

BERICHT

Datum

10.04.2024

Bearbeiter

Mohammad Akol
Bartosz Nowacki

Telefon

+49 3731 79878 118

Seiten

8

Auftragsnummer

5047

E-Mail

akol@geoenergie-konzept.de
nowacki@geoenergie-konzept.de

Anlagen

5

Geothermische Testarbeiten

Mittelschule Wenzelbach
Roither Weg 15
93713 Wenzelbach

AUFTRAGGEBER

Anschrift

BauGrund Süd
Gesellschaft f. Geothermie mbH
Zeppelinstr. 10
88410 Bad Wurzach

Ansprechpartner

Herr Springenberg

E-Mail

m.springenberg@baugrundsued.de

Telefon

0151 402 35 800

Projektnummer AG

AZG2307109

Inhalt

1	Vorbemerkungen.....	3
2	Grundlagen der geothermischen Testarbeiten.....	4
2.1	Messung Temperaturtiefenprofil	4
2.2	Thermal Response Test (TRT).....	4
3	Randbedingungen	4
3.1	Bohrung.....	4
3.2	TRT.....	5
4	Messergebnisse	5
4.1	Ruhetemperaturprofil.....	5
4.2	TRT.....	5
4.3	Ergebnisdiskussion.....	6
5	Zusammenfassung.....	8

Anlagen

- 1 Funktionsprinzip Thermal Response Test
- 2 Messreihen
- 3 Kurzprotokoll Thermal Response Test
- 4 Fotodokumentation der Testarbeiten
- 5 Schichtenverzeichnis/Bohrprofil

1 Vorbemerkungen

Durch die Fa. BauGrund Süd Gesellschaft f. Geothermie mbH wurde die Fa. geoENERGIE Konzept GmbH am 20.02.2024 mit der Durchführung geothermischer Testarbeiten am Bauvorhaben Mittelschule Wenzenabach in Wenzenbach beauftragt. In der nachfolgenden Abbildung ist der ungefähre Standort der untersuchten Bohrung dargestellt.

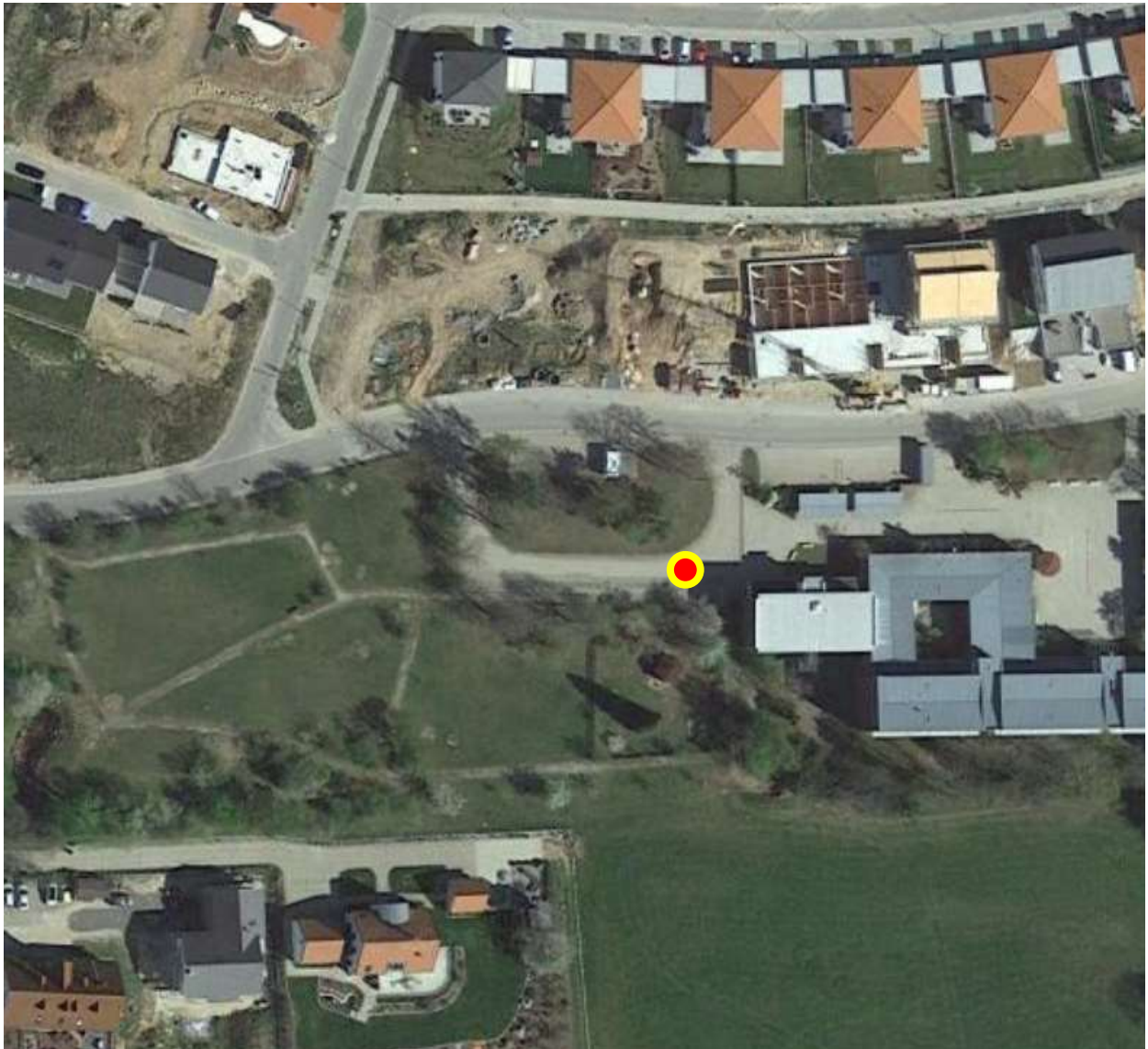


Abbildung 1: Lage der untersuchten Erdwärmesonde, Roither Weg. (Quelle: maps.google.com)

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Dokumentation des am Standort durchgeführten Thermal Response Tests (TRT) an einer ausgeführten Bohrung zur Bestimmung der thermischen Untergrundeigenschaften zur Erdwärmenutzung.

