief der Test unterbrechungsfrei bis zum 16.07.2020.

Zur Ermittlung der ungestörten Untergrundtemperatur wurden unmittelbar vor Testbeginn in den Erdwärmesonden Tiefen-Temperaturprofile in ca. 2m - Schritten aufgenommen.

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

3.2 Versuchsauswertung EWS 1 (Süd)

3.2.1 Basisdaten EWS 1

- Erdwärmesondenlänge: ca.109 m
- Erdwärmesondentyp: Doppel-U, DA 40
- Mittlerer Bohrlochdurchmesser: 187 mm
- Messzeitraum: 71,3 h

Basisdaten
EWS 1

3.2.2 Messdaten EWS 1

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

Messdaten
EWS 1

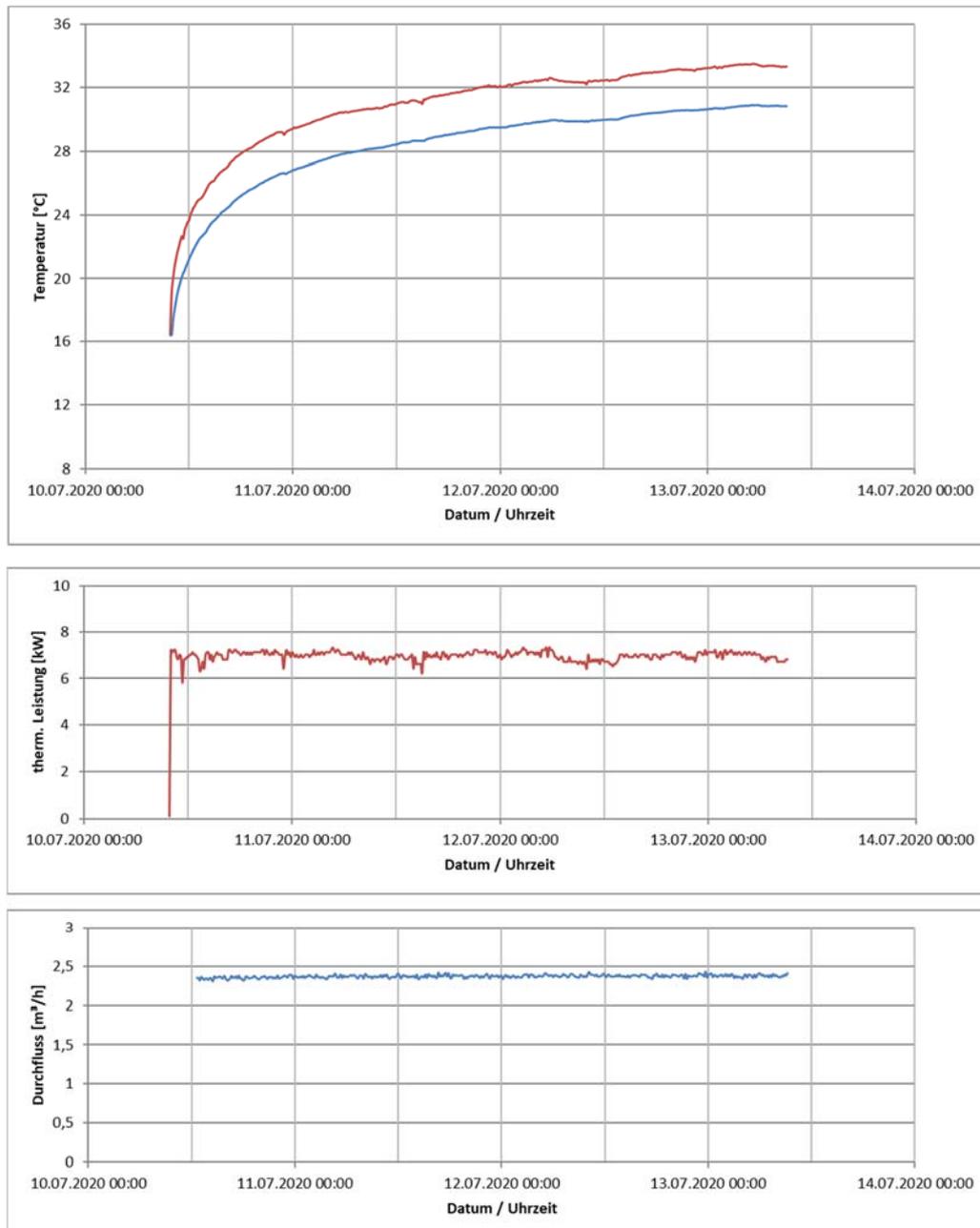


Abbildung 2: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung und Durchfluss, EWS 1

- Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde 6.995 W
- Heizarbeit über 71,3 h ca. 499 kWh

3.2.3 Ergebnis des Response-Tests EWS 1

Die Auswertung wurde mit der Software GeRT-CAL durchgeführt. Die Software arbeitet nach den in Abschnitt 7.3 dargestellten Rechenregeln. Die Auswertung erfolgte durch Parameteridentifikation unter Verwendung des Superpositionsverfahrens.

