

Grundbaulabor Trier | Wolkerstraße 4 | 54296 Trier

Centre Hospitalier Emile Mayrisch
Herrn Trierweiler/Herrn Weber
B.p. 436
L-4005 Esch-sur-Alzette

DIPL.-ING. E. LEHMANN | Ingenieur GmbH

Wolkerstraße 4 | D-54296 Trier
T. +49 651 93881 - 0 | F. +49 651 93881 - 81
info@gbt-trier.de | www.gbt-trier.de

Sparkasse Trier | BIC: TRISDE55XXX
IBAN: DE32 5855 0130 0000 9079 15
USt-ID: DE 149 880 707 | St.-Nr. 42/662/0042/1

BIL | BIC: BILLULL
IBAN: LU06 0022 1607 0162 0000
USt-ID: LU 125 149 15 | Lux TVA 1983 3400 129

Bericht Nr.: 32301-11
Ref.: Lm
Datum: 17. Oktober 2024

Geschäftsführer
E. Lehmann, Dipl.-Ing. (TU) | B. Mertes, Dipl.-Ing. (Univ.)
Amtsgericht Wittlich, HRB-Nr. 2202 | Gerichtsstand Trier

Geotechnische Stellungnahme: Ergebnismitteilung der ausgeführten Geothermal-Response-Tests an vier Geothermiebohrungen

Projekt:	Neubau eines Klinikzentrums „Südspidol“ in Esch-sur-Alzette
Auftraggeber:	Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM)
Bezug:	Geotechnisches Gutachten Nr. 32301-1 vom 23. Dezember 2016
Ortstermine vom:	24. Juli 2024 12., 21., 23., 26. und 28. August 2024, sowie 09. und 12. September 2024

E. Lehmann, Dipl.-Ing. (TU)

1 Vorbemerkung

Das Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM) plant den Neubau eines Klinikzentrums in Esch-sur-Alzette. Das Grundbaulabor Trier (GBL-T) führte hierfür eine Baugrunderkundung durch und gab den geotechnischen Bericht Nr. 32301-1 mit Gründungs- und Verbauempfehlungen ab. Anschließend wurden durch das GBL-T diverse gutachterliche Stellungnahmen hinsichtlich geotechnischer Problemstellungen (Gründung, Wasserhaltung, Zugversuche an GEWI-Pfählen) abgegeben (Berichte Nr. 32301-2 bis -10).

Im Zuge der voranschreitenden Planung wurde das GBL-T mit der Herstellung von Erdwärmesonden und der Durchführung von Geothermal-Response-Tests beauftragt, um gesicherte Bemessungskennwerte für die Bemessung des geplanten Erdwärmesondenfeldes zu erhalten. Die Herstellung der Erdwärmesonden sowie die Geothermal-Response-Tests wurden von der Ehlen & Söhne GmbH im Auftrag des GBL-T ausgeführt. Die Organisation und die Überwachung der Arbeiten erfolgte durch das GBL-T.

2 Stellungnahme

Zur Ermittlung gesicherter Bemessungskennwerte wurden im Bereich des Baufeldes vier Erdwärmesonden bis in 200 m Tiefe ausgeführt und im Anschluss an den Erdwärmesonden Geothermal-Response-Tests ausgeführt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle: Ergebnisse der Geothermal-response Tests

Sonde	Länge der Bohrung [m]	Durchmesser Bohrung [mm]	Sondenart	Mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} [W/m • K]	Thermischer Bohrloch-widerstand R_b [m • K/W]
1	200	bis 14m = 168 mm ab 14 m = 142 mm	Doppel-U DA 40 mm ThermoCem plus	2,35	0,079
2	200	bis 14m = 168 mm ab 14 m = 142 mm	Doppel-U DA 40 mm ThermoCem plus	2,32	0,079
3	200	bis 14m = 168 mm ab 14 m = 142 mm	Doppel-U DA 40 mm ThermoCem plus	2,29	0,081
4	200	bis 14m = 168 mm ab 14 m = 142 mm	Doppel-U DA 40 mm ThermoCem plus	2,33	0,078

Die Bohrprotokolle sowie die detaillierten Ergebnisse der Geothermal-Response-Tests können den Anlagen entnommen werden.

E. Lehmann, Dipl.-Ing. (TU)

- Anlage 1: Lageplan der ausgeführten Erdwärmebohrungen
- Anlage 2: Bohrprotokolle EAU-AUT-24-0081 der Ehlen & Söhne GmbH
- Anlage 3: Bericht „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes mittels Geothermal Response Test (GeRT)“ zu Projekt-Nr. 1770-2024 der UBeG GmbH & Co. KG

Anlage 1

Lageplan der ausgeführten Erdwärmebohrungen

Projekt: Neubau eines Klinikzentrums „Südspidol“
in Esch-sur-Alzette

Auftraggeber: Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM)

Lageplan M. 1:1.000



GRUNDBAULABOR TRIER
Beratende Ingenieure für Geotechnik
DIPLO.-ING. E. LEHMANN | Ingenieur GmbH
Volkerstraße 4 | D-54296 Trier
T. +49 651 93881 0 | F. +49 651 93881 81
info@gbt-trier.de | www.gbt-trier.de

Auftraggeber: Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM)

Projekt: Neubau eines Klinikzentrums „Südspidol“ in Esch-sur-Alzette

Planinhalt: Lageplan

Maßstab:	Gezeichnet:	Bericht-Nr.:	Anlage:	Trier, 17.10.2024
1:1.000	Sm	32301-11	1	

Anlage 2

Bohrprotokolle EAU-AUT-24-0081 der Ehlen & Söhne GmbH

Projekt: Neubau eines Klinikzentrums „Südspidol“
in Esch-sur-Alzette

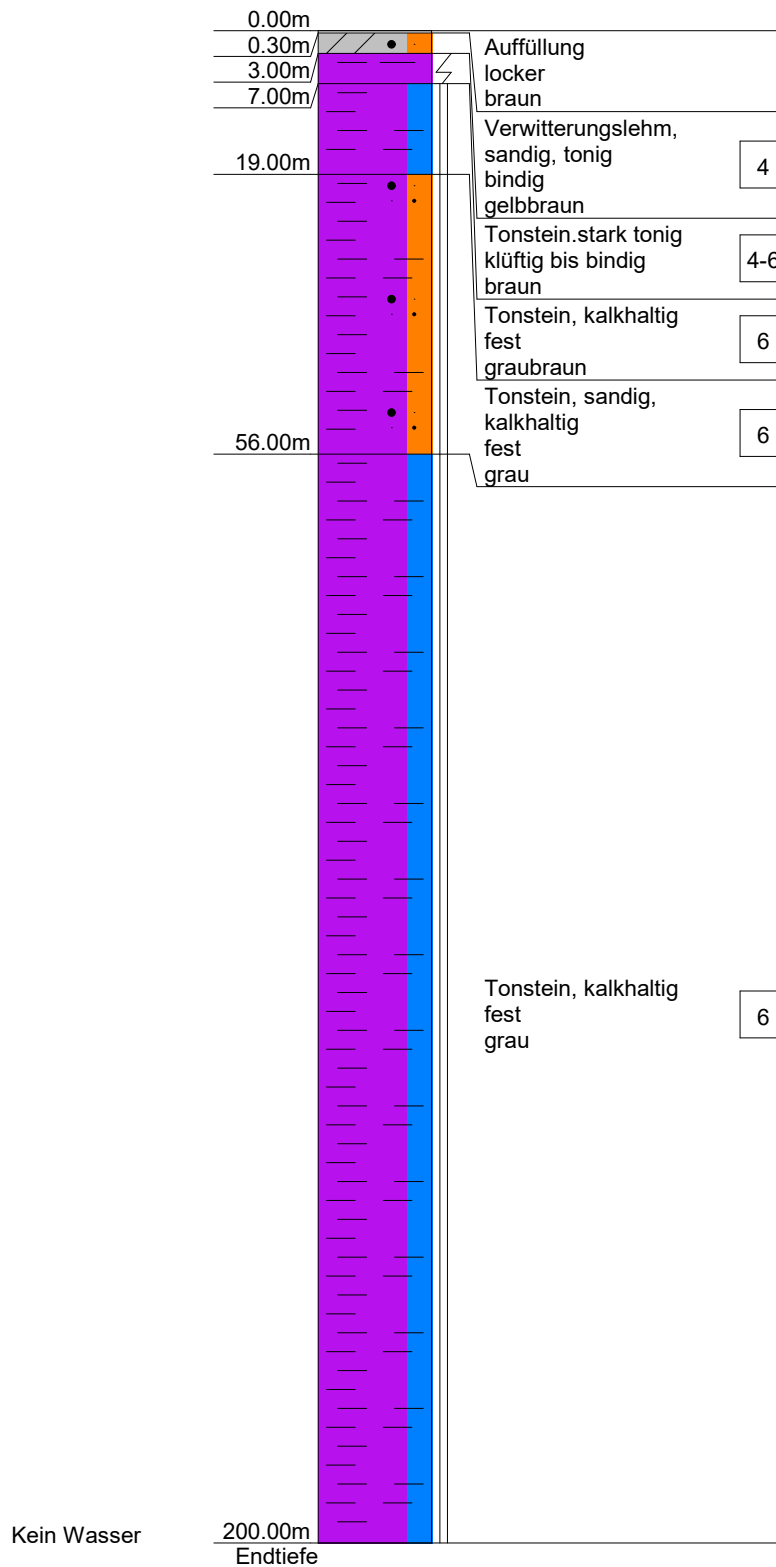
Auftraggeber: Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM)