Datum

10.04.2024

Auftragsnummer

5047

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Mittelschule Wenzenbach, Wenzenbach

2 Grundlagen der geothermischen Testarbeiten

2.1 Messung Temperaturtiefenprofil

Zur Bestimmung der mittleren Untergrundtemperatur über die Sondenlänge wird vor Beginn des Tests eine tiefendiskrete Temperatur-Profilmessung mit dem LevelSCOUT 2X-Sensor der Fa. Seametrics durchgeführt.

Die ungestörte Untergrundtemperatur besitzt einen signifikanten Einfluss für die zu planende geothermische Anlage. Bei der Anlagendimensionierung stellt sie den Ausgangswert zur Bestimmung der relevanten zulässigen Fluidtemperaturen einer Anlage dar. Anhand des Temperaturprofils können des Weiteren Bereiche im Untergrund erkannt werden, welche durch den Zustrom von Grundwasser beeinflusst werden.

2.2 Thermal Response Test (TRT)

Der TRT ist ein Messverfahren gemäß DIN EN ISO 17628 zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Boden und Fels als Grundlage für die Dimensionierung und Auslegung von Erdwärmeanlagen. Zusätzlich werden die ungestörte Untergrundtemperatur und der thermische Bohrlochwiderstand bestimmt. Die Durchführung erfolgt an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde.

Bei einem TRT wird über einen Zeitraum von typischerweise 48 - 72 Stunden eine bestimmte Wärmeenergie über eine Erdwärmesonde in den Untergrund eingetragen und das Temperaturverhalten des Untergrundes gemessen. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die wesentlichen Kenngrößen der Erdwärmesonde und des Untergrundes ableiten. Details zur Funktionsweise eines TRT sind in Anlage 1 beschrieben.

3 Randbedingungen

3.1 Bohrung

Die untersuchte Bohrung wurde von der Fa. BauGrund Süd Gesellschaft f. Geothermie mbH errichtet. In der Tabelle 1 sind die wesentlichen Randbedingungen der Bohrung aufgeführt:

Tabelle 1: Randbedingungen der Bohrung/Erdwärmesonde

Parameter Bohrung		
Bohrtiefe	140	m
Tiefe Verrohrung	-	m
Bohrdurchmesser verrohrt	-	mm
Bohrdurchmesser unverrohrt	152	mm
Mittlerer Bohrdurchmesser	152	mm
Sondenlänge	140	m
Sondentyp	Doppel-U PE100-RC 32 x 3,0	mm
Verpressmaterial	-	
Wärmeleitfähigkeit gemäß Datenblatt	-	W/(m·K)

3.2 TRT

Die nachfolgende Tabelle zeigt die wesentlichen Randbedingung der Messung.

Tabelle 2: Parameter des Thermal Response Tests

Randbedingungen TRT		
Messzeitraum	19.03.2024 - 22.03.2024	
Messdauer	65,5	h
Außentemperatur	1,8 - 20,9	°C
Mittlere Heizleistung	8.032	W
Wärmeträgermedium	Wasser	
Volumenstrom	0,9	m³/h
Temperaturspreizung (VL/RL)	7,1	K
Strömungsregime	turbulent	

4 Messergebnisse

4.1 Ruhetemperaturprofil

Durch die Messung eines Ruhetemperaturprofils können Aussagen zu jahreszeitlichen Einflüssen und ggf. Grundwassereinfluss getroffen werden. In der Anlage 2 ist das vor dem Test gemessene Temperaturprofil dargestellt. Die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Messung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 3: Ergebnisse Temperaturtiefenprofil

Ergebnisse des Ruhetemperaturprofils			
Tiefe saisonale Zone (abgeschätzt)	T_{saisonal}	26	m
Mittlere Untergrundtemperatur ohne saisonale Zone	$T_{\text{T-Log}}$	12,2	°C
Geothermischer Gradient (ab 70 m)	g	1,7	K/100 m

4.2 TRT

Mit dem durchgeführten Test konnten die folgenden Untergrundeigenschaften bestimmt werden:

Tabelle 4: Zusammenfassung Testergebnisse

Ergebnisse der Testarbeiten			
effektive Wärmeleitfähigkeit	λ^*	$2,5 \pm 0,1$	W/(m·K)
thermischer Bohrlochwiderstand	R_b	0,10	(m·K)/W
Sondenlänge (berechnet aus TRT)	l_{TRT}	140	m

Für die bestimmte Wärmeleitfähigkeit lässt sich gemäß Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz ein Messfehler von 2,4 % angeben (für Details zur Fehlerbetrachtung wird auf die Anlage 1 verwiesen).

Zur Verifizierung der Messergebnisse wurde eine graduelle Auswertung der Messergebnisse vorgenommen. Hierbei wurde der Einfluss der Außentemperatur berücksichtigt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit über die Testdauer.