Ergebnis
EWS 1

Der Geothermal Response Test ergibt für den Untergrund am Standort der EWS 1 (Süd) eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von

$$\lambda_{\text{eff}} = 2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}.$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,091 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$$

errechnet.

3.2.4 Superpositionsverfahren EWS 1

In der nachfolgenden Abbildung ist das Ergebnis der Parameteridentifikation mittels Superpositionsverfahren (s. Abschnitt 7.3.3) dargestellt. Die Messwerte sind als Mittelwerte zwischen Vor- und Rücklauf in blau dargestellt. Die simulierte Temperaturkurve mit der geringsten Standardabweichung ($SD = 0,077$) zur Messkurve ist in rot dargestellt und entspricht dem Verlauf einer Temperaturkurve bei einer effektiven Untergrundwärmeleitfähigkeit von $2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und einem thermischen Bohrlochwiderstand von $0,091 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$. Für die Parameterbestimmung wurden die Messwerte ab 20 h Testlaufzeit ($>$ Mindestzeitkriterium) berücksichtigt.

Superpositions-
Verfahren EWS 1

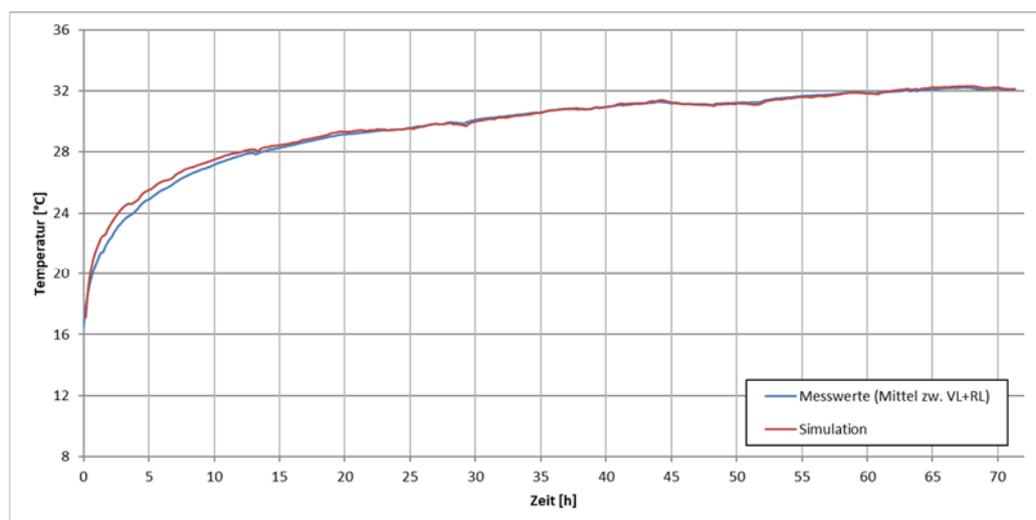


Abbildung 3: Ergebnis Superpositionsverfahren EWS 1

3.2.5 Temperaturprofile EWS 1

Zur Ermittlung der ungestörten Untergrundtemperatur wurde vor Testbeginn (am 07.07.) in der Erdwärmesonde ein Tiefen-Temperaturprofil in ca. 2 m - Schritten aufgenommen.

Temperaturprofile
EWS 1

Um das Abkühlverhalten der Erdwärmesonde zu ermitteln, wurden 1h, 2h und 3h nach Testende (am 13.07.) in der Erdwärmesonde Tiefen-Temperaturprofile in ca. 2 m - Schritten aufgenommen.