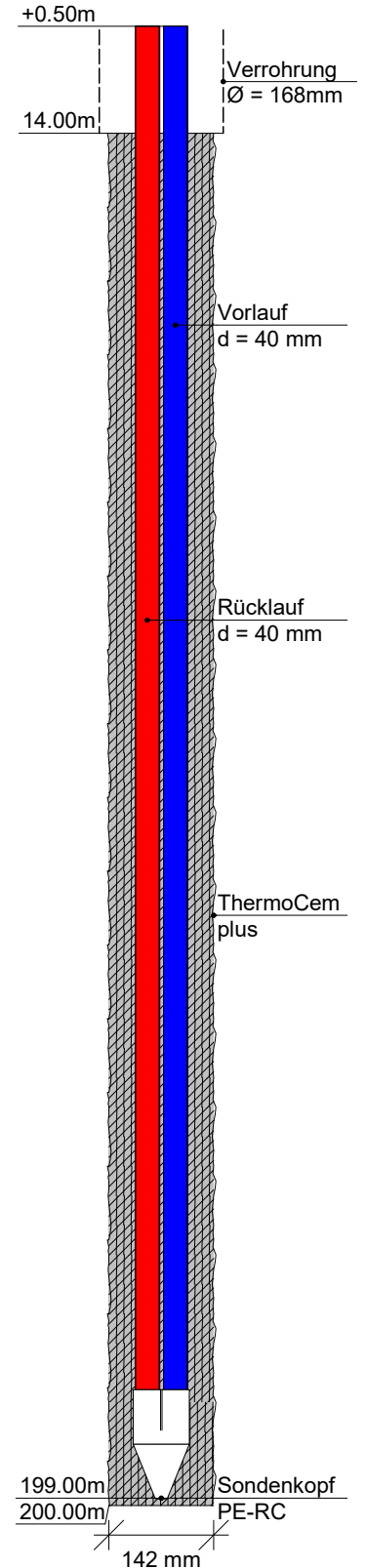
Erdwärme + Brunnenbohrungen


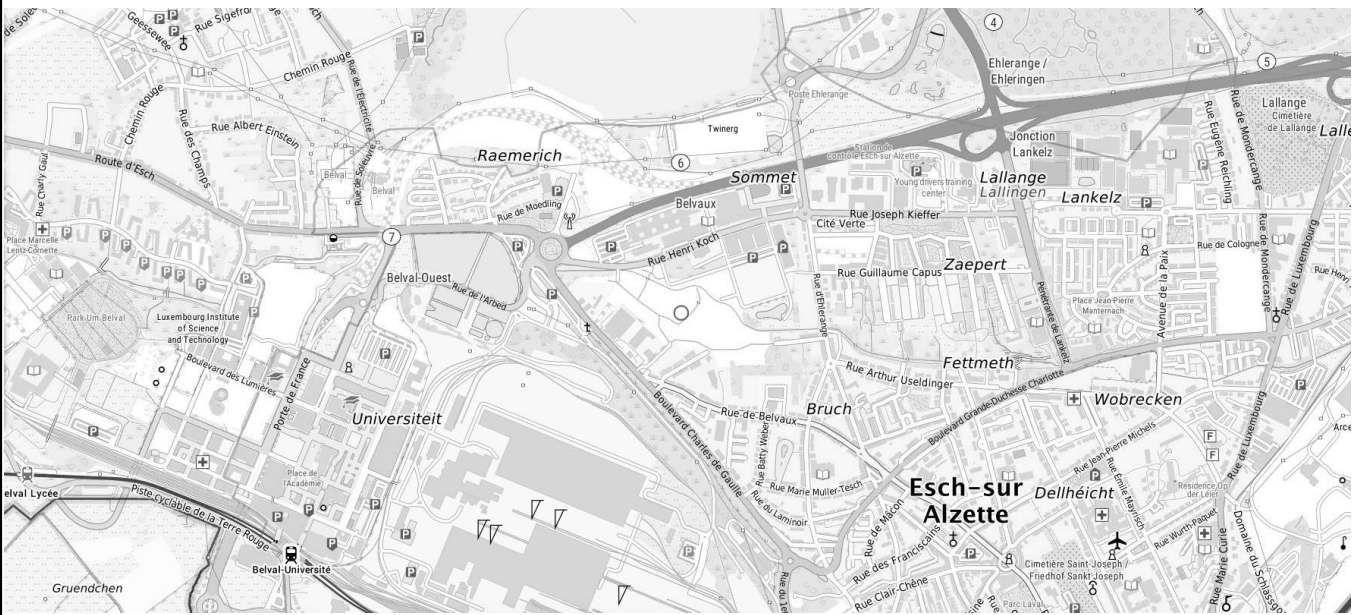
Projekt: Esch-sur-Alzette - 24 Klinikzentrum Süd			
Aktenzeichen:	EAU-AUT-24-0081		
Bohrmeter: 4x200m	Gesamt: 800m		
Gemarkung:	Esch-sur-Alzette		
Flur:	2360/19450, 2352	Flurstück:	2213/19613, 2213
Bohrung: 23. - 30.08.2024			
Koord.: 280130 / 5488234			
Geräteführer:	L. Schnitzler	Bohrsäule:	1, 2, 3, 4
Maßstab: 1: 1000 / 1: 10			
Autor:	F. Thelen M.Sc.	Datum:	03.09.2024


Bohrprofil




Erdwärmesonde



			
Kopfblatt		Name des Unternehmens	Ehlen & Söhne GmbH
Aufschlussart: Bohrung 24 Klinikzentrum Südspidol		Name des Auftraggebers	Centre Hospitalier Emile Mayrisch
Projektbezeichnung		Südspidol - Esch-sur-Alzette	Nr des Projekts 20240176
Datum		23. - 30.08.2024	Höhe 290m
Lage		Neigung der Bohrung	~ 90°
280130	5488234	Richtung der Bohrung	vertikal
Tiefe der freien Grundwasseroberfläche		- m	Tiefe der Bohrung 200.00 m
Lageskizze (unmaßstäblich) 			
Ausführung und Typ des Entnahmegeräts		Rotomax XL GTCi	
Beigefügte Protokolle		<input type="checkbox"/> Bohrprotokoll <input type="checkbox"/> Probenentnahmeprotokoll <input checked="" type="checkbox"/> Verfüllprotokoll <input checked="" type="checkbox"/> Schichtenverzeichnis <input type="checkbox"/> Ausbauprotokoll einer Grundwassermessstelle <input type="checkbox"/> Protokoll der Grundwassermessungen <input checked="" type="checkbox"/> Andere: Bestätigung - Einhaltung Nebenbestimmungen und Beachtung	
Bemerkungen (Unterbrechungen, Hindernisse, Schwierigkeiten usw.)			
Name des qualifizierten Technikers		F. Thelen M.Sc.	
Unterschrift des qualifizierten Technikers			

<div><div>Ehlen</div><div>Erwärmung + Brunnenbohrungen</div></div>		<div>Schichtenverzeichnis nach ISO 14688-1 und ISO 14689-1</div>					<div>Seite: 4</div> <div>Aufschluss: 24 Klinikzentrum Sü</div> <div>Projektnr: 20240176</div>	
Name des Unternehmens: Ehlen & Söhne GmbH		Name und Unterschrift des qualifizierten Technikers: F. Thelen M.Sc.						
Name des Auftraggebers: Centre HospitalierEmile								
Bohrverfahren: Datum: 23. - 30.08.2024								
Durchmesser: 142 mm Neigung: ~ 90°								
Projektbezeichnung: Südspidol - Esch-sur-Alzette								
1	2	3	4	5	6	7		
Tiefe bis m	Bezeichnung der Boden- bzw. Felsart Ergänzende Bemerkungen Geol. Benennung (Stratigraphie)	Farbe Kalk-gehalt	Beschreibung der Probe <ul style="list-style-type: none">- Konsistenz, Plastizität, Härte, einachsige Festigkeit- Kornform, Matrix- Verwitterung, Trennflächen usw.	Beschreibung des Bohrfortschritts <ul style="list-style-type: none">- Bohrbarkeit/Kernform- Meißeleinsatz- Beobachtungen usw.	Proben Versuche <ul style="list-style-type: none">- Typ- Nr- Tiefe	Bemerkungen <ul style="list-style-type: none">- Wasserführung/Spülung- Bohrwerkzeuge/Verrohrung- Kernverlust- Kernlänge		
0.30	Auffüllung	braun	locker	Bohrbarkeit leicht		Spülbohrverfahren bis 14m Ø = 168mm ab 14m Ø = 142mm		
		0						
3.00	Verwitterungslehm, sandig, tonig	gelbbraun	bindig	leicht				
	Jura / Unterjura	+						
7.00	Tonstein.stark tonig	braun	klüftig bis bindig	leicht				
	stark verwittert							
	Jura / Unterjura / Lias	+						

		Seite: 5				
		Aufschluss: 24 Klinikzentrum Sü				
		Projektnr: 20240176				
1	2	3	4	5	6	7
Tiefe bis m	Bezeichnung der Boden- bzw. Felsart Ergänzende Bemerkungen Geol. Benennung (Stratigraphie)	Farbe Kalk- gehalt	Beschreibung der Probe - Konsistenz, Plastizität, Härte, einachsige Festigkeit - Kornform, Matrix - Verwitterung, Trennflächen usw.	Beschreibung des Bohrfortschritts - Bohrbarkeit/Kernform - Meißeleinsatz - Beobachtungen usw.	Proben Versuche - Typ - Nr - Tiefe	Bemerkungen - Wasserführung/Spülung - Bohrwerkzeuge/Verrohrung - Kernverlust - Kernlänge
19.00	Tonstein, kalkhaltig	graubraun	fest	Bohrbarkeit leicht		
	deutlich verwittert					
	Jura / Unterjura / Lias	+				
56.00	Tonstein, sandig, kalkhaltig	grau	fest	mittel		
	Jura / Unterjura / Lias	++				
200.00	Tonstein, kalkhaltig	grau	fest	leicht		kein Wasser
	Jura / Unterjura / Lias	++				

Anlage 3

Bericht zu Projekt-Nr. 1770-2024 der UBeG GmbH & Co. KG

Projekt: Neubau eines Klinikzentrums „Südspidol“
in Esch-sur-Alzette

Auftraggeber: Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM)

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

BV Klinikzentrum Süd / Südspidol
Rue Henri Koch
4282 Esch-sur-Alzette
Luxemburg

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: 04.10.2024

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORGANG	3
2	BOHRUNG UND SONDENERSTELLUNG	3
3	GEO THERMAL RESPONSE TESTS	4
3.1	Aufbau der Testapparatur, Geländearbeiten	4
3.2	Versuchsauswertung EWS 1	5
3.2.1	Basisdaten EWS 1	5
3.2.2	Messdaten EWS 1	5
3.2.3	Ergebnis des Response-Tests EWS 1	6
3.2.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	6
3.2.5	Temperaturprofile EWS 1	7
3.3	Versuchsauswertung EWS 2	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	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	10
3.3.5	Temperaturprofile EWS 2	11
3.4	Versuchsauswertung EWS 3	13
3.4.1	Basisdaten EWS 3	13
3.4.2	Messdaten EWS 3	13
3.4.3	Ergebnis des Response-Tests EWS 3	14
3.4.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	14
3.4.5	Temperaturprofile EWS 3	15
3.5	Versuchsauswertung EWS 4	17
3.5.1	Basisdaten EWS 4	17
3.5.2	Messdaten EWS 4	17
3.5.3	Ergebnis des Response-Tests EWS 4	18
3.5.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	18
3.5.5	Temperaturprofile EWS 4	19
4	ZUSAMMENFASSUNG	21
5	FOTODOKUMENTATION	22
6	LITERATUR.....	26
7	ANHANG: INFORMATIONEN ZUM GEO THERMAL RESPONSE TEST (GeRT)	27
7.1	Allgemeines zu Geothermal Response Tests.....	27
7.2	Durchführung eines GeRT	29
7.3	Auswertung eines GeRT	30
7.3.1	Auswertung mit Linienquellentheorie	31
7.3.2	Parameteridentifikation mit numerischer Simulation	32
7.3.3	Parameteridentifikation durch Superposition der Linienquellenapproximation (Superpositionsverfahren)	32
7.4	Stufenweise (sequentielle) Auswertung	34

1 Vorgang

Auf dem Gelände des Klinikzentrum Süd / Südspidol in L-4282 Esch-sur-Alzette soll eine Erdwärmesondenanlage errichtet werden.