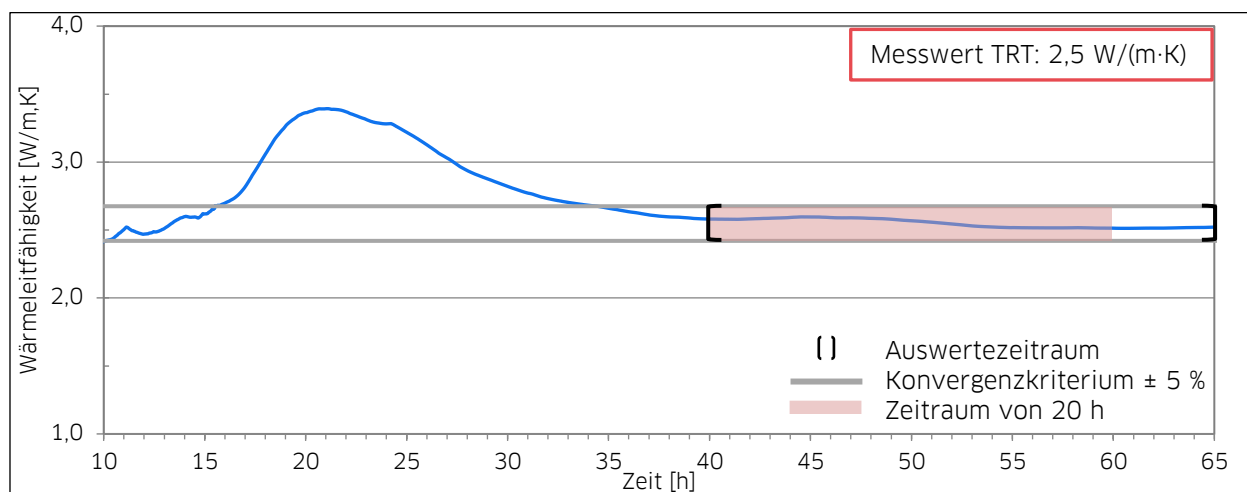


Abbildung 2: Graduelle Auswertung der Wärmeleitfähigkeit inkl. Darstellung Konvergenzkriterium

Nach der VDI 4640 Blatt 5 gilt als Konvergenzkriterium für die ausgewertete Wärmeleitfähigkeit eine Konstanz von $\Delta\lambda/\lambda = \pm 5 \%$ über einen Zeitraum von 20 h. Dabei darf eine Minstdauer des gesamten Tests von 48 h nicht unterschritten werden.

Die graduelle Auswertung des durchgeführten Thermal Response Tests ergab, dass sich nach 40 h ein stabiler Messwert einstellt. Das Konvergenzkriterium gilt deshalb ab der 60sten Stunde des Tests als erfüllt. Die Berechnung des Messergebnisses resultiert aus der Mittelwertbildung im Zeitraum von 40 h bis 65 h.

4.3 Ergebnisdiskussion

In der nachfolgenden Abbildung sind Literaturwerte für die Wärmeleitfähigkeit der angetroffenen Gesteine gemäß genanntes Schichtenverzeichnis (grau) am Standort dargestellt. Des Weiteren ist die tiefengemittelte Wärmeleitfähigkeit (türkis) sowie das Ergebnis des TRT (rot) vergleichend gegenüber dargestellt. Die aus dem TRT ermittelte Wärmeleitfähigkeit liegt im Bereich der anhand der Schichtenabfolge abgeschätzten Wärmeleitfähigkeit, jedoch unterhalb des berechneten Mittelwertes entsprechend der angetroffenen Schichtenfolge laut Bohrdokumentation.