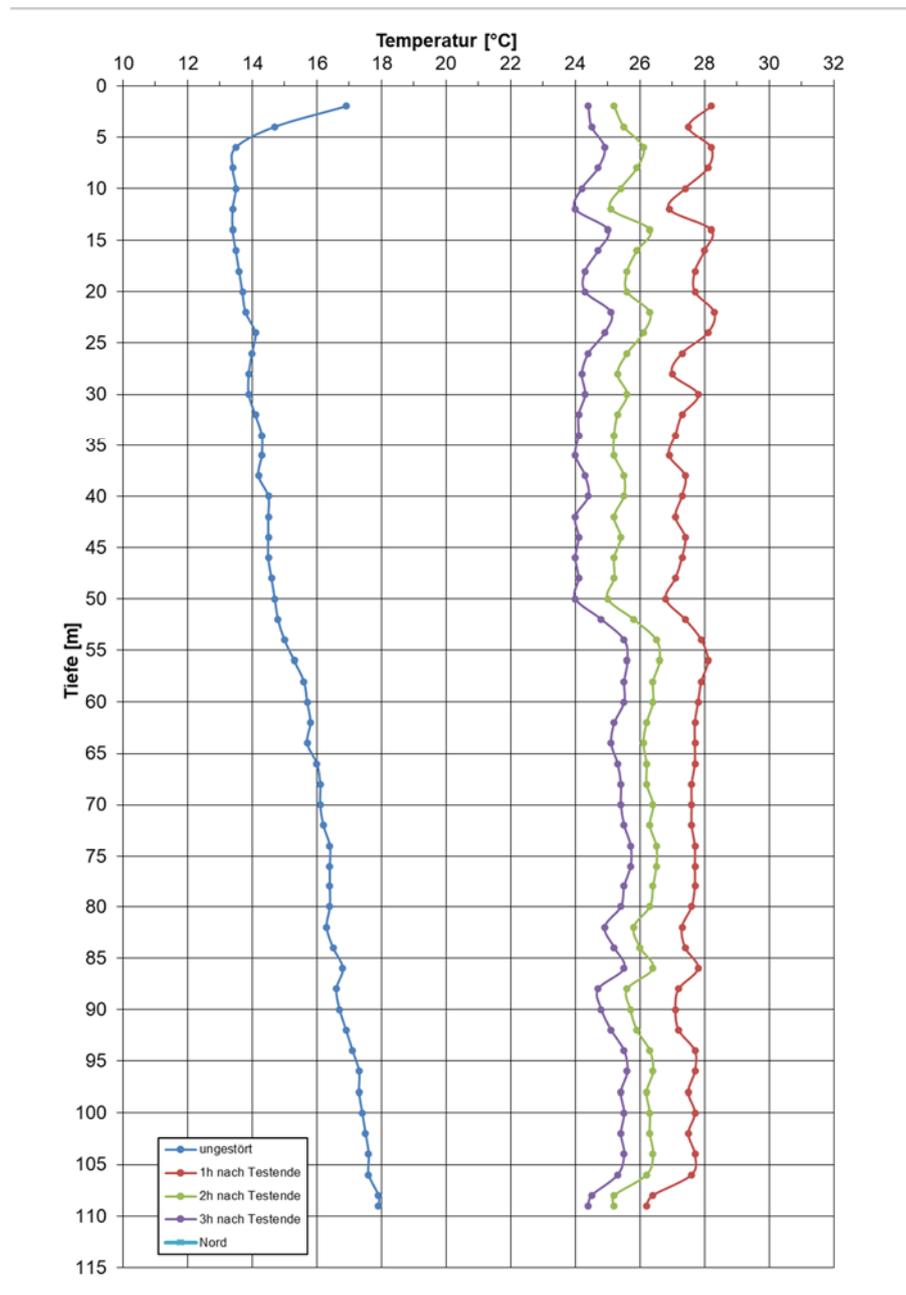


Abbildung 4: Temperaturprofile EWS 1

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils zum Zeitpunkt der Messung eine mittlere ungestörte Erdreichtemperatur von ca. 15,5 °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.

3.3 Versuchsauswertung EWS 2 (Nord)

3.3.1 Basisdaten EWS 2

- | | | |
|----------------------------------|-----------------|---------------------|
| ▪ Erdwärmesondenlänge: | ca. 97 m | Basisdaten
EWS 2 |
| ▪ Erdwärmesondentyp: | Doppel-U, DA 40 | |
| ▪ Mittlerer Bohrlochdurchmesser: | 188 mm | |
| ▪ Messzeitraum: | 67,2 h | |

3.3.2 Messdaten EWS 2

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

- | | | |
|---|-------------|--------------------|
| ▪ Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde | 6.640 W | Messdaten
EWS 2 |
| ▪ Heizarbeit über 67,2 h | ca. 446 kWh | |