Vorgang

Durch das ausführende Bohrunternehmen, Fa. Ehlen & Söhne GmbH, Wiesbaum wurde UBeG beauftragt, an vier erstellten Erdwärmesonden jeweils einen Geothermal-Response-Test zur Ermittlung der thermischen Untergrundparameter (Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und thermischer Bohrlochwiderstand) auszuführen.

Die Response-Tests wurden durch UBeG im Zeitraum 09.09. bis 13.09.2024 ausgeführt.

In dem vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der Testdurchführungen dargestellt.

2 Bohrung und Sondenerstellung

Die Bohrungen wurden durch den Auftraggeber jeweils bis in eine Tiefe von ca. 200 m ausgeführt und zu Erdwärmesonden ausgebaut. Die eingebauten Doppel-U-Erdwärmesonden DA 40 mm sind jeweils 200 m lang.

EWS

Der Bohrdurchmesser betrug jeweils 142 mm, der Durchmesser der in allen Bohrungen bis 14 m Tiefe eingesetzten temporären Schutzverrohrung betrug 168 mm. Über die Sondereinbaulänge ergibt sich jeweils ein mittlerer Bohrlochdurchmesser von ca. 143,8 mm.

Bei den Bohrarbeiten wurden folgende Schichten angetroffen:

0 – 0,3 m	Auffüllung
0,3 – 3 m	Verwitterungslehm, sandig, tonig
3 – 7 m	Tonstein, stark tonig
7 – 19 m	Tonstein, kalkhaltig
19 – 56 m	Tonstein, sandig
56 – 200 m	Tonstein, kalkhaltig

Die Hinterfüllung des Bohrlochringraumes erfolgte mit dem thermisch verbesserten Verfüllmaterial ThermoCem plus.

Die Erdwärmesonden wurden bis zum 30.08.2024 fertig gestellt.

Die Lage der Erdwärmesonden auf dem Projektareal ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Lage der vier Test-EWS auf dem Projektareal

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 Montag, dem 09.09.2024 wurden die Messapparaturen an die Erdwärmesonden EWS 1 und 2 angeschlossen und in Betrieb genommen und liefen bis Mittwoch, den 11.09.2024. Am Mittwoch wurden die Messapparaturen an die EWS 3 und 4 angeschlossen. Die Tests liefen bis Freitag, den 13.09.2024.

Geländearbeiten

Die Stromversorgung erfolgte mittels mobilem Stromgenerator.

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

Um das Abkühlverhalten der Erdwärmesonden zu ermitteln, wurden nach Testende in der jeweiligen Erdwärmesonde zwei Tiefen-Temperaturprofile aufgenommen.

3.2 Versuchsauswertung EWS 1

3.2.1 Basisdaten EWS 1

- Erdwärmesondenlänge: 200 m
- Erdwärmesondentyp: Doppel-U, DA 40
- Mittlerer Bohrlochdurchmesser: 143,8 mm
- Messzeitraum: 44,83 h

Basisdaten
EWS 1

3.2.2 Messdaten EWS 1

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

Messdaten
EWS 1

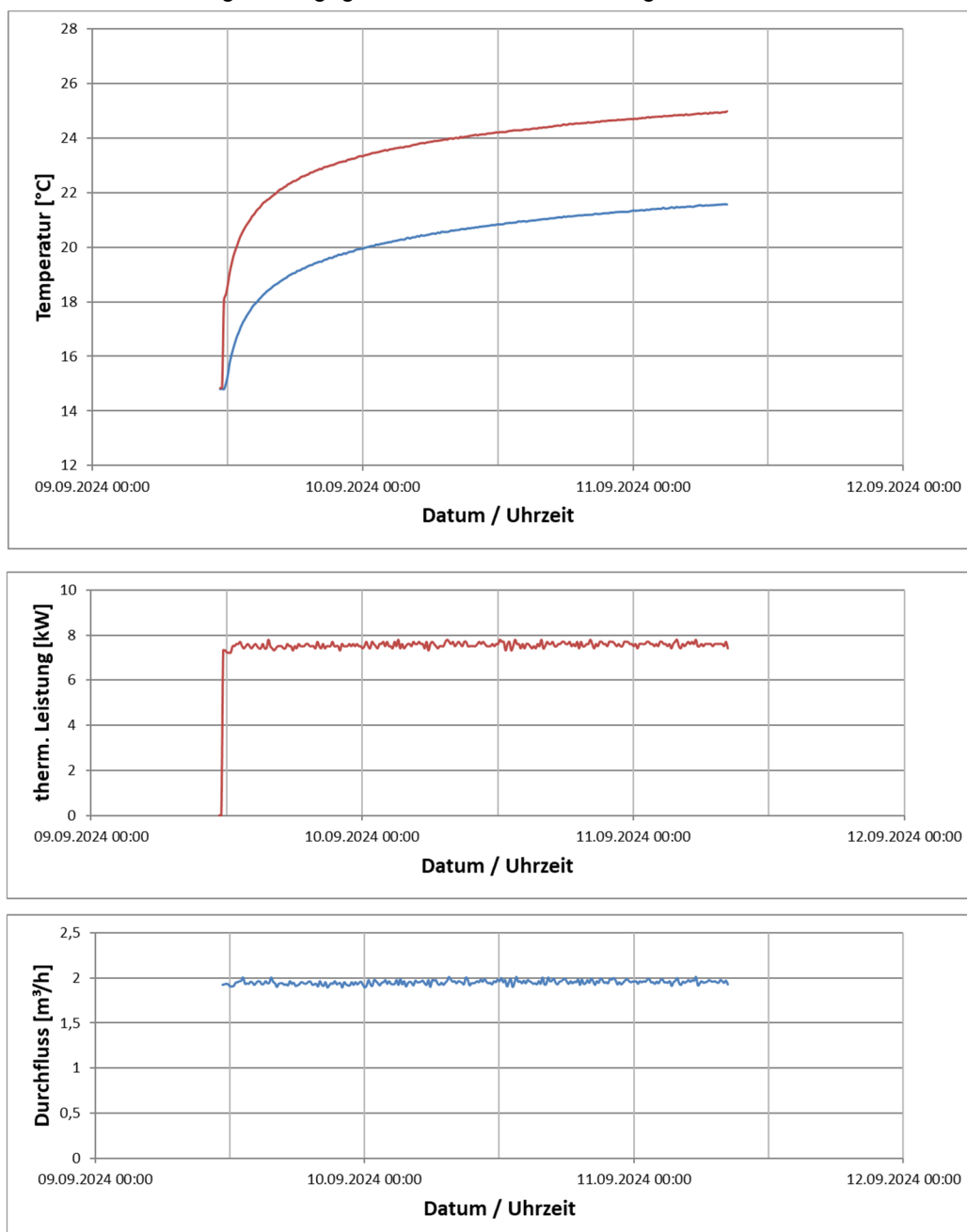


Abbildung 2: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung des Testgeräts und Durchfluss, EWS 1

- Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde 7.557 W
- Heizarbeit des Testgeräts über 44,83 h ca. 339 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.

Ergebnis
EWS 1

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

$$\lambda_{\text{eff}} = 2,35 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,079 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

errechnet.

3.2.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Für den durchgeführten Test ist das Ergebnis der stufenweisen Auswertung in der Abbildung 3 (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 (7,1 h) dargestellt.

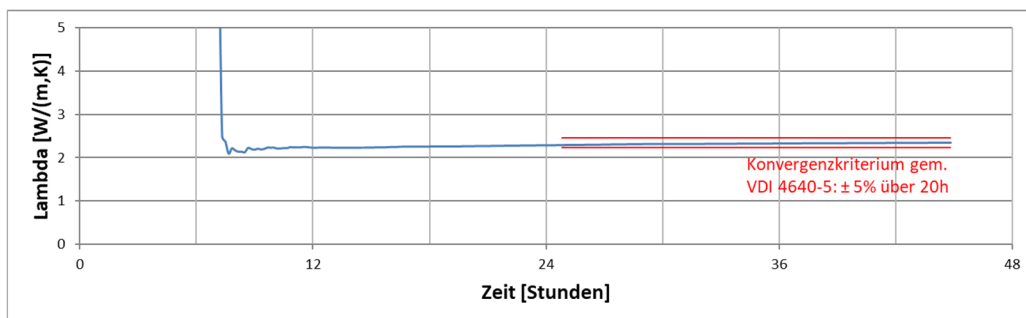


Abbildung 3: Stufenweise Auswertung

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich das Testergebnis bei einem Wert von ca. $2,35 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ stabilisiert. Die Testzeit ist ausreichend lang.