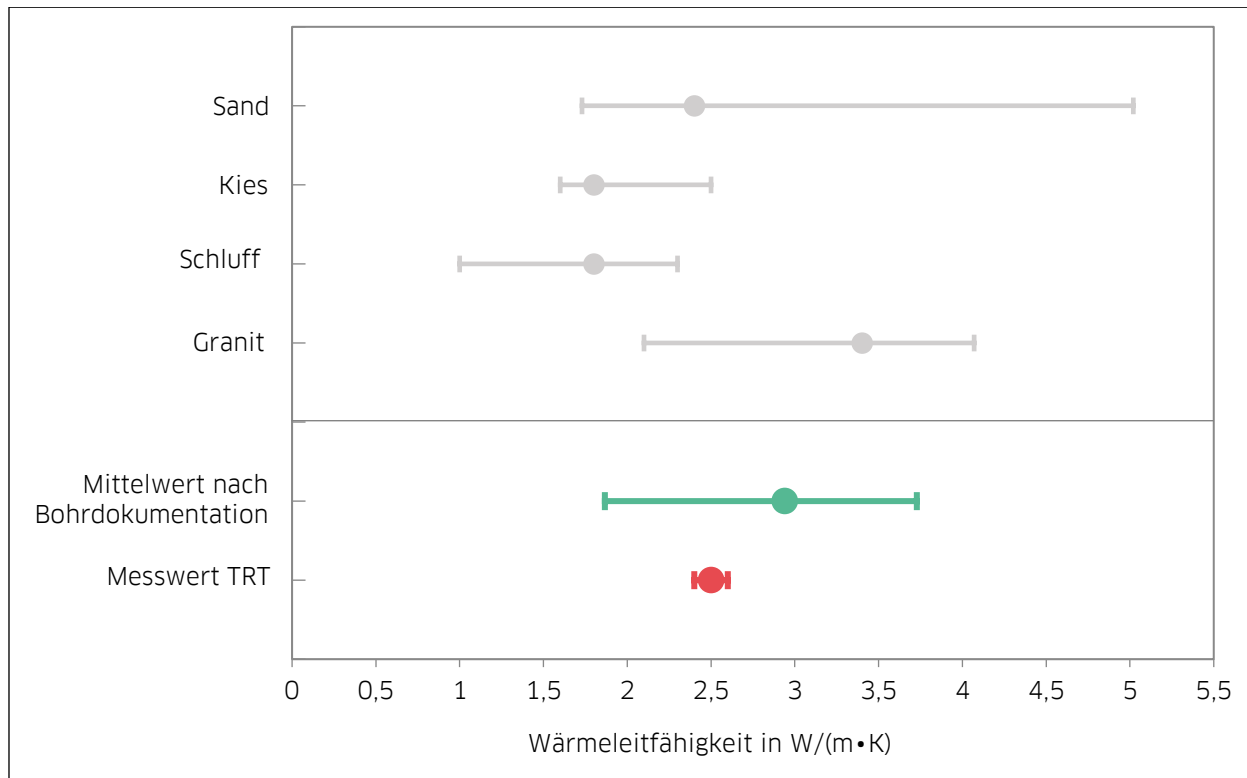


Abbildung 3: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten

Für die anschließenden Simulationsrechnungen zur Anlagendimensionierung werden folgende Werte vorgeschlagen:

- Effektive Wärmeleitfähigkeit: 2,5 W/(m·K)
- Thermischer Bohrlochwiderstand: 0,10 (m·K)/W
- Mittlere ungestörte Untergrundtemperatur: 12,2 °C

5 Zusammenfassung

Im Auftrag der Fa. BauGrund Süd Gesellschaft f. Geothermie mbH wurden an einer Pilot-Erdwärmbohrung auf dem Gelände des obengenannten Bauvorhabens in Wenzenbach geothermische Testarbeiten durchgeführt. Die Messdatenaufzeichnung des darin beinhalteten Thermal Response Tests fand im Zeitraum vom 19.03.2024 – 22.03.2024 statt.

Im Ergebnis der Testarbeiten konnte über die Sondenlänge von 140 m eine effektive Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ermittelt werden, welche unter dem Erwartungswert der tiefengemittelten Wärmeleitfähigkeit für das Bohrprofil liegt.

Für die Erdwärmesonde wurde unter Berücksichtigung der Testergebnisse ein thermischer Bohrlochwiderstand R_b von $0,10 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$ ermittelt.

Die vor Testbeginn erfasste mittlere ungestörte Untergrundtemperatur beträgt am Standort $12,2^\circ\text{C}$. Diese wurde über eine Tiefe von 136 m erfasst.

Eine Visualisierung der in Kapitel 4 beschriebenen Messdaten ist in Anlage 2 beigefügt.

Eine Kurzzusammenfassung der Testergebnisse geht aus Anlage 3 hervor. Anlage 4 beinhaltet eine Fotodokumentation der Testarbeiten am Standort.

Freiberg, 10.04.2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mohammad Akol', written over a horizontal line.

Mohammad Akol
M.Sc. Geowissenschaften
Projektassistent

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Steve Henker', written over a horizontal line.

Steve Henker
Dipl. Hydrol.
Teamleiter Bau

Anlage 1 Funktionsprinzip TRT

1. Allgemein

Der Thermal Response Test ist ein international bewährtes Verfahren zur Bestimmung thermischer Untergrundparameter. Dabei wird eine fertig ausgebaute (und im späteren Sondenfeld nutzbare) Erdwärmesonde mit einem definierten Wärmeeintrag über einen Zeitraum von 48 bis 72 Stunden thermisch belastet und der Untergrund zu einer Temperaturantwort ("response") angeregt. Diese Reaktion ist charakteristisch für die dort anstehenden Gesteine und lässt die Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Umfeld der Sonde zu.

Zusätzlich können die ungestörte Untergrundtemperatur und der thermische Bohrlochwiderstand mit dem Test bestimmt werden. Diese drei spezifischen Werte sind die wichtigsten Kenngrößen zur Dimensionierung von Erdwärmeanlagen.

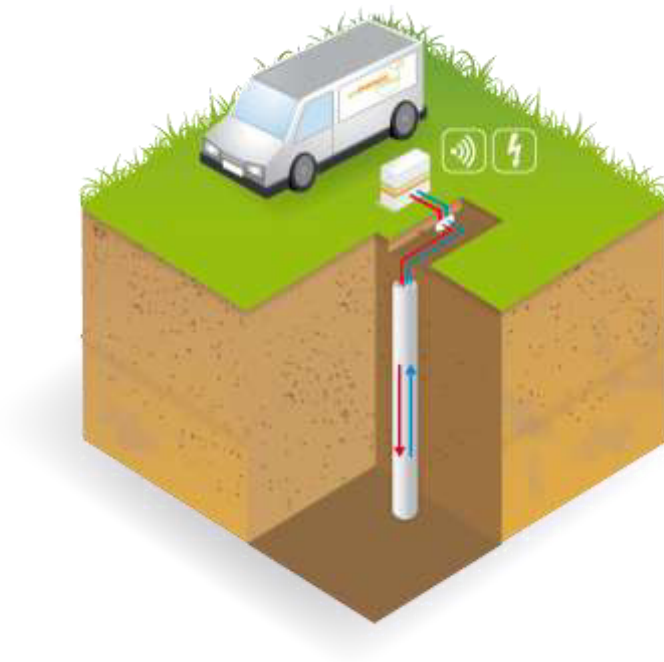


Abbildung 1: Prinzip eines Thermal Response Test.