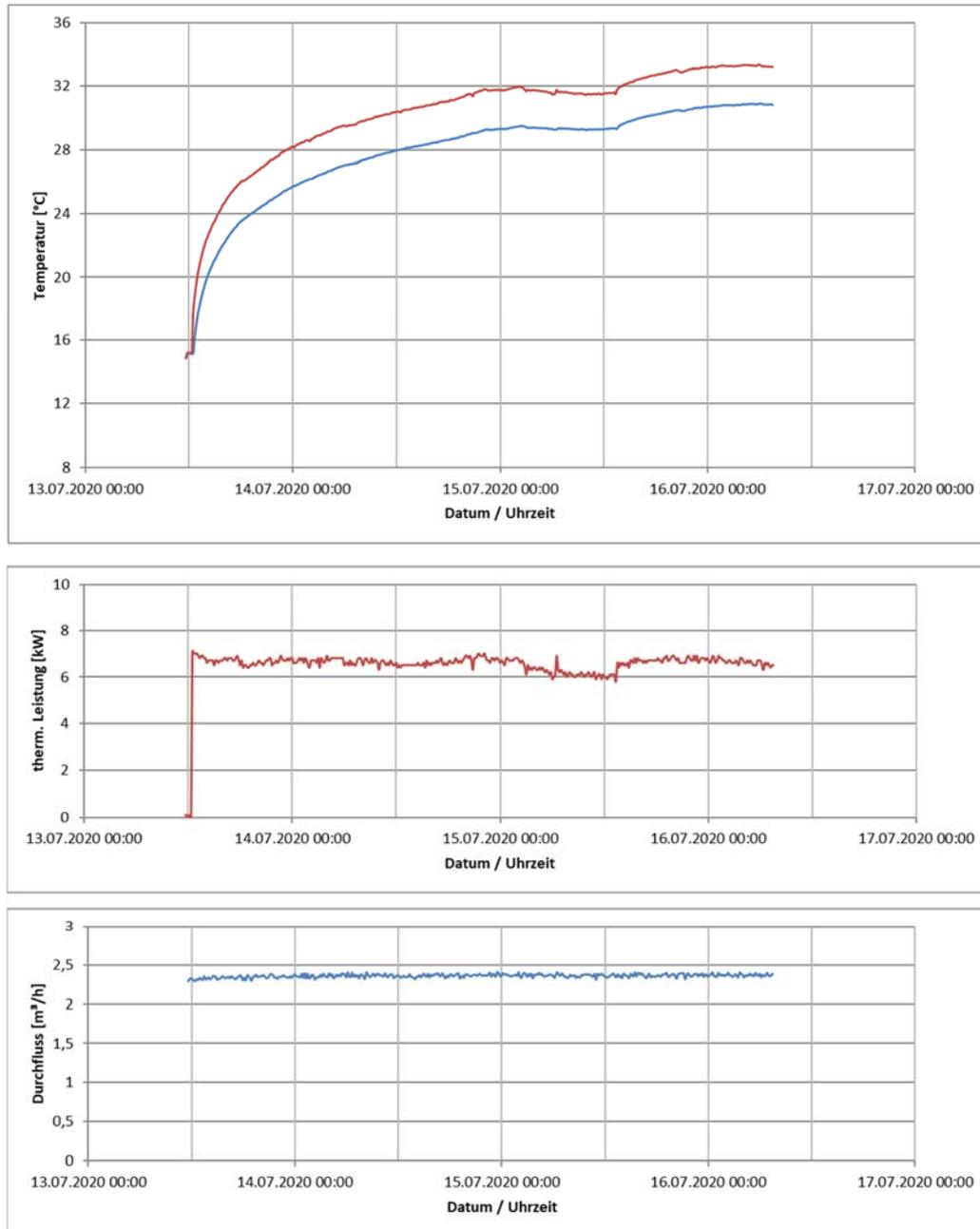


Abbildung 5: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung und Durchfluss, EWS 2

3.3.3 Ergebnis des Response-Tests EWS 2

Die Auswertung wurde mit der Software GeRT-CAL durchgeführt. Die Software arbeitet nach den in Abschnitt 7.3 dargestellten Rechenregeln. Die Auswertung erfolgte durch Parameteridentifikation unter Verwendung des Superpositionsverfahrens.

Ergebnis
EWS 2

Der Geothermal Response Test ergibt für den Untergrund am Standort der EWS 2 (Nord) eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von

$$\lambda_{\text{eff}} = 1,9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}.$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,085 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$$

errechnet.

3.3.4 Superpositionsverfahren EWS 2

In der nachfolgenden Abbildung ist das Ergebnis der Parameteridentifikation mittels Superpositionsverfahren (s. Abschnitt 7.3.3) dargestellt. Die Messwerte sind als Mittelwerte zwischen Vor- und Rücklauf in blau dargestellt. Die simulierte Temperaturkurve mit der geringsten Standardabweichung ($SD = 0,068$) zur Messkurve ist in rot dargestellt und entspricht dem Verlauf einer Temperaturkurve bei einer effektiven Untergrundwärmeleitfähigkeit von $1,9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und einem thermischen Bohrlochwiderstand von $0,068 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$. Für die Parameterbestimmung wurden die Messwerte ab 20 h Testlaufzeit (> Mindestzeitkriterium) berücksichtigt.

Superpositions-
Verfahren EWS 2

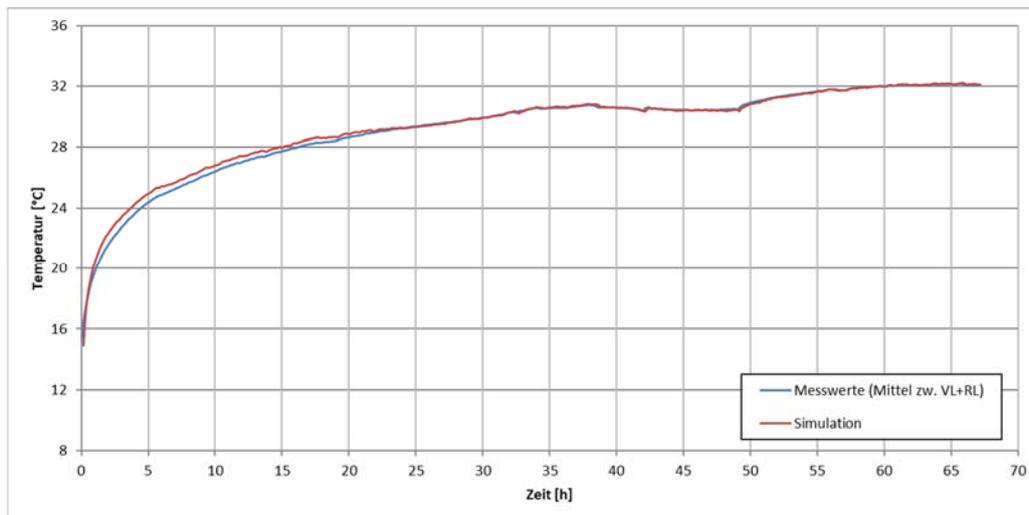


Abbildung 6: Ergebnis Superpositionsverfahren EWS 1

3.3.5 Temperaturprofile EWS 2

Zur Ermittlung der ungestörten Untergrundtemperatur wurde vor Testbeginn in der Erdwärmesonde ein Tiefen-Temperaturprofil in ca. 2 m - Schritten aufgenommen.