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

3.2.5 Temperaturprofile EWS 1

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

Temperaturprofile
EWS 1

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

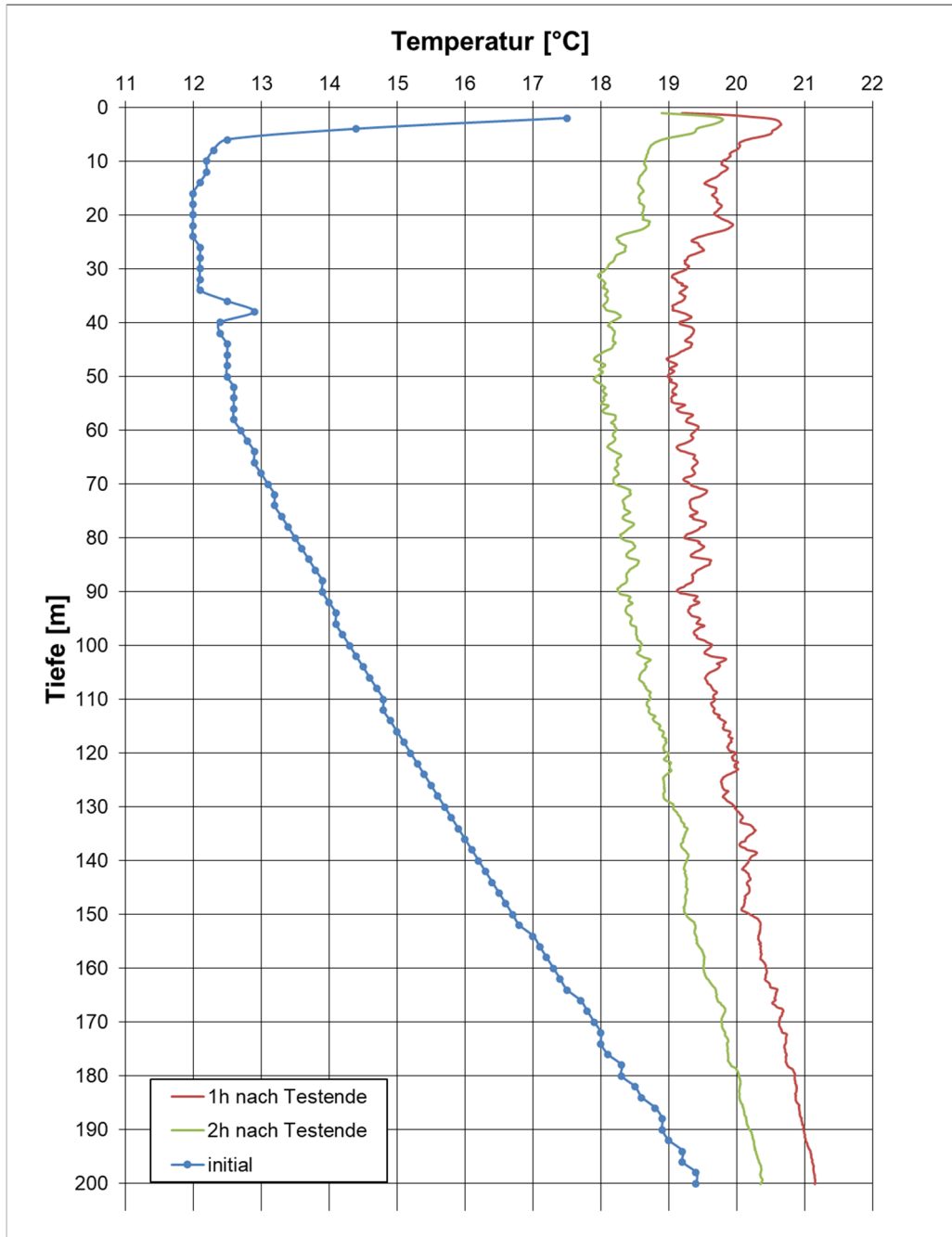


Abbildung 4: Temperaturprofile EWS 1

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

Die Temperaturprofile nach Ende des Tests wurden mittels kabelloser Messsonde (Geosniff) der Fa. Enoware in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (ca. 5 Messungen pro Meter) aufgenommen. Das Gerät zeichnet den Druck der überstehenden Wassersäule auf, der dann in eine entsprechende Tiefe umgerechnet wird.

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10 m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils zum Zeitpunkt der Messung eine mittlere initiale Erdoberflächentemperatur von 14,93 °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

3.3.1 Basisdaten EWS 2

- Erdwärmesondenlänge: 200 m
- Erdwärmesondentyp: Doppel-U, DA 40
- Mittlerer Bohrlochdurchmesser: 143,8 mm
- Messzeitraum: 44 h

Basisdaten
EWS 2

3.3.2 Messdaten EWS 2

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

Messdaten
EWS 2

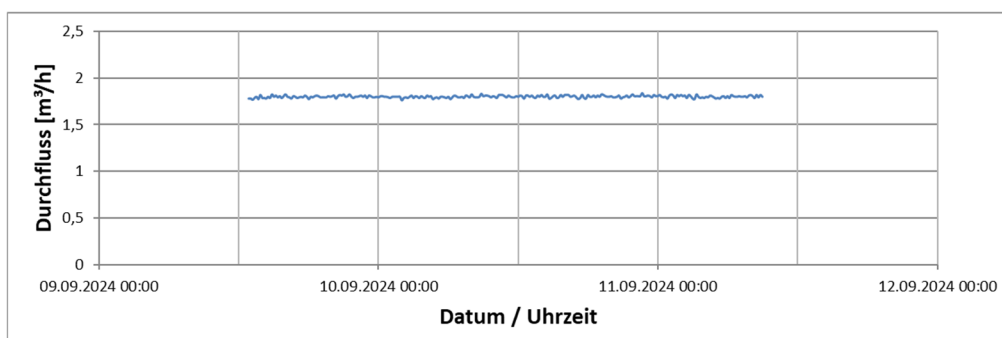
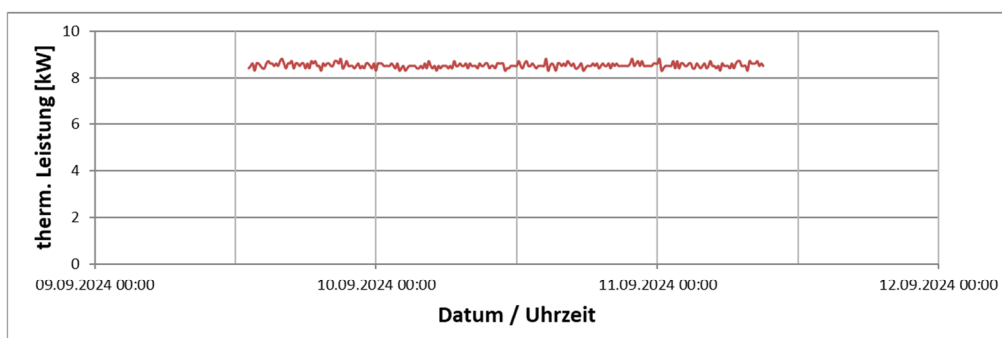
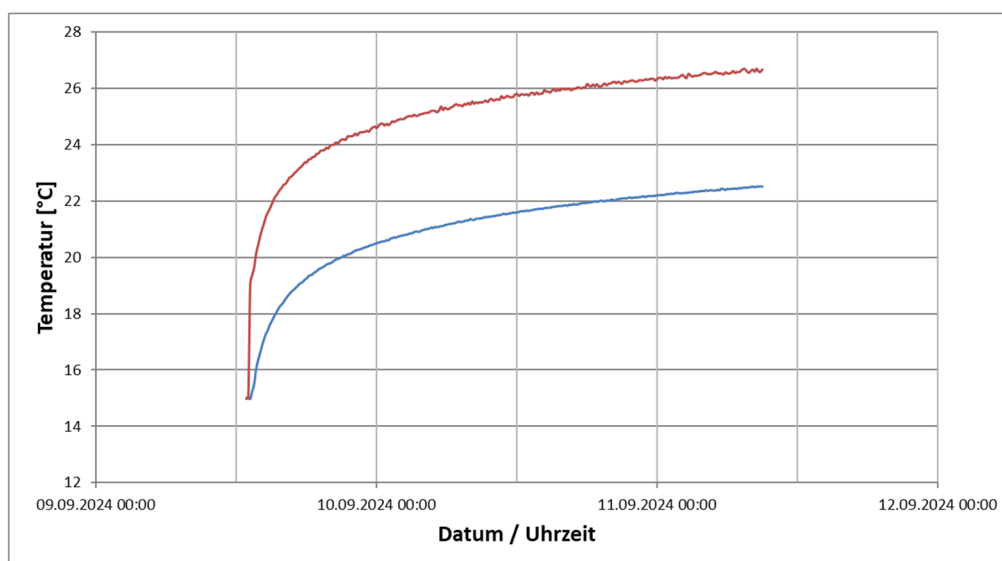


Abbildung 5: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung des Testgeräts und Durchfluss, EWS 2

- Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde 8.545 W
- Heizarbeit des Testgeräts über 44 h ca. 376 kWh

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.

Ergebnis
EWS 2

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

$$\lambda_{\text{eff}} = 2,32 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,079 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

errechnet.

3.3.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Für den durchgeführten Test ist das Ergebnis der stufenweisen Auswertung in der Abbildung 6 (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 (7,4 h) dargestellt.

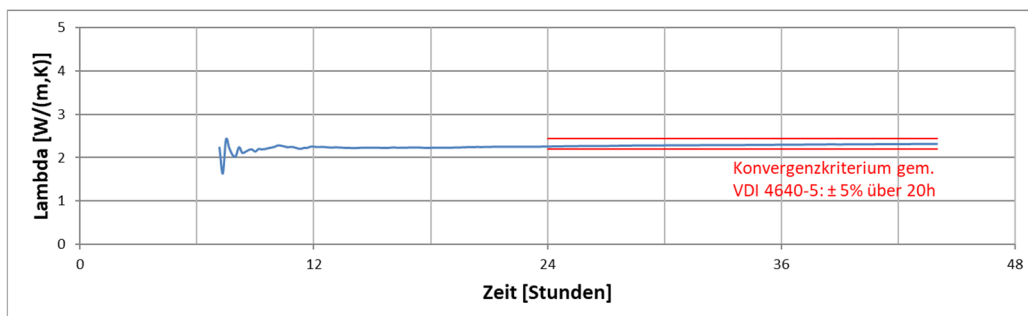


Abbildung 6: Stufenweise Auswertung

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich das Testergebnis bei einem Wert von ca. $2,32 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ stabilisiert. Die Testzeit ist ausreichend lang.

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

3.3.5 Temperaturprofile EWS 2

Zur Ermittlung der initialen 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 1 h und 2 h nach Testende in der Erdwärmesonde Tiefen-Temperaturprofile in ca. 2 m - Schritten aufgenommen.