Anlage 1 Funktionsprinzip TRT

2. Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen des Thermal Response Test wurden in den 1980er Jahren aus der Thermodynamik abgeleitet und für die Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten in Erdwärmepumpen angepasst. Seit Mitte der 1990er Jahre stehen mobile Messeinrichtungen für den Baustelleneinsatz zur Verfügung.

Ein TRT-Messgerät besteht im Wesentlichen aus einer Heizeinrichtung, einer Umwälzpumpe sowie einer Datenerfassung und Steuerung. Da der Querschnitt einer Erdwärmesonde gegenüber der Länge zu vernachlässigen ist, kann die Auswertung anhand der Kelvin'schen Linienquelle erfolgen.

Demnach zeigt der Untergrund bei Eintrag einer konstanten Wärmemenge zu Beginn ein typisches Aufheizverhalten und zu späten Zeiten einen konstanten Anstieg. Die Auswertung der zeitlichen Temperaturentwicklung ermöglicht die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Umfeld des Bohrloches.

3. Messgrößen

3.1 Ungestörte Untergrundtemperatur

Die ungestörte Untergrundtemperatur wird zur Dimensionierung des Sondenfeldes und zur Bestimmung des thermischen Bohrlochwiderstandes benötigt. Eine hohe Untergrundtemperatur ermöglicht eine größere Temperaturabsenkung und damit eine Effektivitätssteigerung im Betrieb der Anlage.

Vor Beginn des Thermal Response Tests erfolgt eine tiefendiskrete Temperatur-Profilmessung zur Ermittlung des Ruhetemperaturprofils mittels eines Datenloggers. Damit kann eine tiefenaufgelöste Information der Untergrundtemperatur dargestellt werden.

Zur Ermittlung des Wasserstands misst eine Drucksonde den hydrostatischen Druck der Wassersäule in der Erdwärmesonde. Bei der Auswertung der erfassten Daten ist zu berücksichtigen, dass die ermittelte Tiefe über den hydrostatischen Druck nicht zwingend der Sondenlänge entsprechen muss. Während des Bohrprozesses kann es zu Ablenkungen im Untergrund kommen, sodass die Bohrung nicht lotrecht zum Bohransatzpunkt niedergebracht werden kann.

3.2 effektive Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ist bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit der sich die Erwärmung ausbreitet. Die Wärmeleitfähigkeit ist das Vermögen eines Stoffes, Energie in Form von Wärme zu transportieren. Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ^* liefert einen integralen Wert der Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Bohrung.

Anlage 1 Funktionsprinzip TRT

Die Berechnung erfolgt nach der Theorie der Kelvin'schen Linienquelle. Die effektiv dem Untergrund zugeführte Heizleistung Q [W] lässt sich aus den Temperaturdifferenzen und dem Volumenstrom bestimmen. Unter Beachtung des theoretischen Mindestzeitkriteriums wird die Fluidtemperatur halblogarithmisch aufgetragen. Der Anstieg k dieser Geraden geht in die Berechnungsvorschrift für die effektive Wärmeleitfähigkeit λ^* ein. Des Weiteren tritt in der Formel ein Bezug zur Bohrlochteufe H [m] auf. Die Berechnungsvorschrift lautet:

$$\lambda^* = \frac{Q}{4\pi Hk}$$

Die Wärmeleitfähigkeit ist der entscheidende geothermische Parameter, nach dem Anlagen konzipiert werden. In den Auslegungsprogrammen (z.B. EED Earth Energy Designer) ist die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes die wesentliche Einflussgröße auf die Größe der Erdwärmeanlage.

3.3 Thermischer Bohrlochwiderstand

Der thermische Bohrlochwiderstand R_b beschreibt den Wärmeübergang zwischen dem Fluid in der Sonde und der Bohrlochwand. Man enthält demnach qualitative Aussagen über die thermischen Eigenschaften von Sonden- und Hinterfüllmaterial.