Temperaturprofile
EWS 2

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

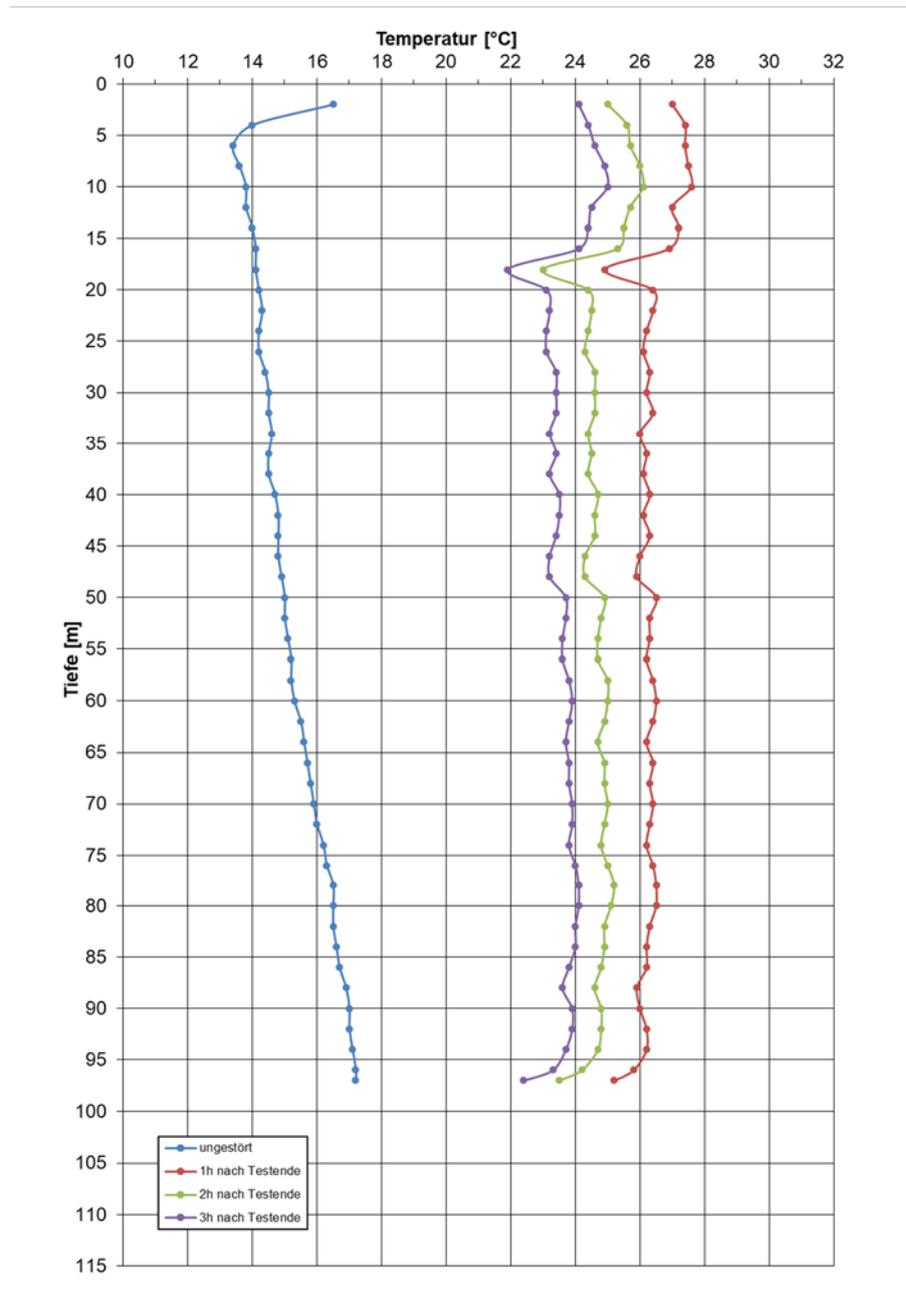


Abbildung 7: Temperaturprofile EWS 1

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils zum Zeitpunkt der Messung eine mittlere ungestörte Erdreichtemperatur von ca. 15,4 °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

Die Stadt Selters plant die Erschließung des Neubaugebietes „Im Steinert“. Die Gebäude sollen mit Wärmepumpen ausgerüstet werden.