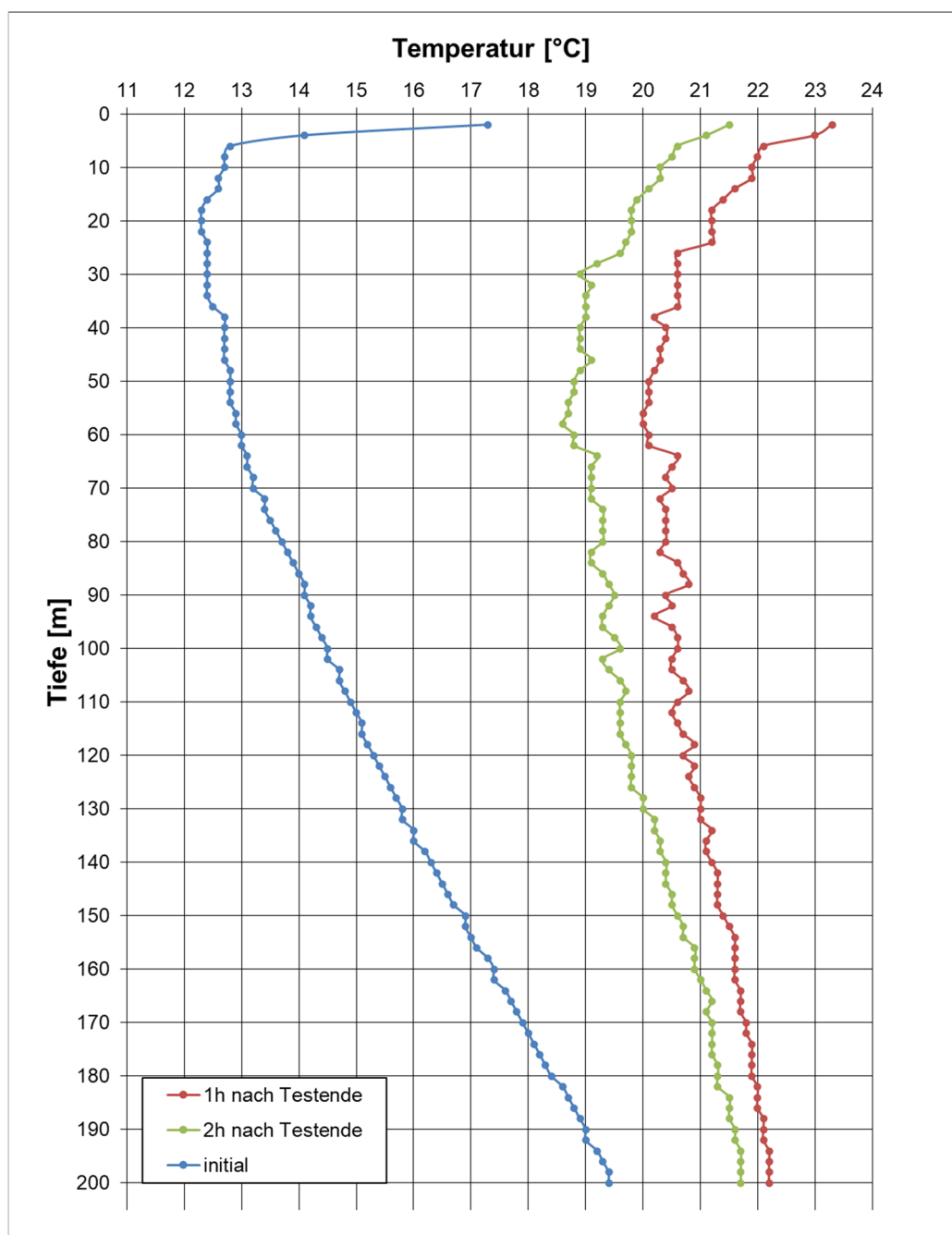


Abbildung 7: Temperaturprofile EWS 2

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

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10 m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils zum Zeitpunkt der Messung eine mittlere initiale Erdreichtemperatur von 15,09 °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.

3.4 Versuchsauswertung EWS 3

3.4.1 Basisdaten EWS 3

- Erdwärmesondenlänge: 200 m
- Erdwärmesondentyp: Doppel-U, DA 40
- Mittlerer Bohrlochdurchmesser: 143,8 mm
- Messzeitraum: 44,33 h

Basisdaten
EWS 3

3.4.2 Messdaten EWS 3

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

Messdaten
EWS 3

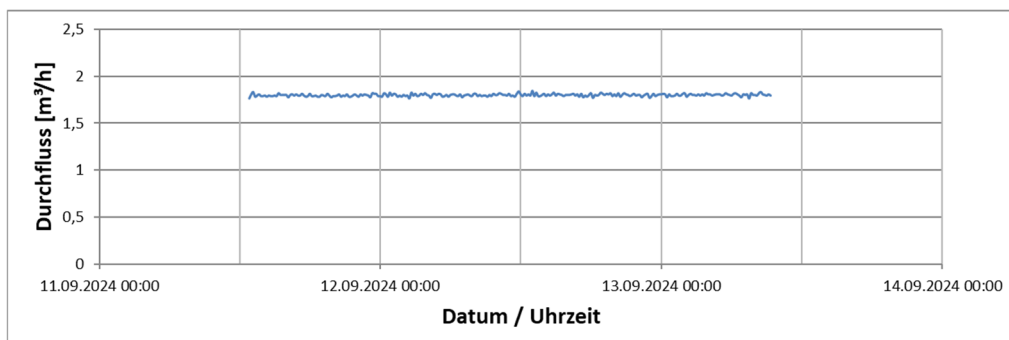
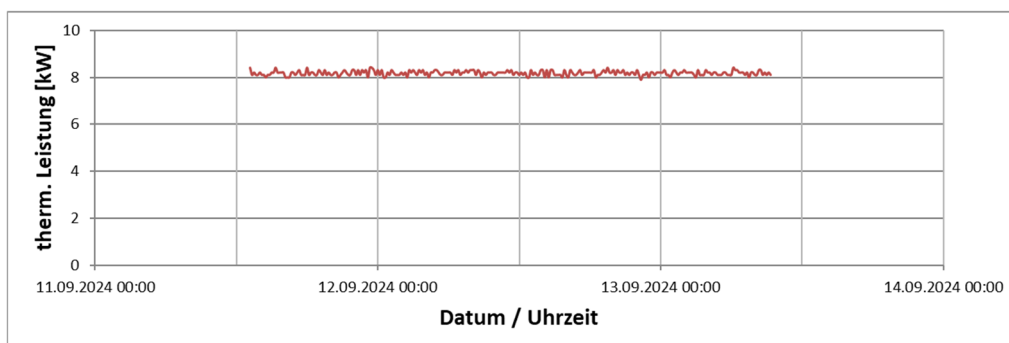
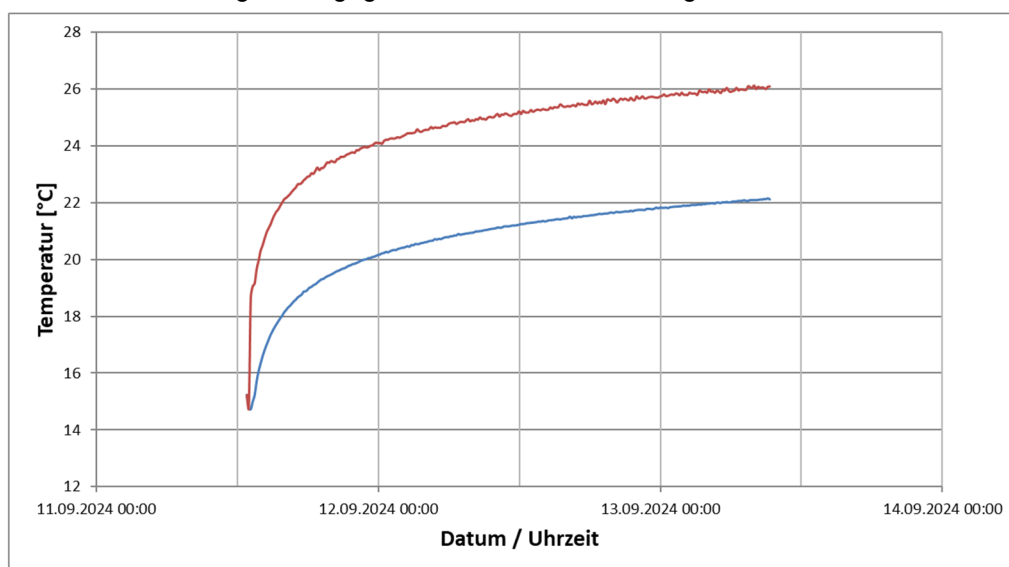


Abbildung 8: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung des Testgeräts und Durchfluss, EWS 3

- Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde 8.211 W
- Heizarbeit des Testgeräts über 44,33 h ca. 364 kWh

3.4.3 Ergebnis des Response-Tests EWS 3

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

Ergebnis
EWS 3

Der Geothermal Response Test ergibt für den Untergrund am Standort der EWS 3 eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von

$$\lambda_{\text{eff}} = 2,29 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,081 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

errechnet.

3.4.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Für den durchgeführten Test ist das Ergebnis der stufenweisen Auswertung in der Abbildung 9 (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 (7,23 h) dargestellt.

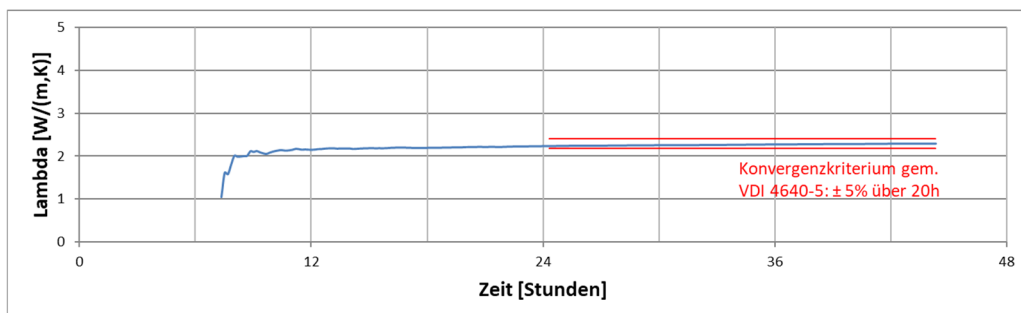


Abbildung 9: Stufenweise Auswertung

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich das Testergebnis bei einem Wert von ca. $2,29 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ stabilisiert. Die Testzeit ist ausreichend lang.