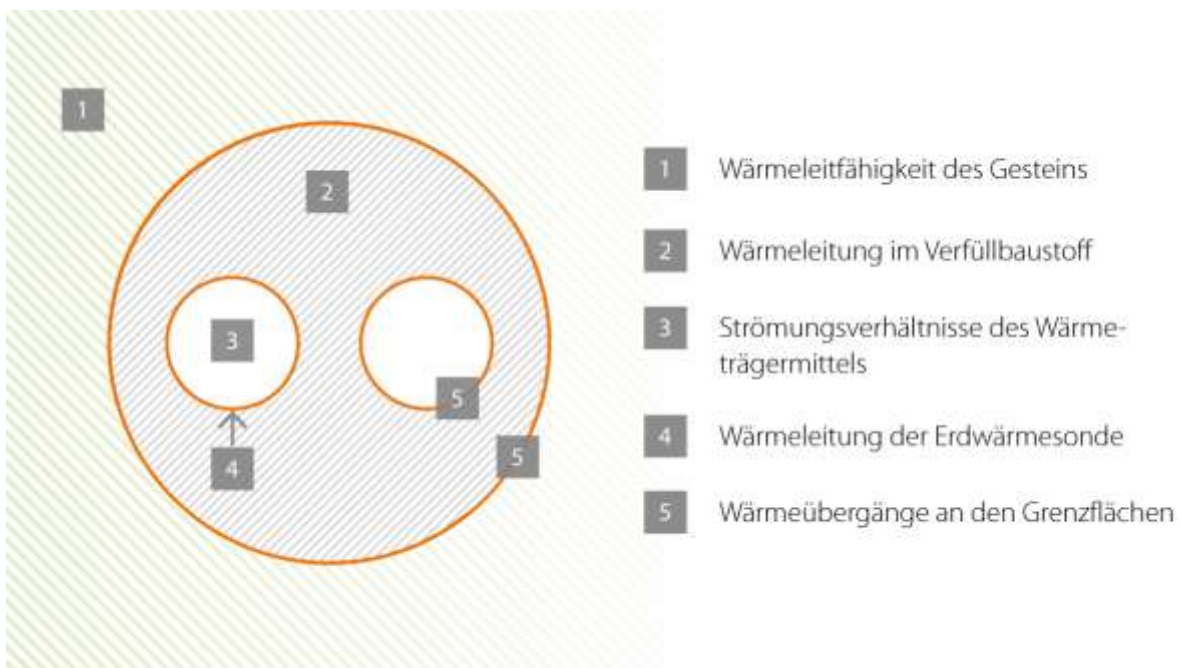


Abbildung 2: Einflussfaktoren auf den thermischen Bohrlochwiderstand.

Anlage 1 Funktionsprinzip TRT

Die Ermittlung ist ebenfalls aus der Kelvin'schen Linienquellentheorie abzuleiten. Die Berechnungsvorschrift lautet:

$$R_b = \frac{H}{Q}(T_f - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda^*} \left[\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - 0.5772 \right]$$

T_f	aktuelle Fluidmitteltemperatur
T_0	Fluidtemperatur zu Beginn der Messung
α	Thermische Diffusivität in [m ² /s], $\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$
r_0	Bohrlochradius [mm]

Der thermische Bohrlochwiderstand ermöglicht eine qualitative Aussage zur Güte der Anbindung der Erdwärmesonde an das Gebirge. Man erhält damit zum einen Eingangsparameter in Simulationsprogramme zum thermischen Verhalten von Erdwärmesonden und zum anderen einen Hinweis auf die Qualität der Verpressung.

3.4 Fehlerbetrachtung

Die Ermittlung der Messunsicherheiten ist ein wesentlicher Bestandteil der Versuchsauswertung. Erst die Fehlerbetrachtung ermöglicht Aussagen über die weitere Verwendbarkeit der Daten.

Neben dem theoretischen Fehler basierend auf einer mathematischen Näherungslösung (Linienquellentheorie) für die Erdwärmesonde haben die baustellenbedingten Stromschwankungen und die messtechnischen Ungenauigkeiten einen Einfluss auf die Messergebnisse.

Unter dem hier angegebenen Größtfehler versteht man die größtmögliche, d.h. unter ungünstigsten Umständen auftretende Abweichungen vom wahren Wert. Es gilt die Größtfehlerabschätzung nach Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta\lambda = \left| \frac{3 \cdot s_D}{\bar{D}} \right| + \left| \frac{3 \cdot s_{\Delta T}}{\bar{\Delta T}} \right| + \left| \frac{\Delta H}{H} \right| + \left| \frac{\Delta k}{k} \right|$$

Fehler in der Bestimmung von λ^* werden sowohl systematisch durch die Heizleistung Q und die Sondenlänge H als auch zufällig durch die Steigung der Regressionsgeraden k verursacht (siehe Formel). Fehler in Q sind neben den baustellenbedingten Stromschwankungen direkt durch die Messgenauigkeit der Temperatursensoren ($\pm 0,1$ K) und den Volumenstromsensor ($\pm 0,1$ l/min) bedingt. Der Größtfehler der eingebrachten Heizleistung kann durch die 3-fache Standardabweichung abgeschätzt werden.

Die Erdwärmesondenlänge H wird mit einem Fehler von 1 % der im Versuch ermittelten Sondenlänge angenommen. Unter Ansatz der aufgeführten Verfahrensweise ergeben sich bei den Testarbeiten typische Fehler zwischen 3 und 6 %.