Zusammenfassung

Zur Ermittlung der für die Anlagendimensionierung relevanten thermischen Untergrundparameter wurde an zwei Testerdwärmesonden in dem Zeitraum 07.07. bis 16.07.2020 jeweils ein Geothermal-Response-Test ausgeführt.

Die Erdwärmesonden sind ca. 109m (EWS 1) und 97m (EWS 2) lang.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst:

	EWS 1	EWS 2
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	2,0	1,9
Thermischer Bohrlochwiderstand r_b [(m·K)/W]	0,091	0,085
Ungestörte Erdreichtemperatur T_0 [°C] (10m bis Endteufe)	15,5	15,4

Für die Vordimensionierung wurde für den Tiefenbereich bis ca. 100m die Wärmeleitfähigkeit mit $\lambda = 1,9$ W/(m·K) und die ungestörte Erdreichtemperatur mit 13,5°C angenommen.

Für den Tiefenbereich bis 100m stellt sich somit die Wärmeleitfähigkeit mit dem Mittelwert von 1,95 W/(m,K) als in etwa gleich und die ungestörte Temperatur mit einem Mittelwert von 15,45°C als günstiger dar.

Diese Stellungnahme gilt nur in Ihrer Gesamtheit.

UBeG GbR

Wetzlar, 31.07.2020


 Dipl.-Geol. Marc Sauer




 Dr. Erich Mandt



5 Photodokumentation



Photodoku-
mentation

Foto 1: Durchführung des Geothermal Response Test an EWS 1 (Süd)



Foto 2: EWS 1 (Süd) nach Abbau des Testgeräts



Foto 3: Durchführung des Geothermal Response Test an EWS 2 (Nord)



Foto 4: EWS 2 (Nord) nach Abbau des Testgeräts

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 (2001): Thermische Nutzung des Untergrunds, Bl. 1 und Bl. 2. – 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

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 entsprechend 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.
- Die Mindestdauer eines Tests (eine Leistungsstufe) beträgt ca. 48 Stunden.

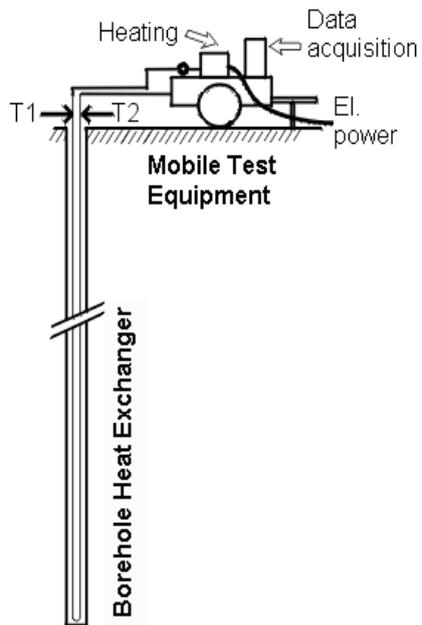
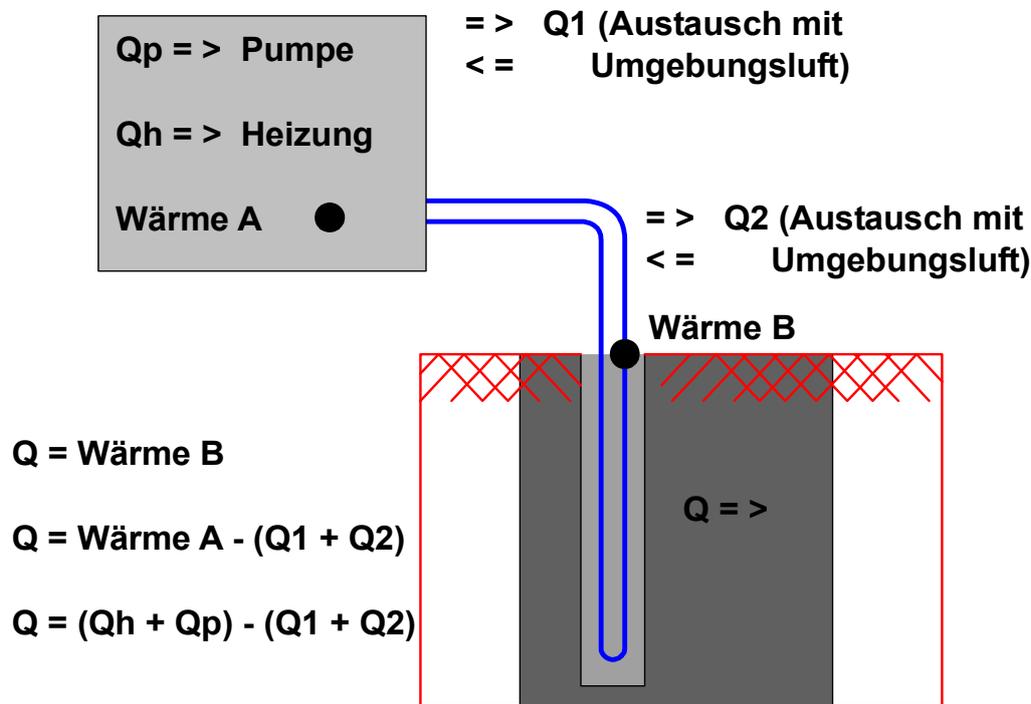


Abbildung A1: Schema eines Geothermal Response Test (GeRT, links) und Durchführung eines Geothermal Response Test mit modernem Gerät von UBeG (rechts)

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 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.