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

3.4.5 Temperaturprofile EWS 3

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

Temperaturprofile
EWS 3

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

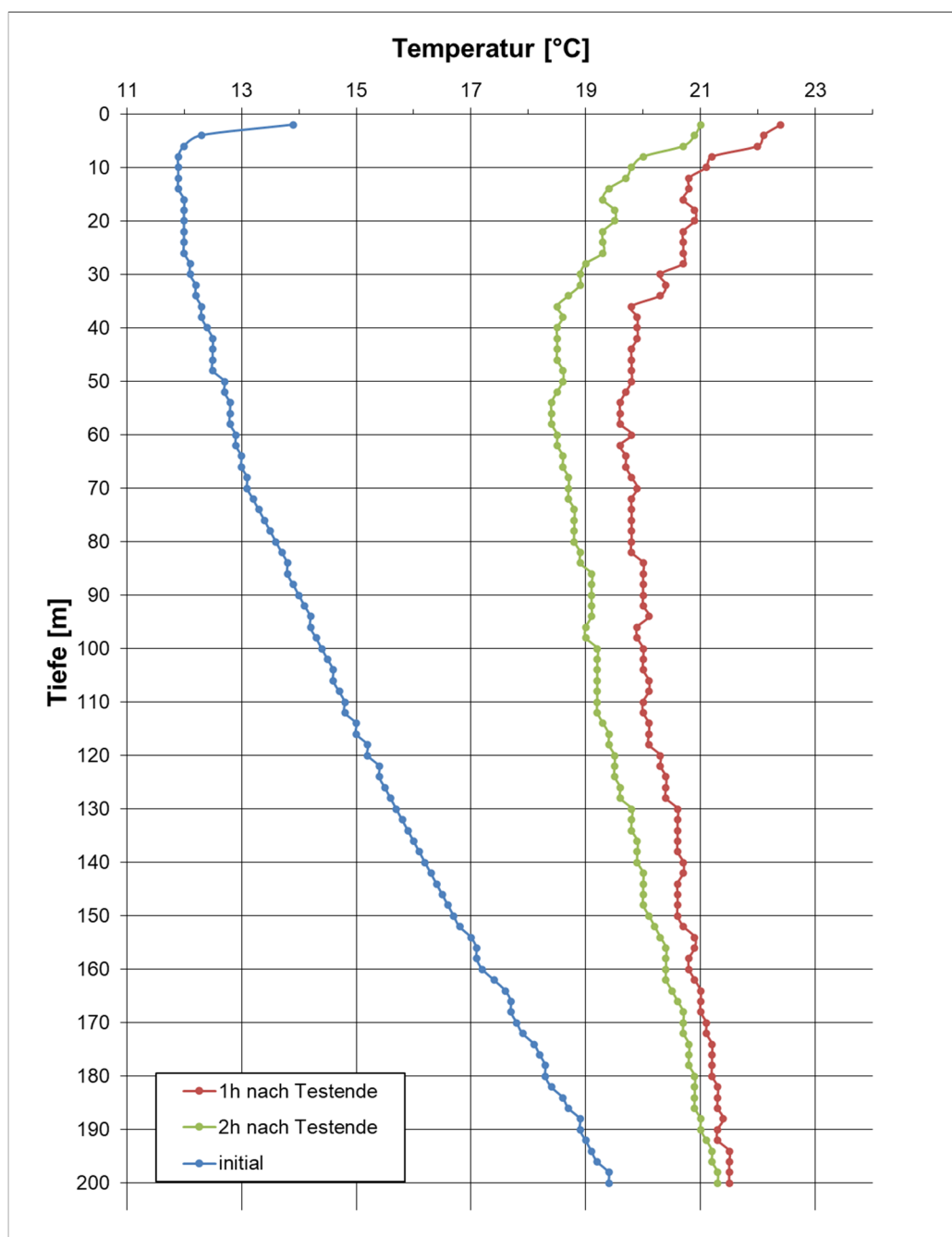


Abbildung 10: Temperaturprofile EWS 3

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

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10 m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils zum Zeitpunkt der Messung eine mittlere initiale Erdreichtemperatur von 14,95 °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.

3.5 Versuchsauswertung EWS 4

3.5.1 Basisdaten EWS 4

- Erdwärmesondenlänge: 200 m
- Erdwärmesondentyp: Doppel-U, DA 40
- Mittlerer Bohrlochdurchmesser: 143,8 mm
- Messzeitraum: 44,0 h

Basisdaten
EWS 4

3.5.2 Messdaten EWS 4

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

Messdaten
EWS 4

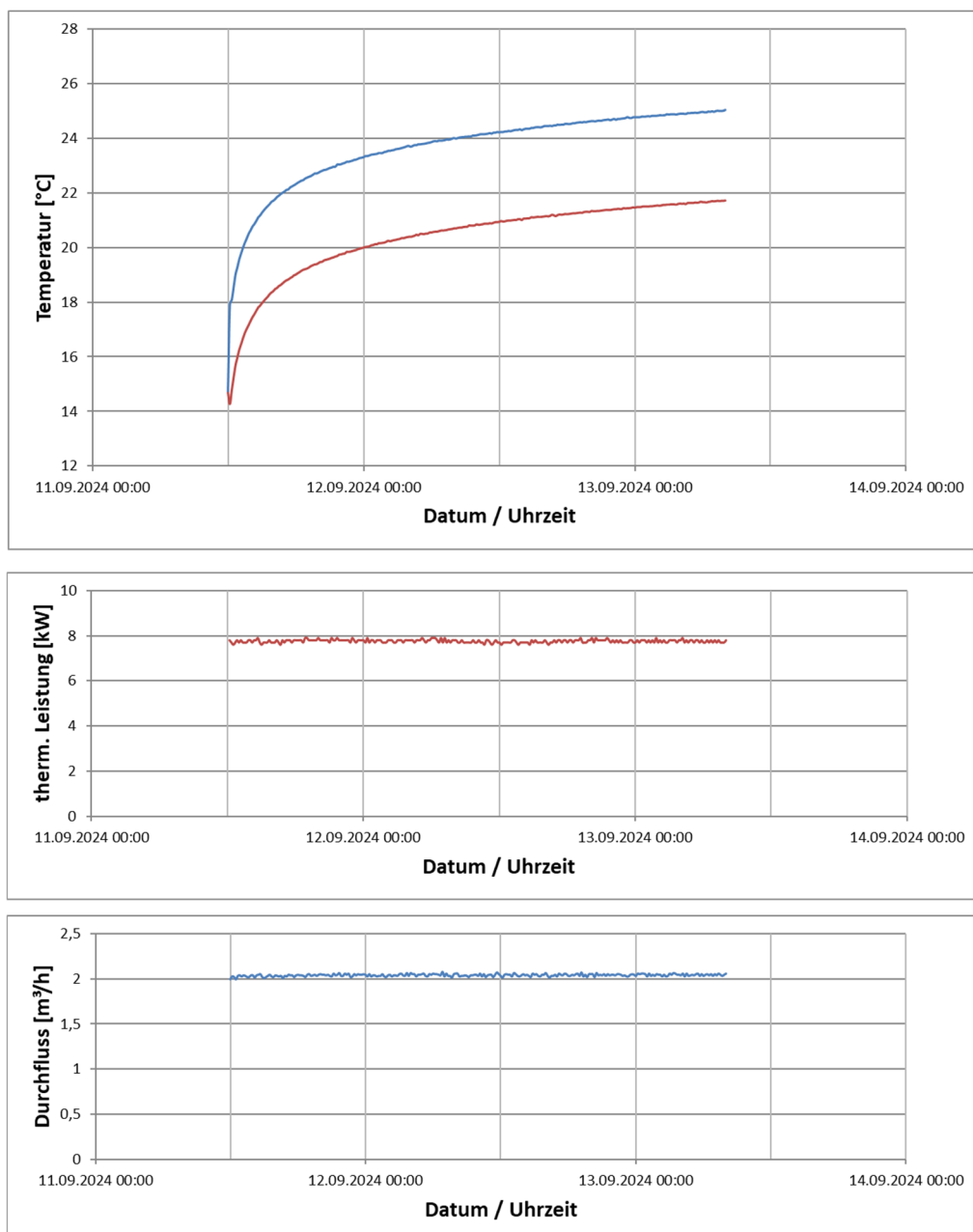


Abbildung 11: Aufgezeichnete Temperaturen, Heizleistung des Testgeräts und Durchfluss, EWS 4

- Mittlere Wärmeleistung in Erdwärmesonde 7.795 W
- Heizarbeit des Testgeräts über 44,0 h ca. 343 kWh

3.5.3 Ergebnis des Response-Tests EWS 4

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

Ergebnis
EWS 4

Der Geothermal Response Test ergibt für den Untergrund am Standort der EWS 4 eine mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit von

$$\lambda_{\text{eff}} = 2,33 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde ein Wert von

$$R_b = 0,078 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

errechnet.

3.5.4 Stufenweise (sequentielle) Auswertung

Für den durchgeführten Test ist das Ergebnis der stufenweisen Auswertung in der Abbildung 12 (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 (7,11 h) dargestellt.

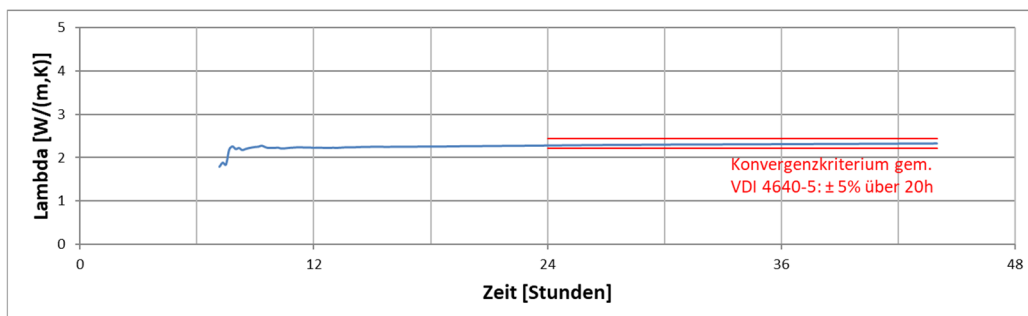


Abbildung 12: Stufenweise Auswertung

Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich das Testergebnis bei einem Wert von ca. $2,33 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ stabilisiert. Die Testzeit ist ausreichend lang.

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

3.5.5 Temperaturprofile EWS 4

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

Temperaturprofile
EWS 4

Um das Abkühlverhalten der Erdwärmesonde zu ermitteln, wurden 2,5h und 3,5h nach Testende in der Erdwärmesonde ein Tiefen-Temperaturprofil aufgenommen.