Anlage 2 Messdaten

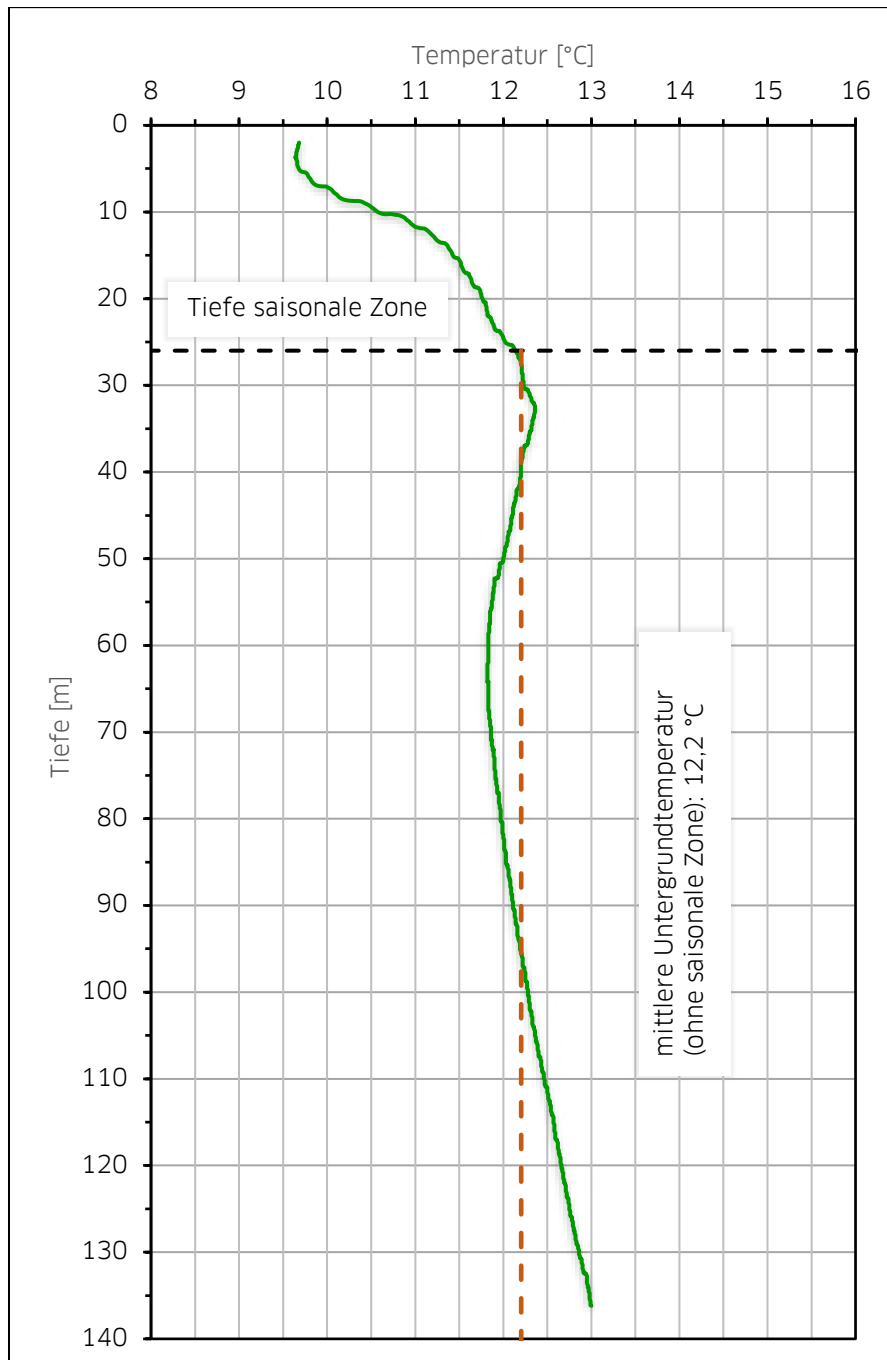


Abbildung 3: Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur.

Datum

10.04.2024

Auftragsnummer

5047

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Mittelschule Wenzelbach, Wenzelbach

Anlage 2 Messdaten

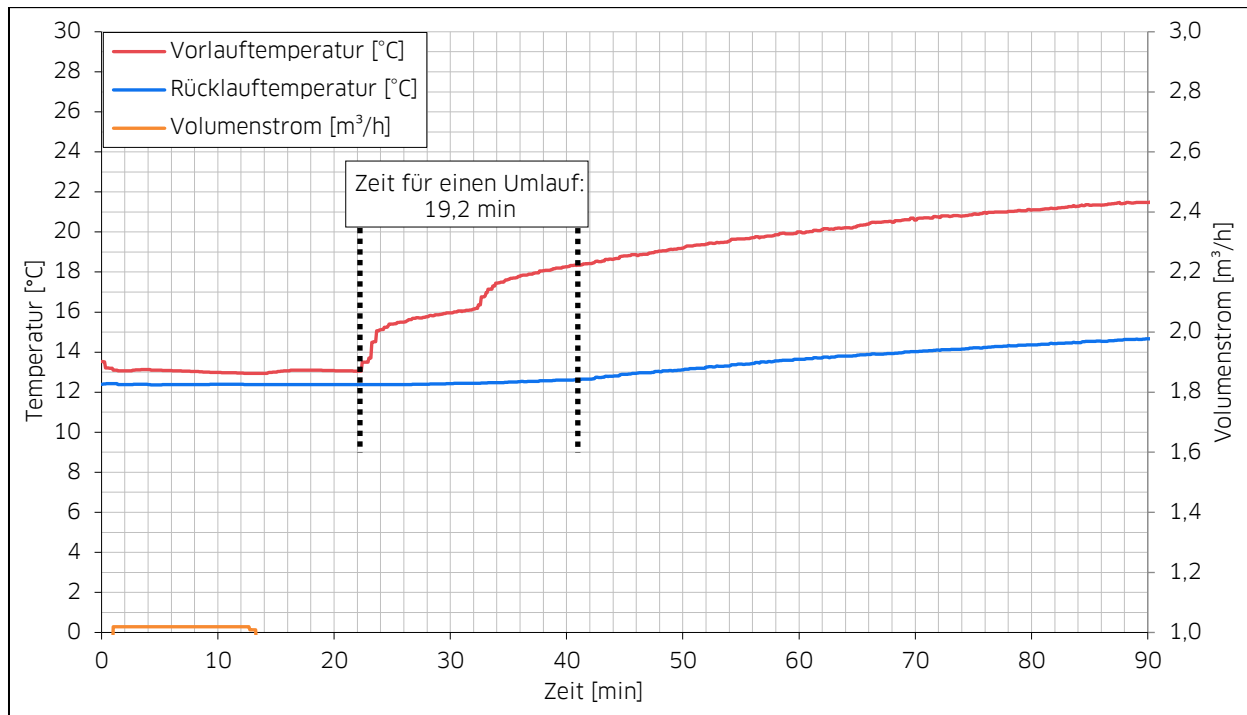


Abbildung 4: Erste Testphase zur Bestimmung der Sondenlänge.