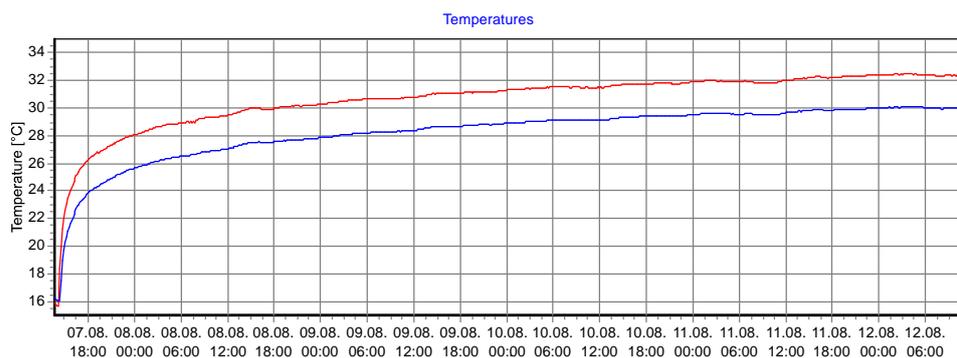


Abbildung A3: Typische Temperaturkurve eines Geothermal Response Test (GeRT)

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:

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

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 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 $\lambda/\rho c_p$	[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 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 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).

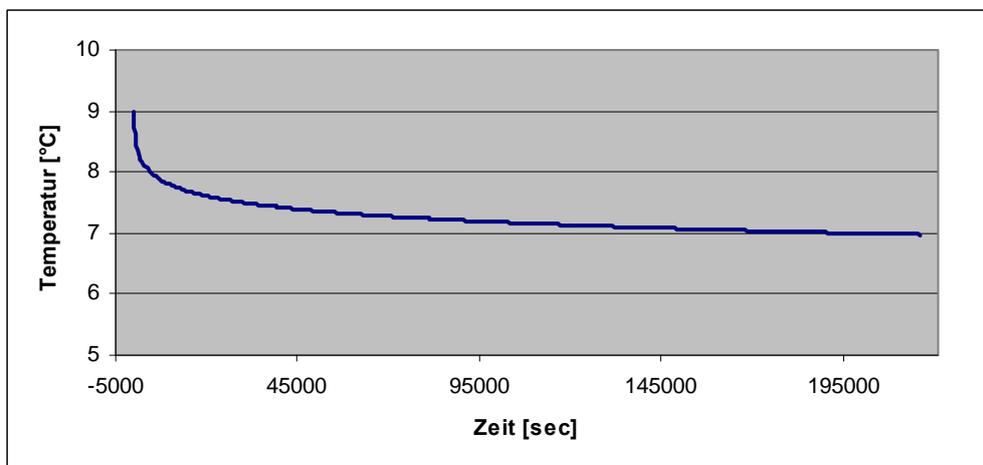


Abbildung A3: Impuls 1: 10 W/m für 60 Stunden (Stunde 1 bis Stunde 60)

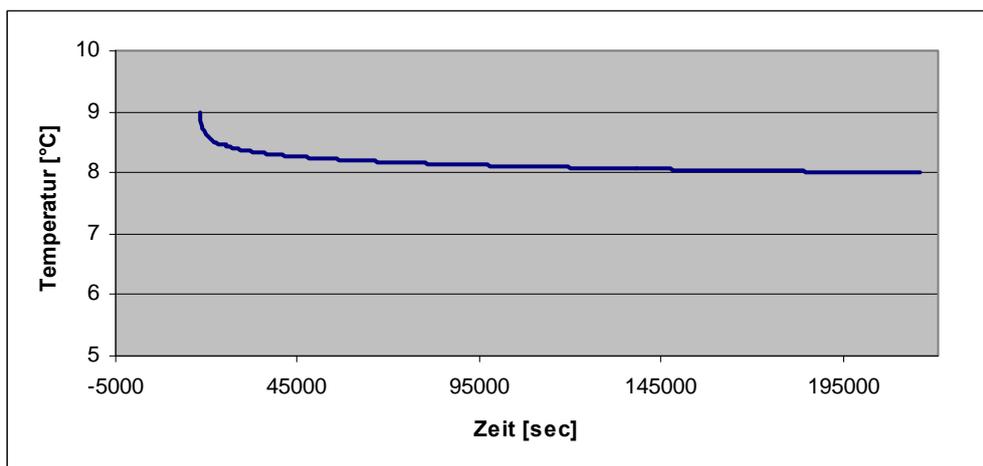


Abbildung A4: Impuls 2: 5 W/m für 54 Stunden (Stunde 6 bis Stunde 60)