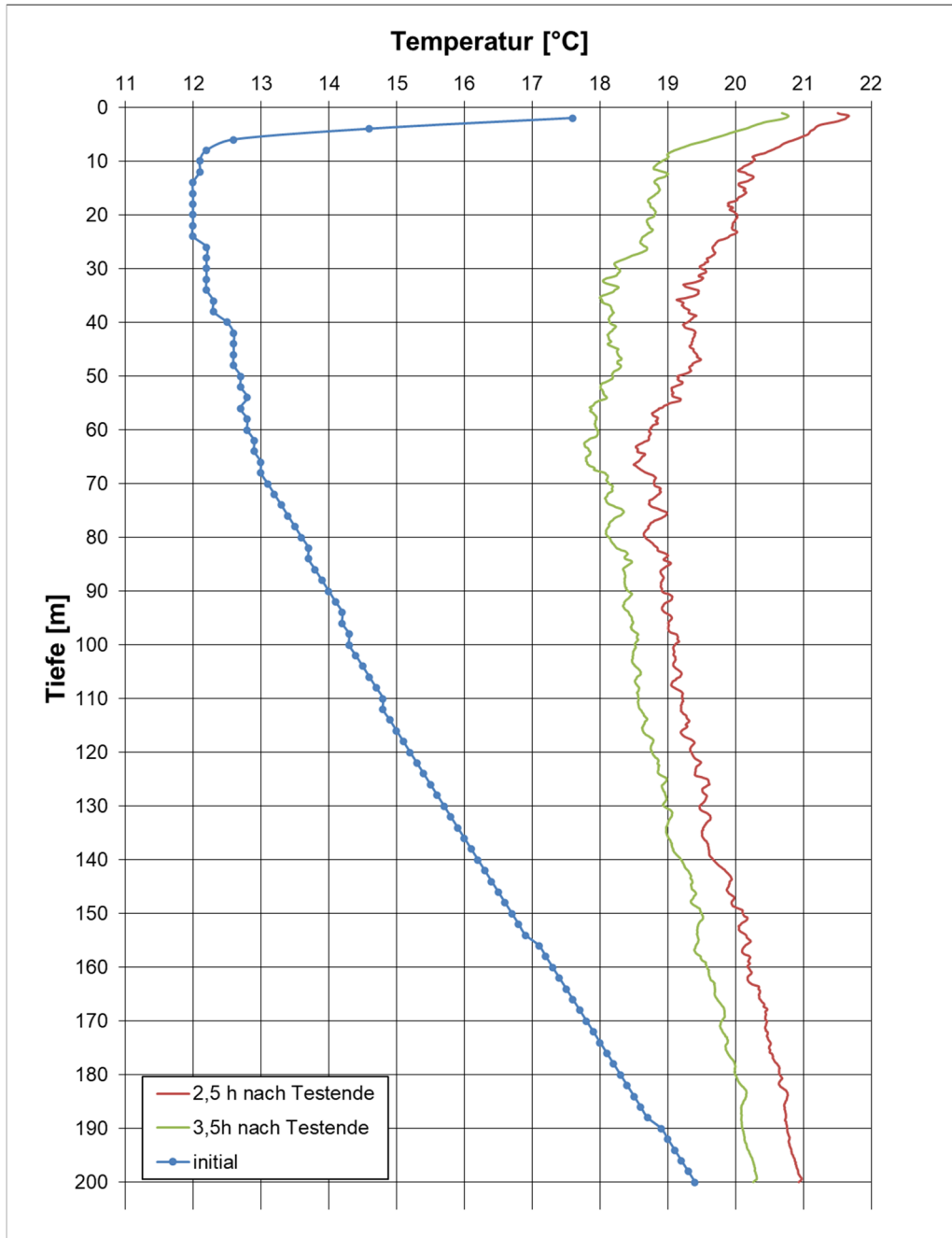


Abbildung 13: Temperaturprofile EWS 4

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

Die Temperaturprofile nach Ende des Tests wurden mittels kabelloser Messsonde (Geosniff) der Fa. Enoware in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (ca. 5 Messungen pro Meter) aufgenommen. Das Gerät zeichnet den Druck der überstehenden Wassersäule auf, der dann in eine entsprechende Tiefe umgerechnet wird.

Als Mittelwert für den Tiefenbereich ca. 10 m bis Endtiefe ergibt sich aus der Aufnahme des Temperaturprofils zum Zeitpunkt der Messung eine mittlere initiale Erdreichtemperatur von 14,94 °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

Auf dem Gelände des Klinikzentrum Süd / Südspidol in 4282 Esch-sur-Alzette, Luxemburg wurde an vier Testerdwärmesonden in dem Zeitraum 09.09. bis 13.09.2024 jeweils ein Geothermal-Response-Test zur Ermittlung der thermischen Untergrundparameter Wärmeleitfähigkeit, Temperatur und therm. Bohrlochwiderstand ausgeführt.

Zusammenfassung

Die Erdwärmesonden sind ca. 200 m lang.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengefasst:

	EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS 4
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	2,35	2,32	2,29	2,33
Thermischer Bohrlochwiderstand $r_b \left[\frac{m \cdot K}{W} \right]$	0,079	0,079	0,081	0,078
Initiale Erdreichtemperatur $T_0 [^{\circ}C]$ (10m - Endteufe)	14,93	15,09	14,95	14,94

Diese Stellungnahme gilt nur in Ihrer Gesamtheit.

UBeG GmbH & Co. KG

Wetzlar, 04.10.2024



Dipl.-Geol. Marc Sauer




B.Sc. Anna Hoffmann

5 Fotodokumentation



Foto 1: Durchführung des Geothermal Response Test an EWS 1



Foto 2: Erdwärmesonde EWS 1 nach Abbau des Geothermal Response Tests



Foto 3: Durchführung des Geothermal Response Test an EWS 2



Foto 4: Erdwärmesonde EWS 2 nach Abbau des Geothermal Response Tests



Foto 5: Durchführung des Geothermal Response Test an EWS 3

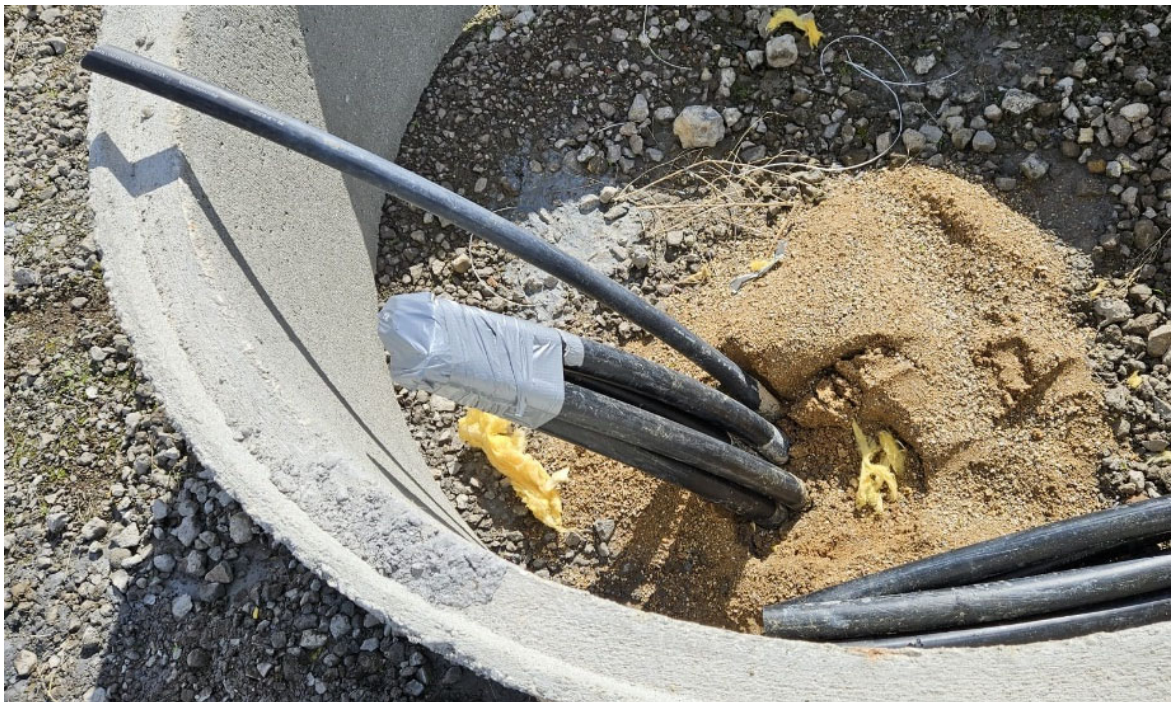


Foto 6: Erdwärmesonde EWS 3 nach Abbau des Geothermal Response Tests



Foto 7: Durchführung des Geothermal Response Test an EWS 4



Foto 8: Erdwärmesonde EWS 4 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 (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 Minstdauer eines Tests (eine Leistungsstufe) beträgt ca. 48 Stunden.

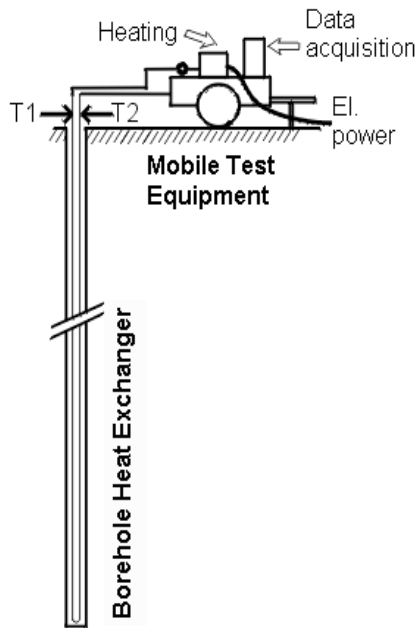
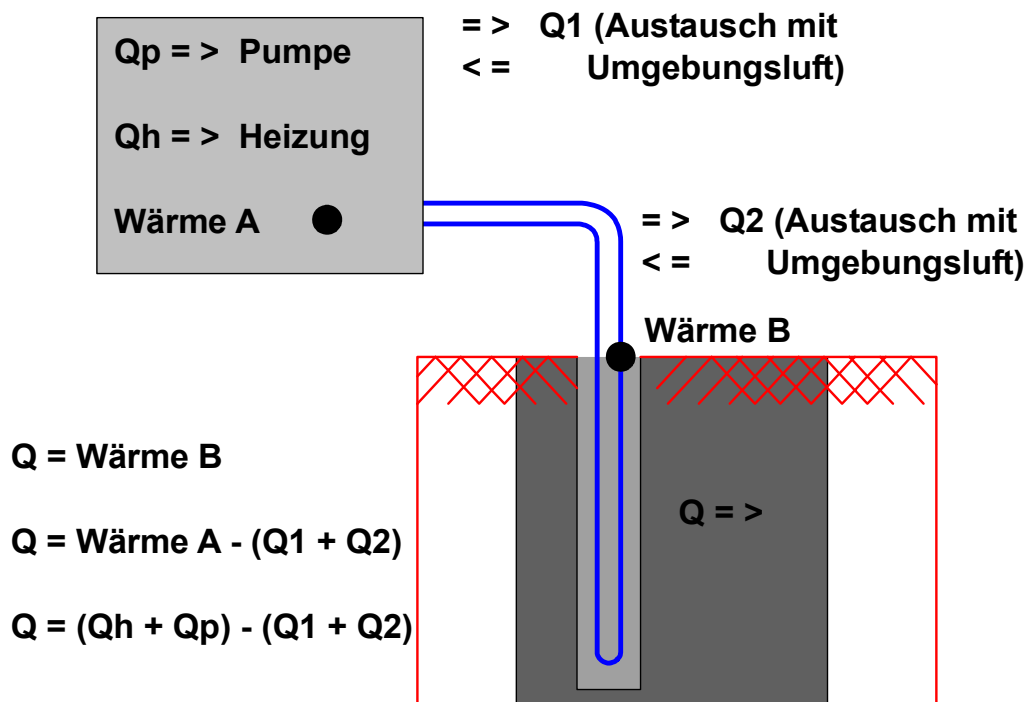


Abbildung A1: Schema eines Geothermal Response Test (GeRT, links) und Durchführung eines Geothermal Response Test mit modernem Gerät von UBeG (rechts)

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 Temperaturoaufzeichnung 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/(m³·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.