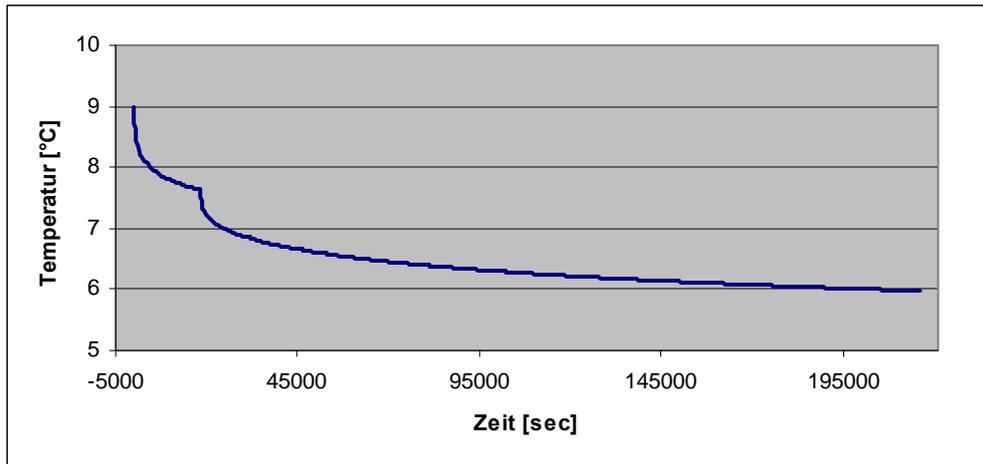


Abbildung A5: Summe Impuls 1 + Impuls 2

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.

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:

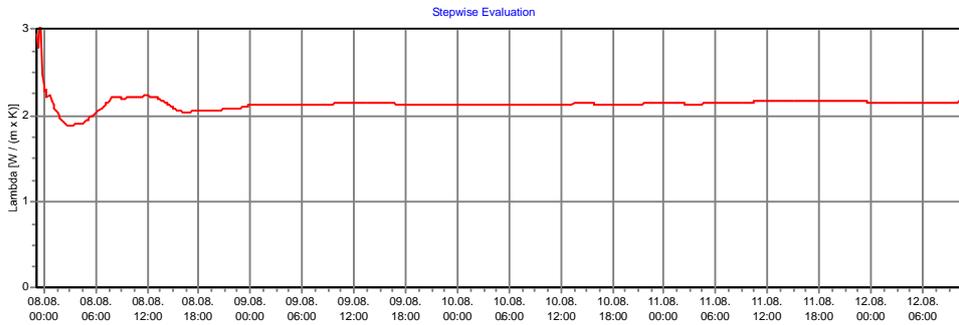


Abbildung A6: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, stabiles Ergebnis

b) Grundwassereinfluss:

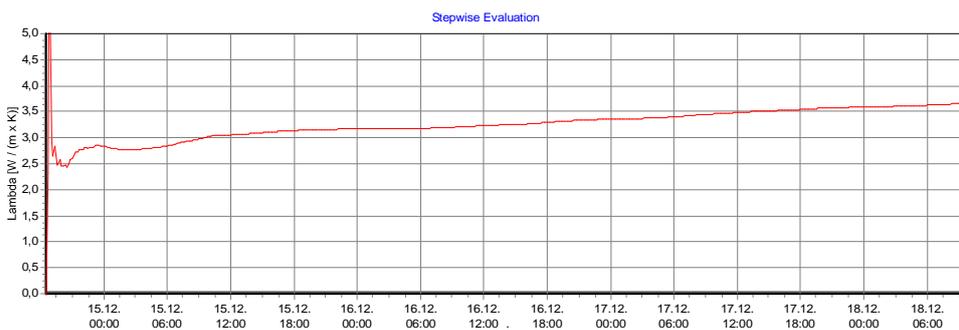


Abbildung A7: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, Grundwassereinfluss

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

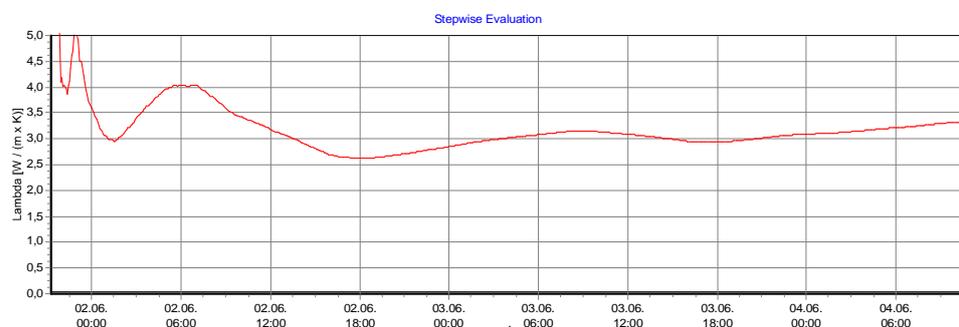


Abbildung A8 Stufenweise Auswertung eines GeRTs, Testzeit zu kurz