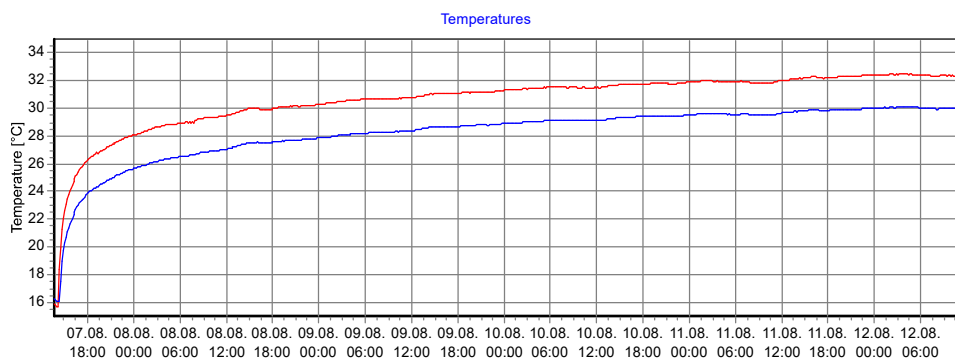


Abbildung A3: Typische Temperaturkurve eines Geothermal Response Test (GeRT)

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	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 initiale 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	Initiale 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 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 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 oder für Mehrfachpulstest mit längeren Unterbrechungen kann die Auswertung mittels Parameteridentifikation durch Verwendung des Superpositionsverfahrens erfolgen.

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).

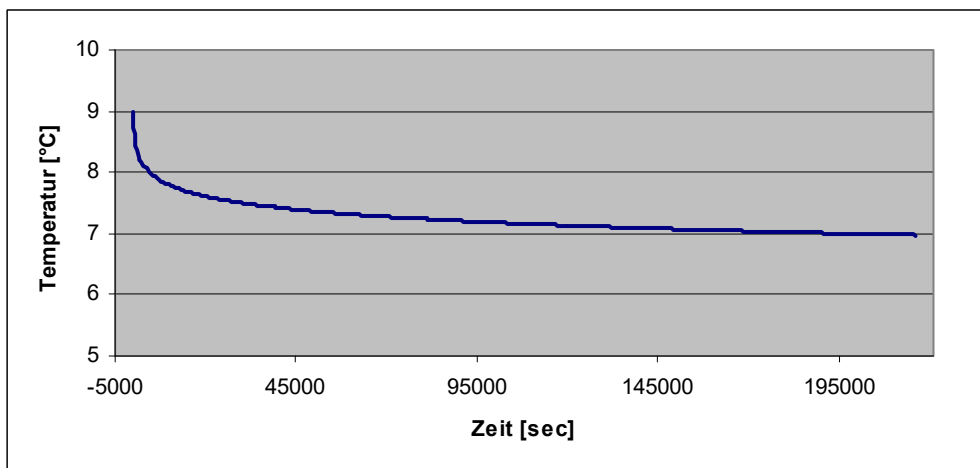


Abbildung A3: Impuls 1: 10 W/m für 60 Stunden (Stunde 1 bis Stunde 60)

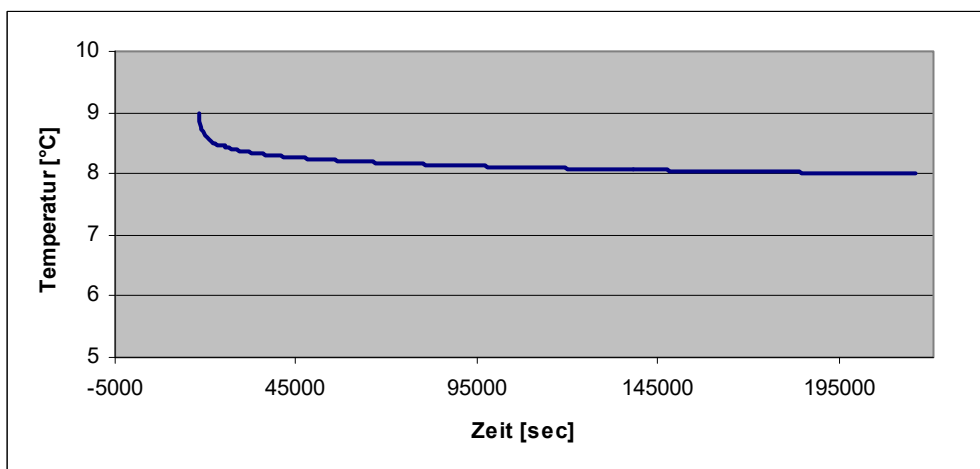


Abbildung A4: Impuls 2: 5 W/m für 54 Stunden (Stunde 6 bis Stunde 60)

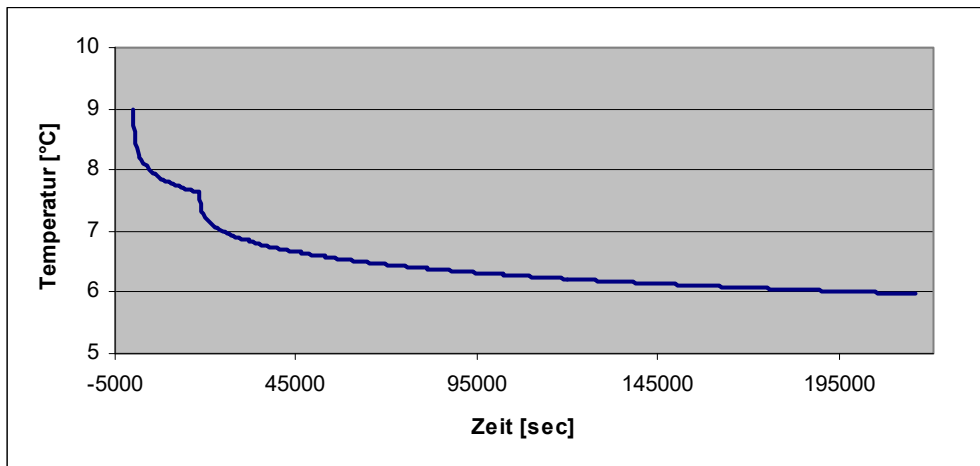


Abbildung A5: Summe Impuls 1 + Impuls 2

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:

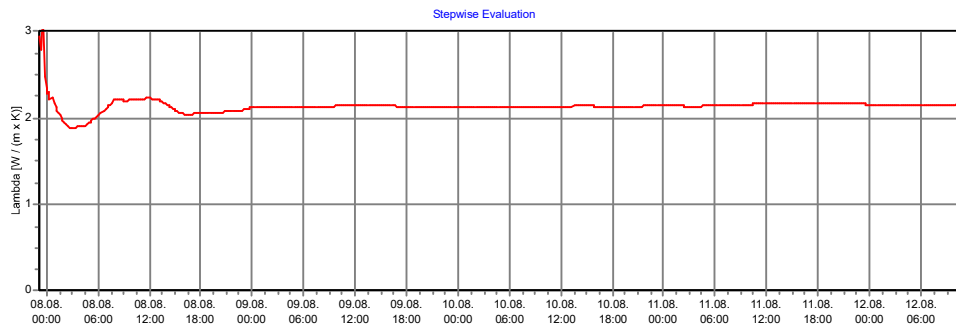


Abbildung A6: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, stabiles Ergebnis

b) Grundwassereinfluss:

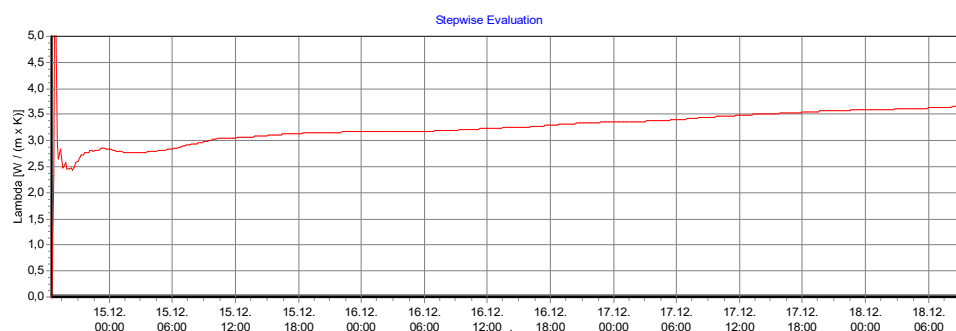


Abbildung A7: Stufenweise Auswertung eines GeRTs, Grundwassereinfluss

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

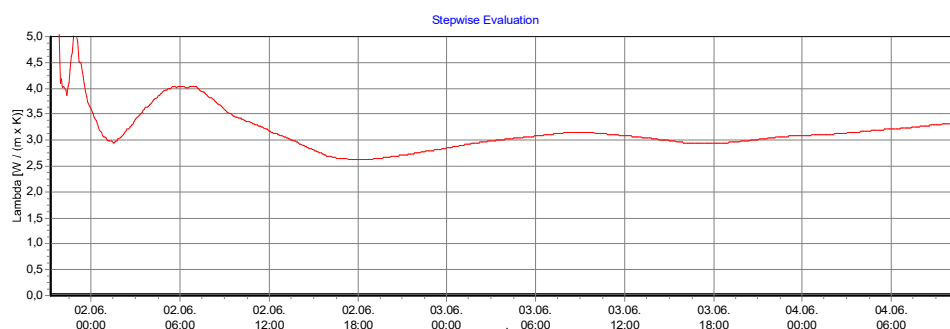


Abbildung A8 Stufenweise Auswertung eines GeRTs, Testzeit zu kurz