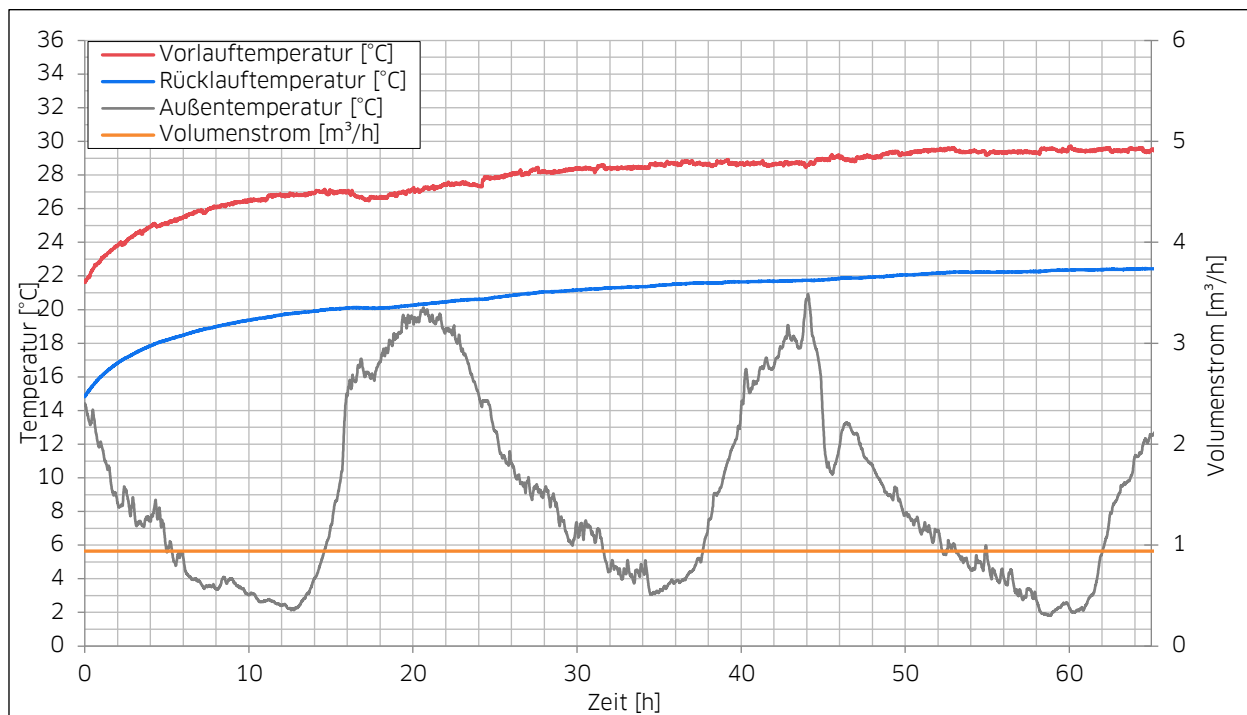
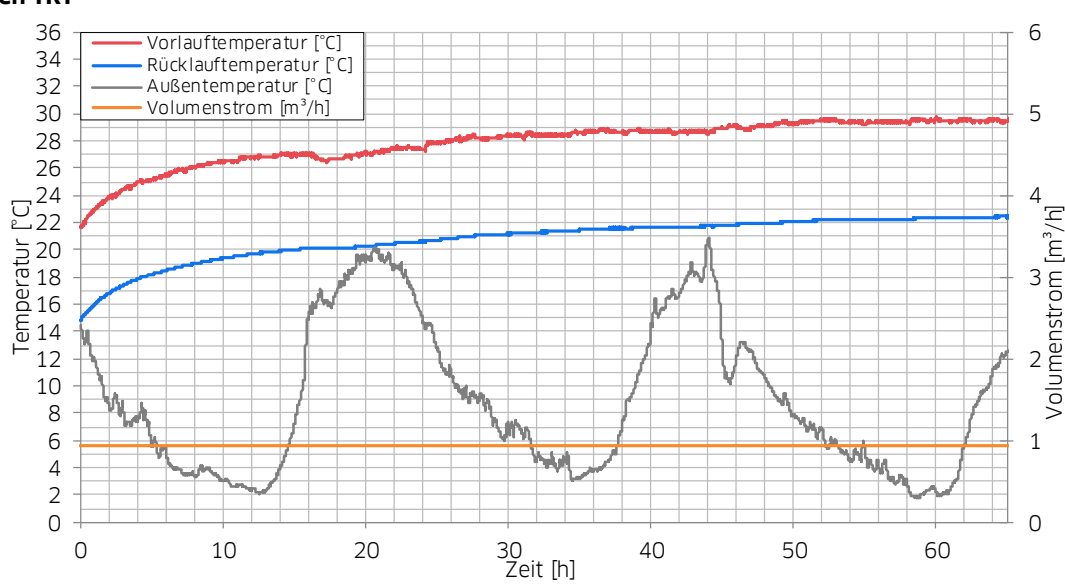


Abbildung 5: Zweite Testphase zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.

Anlage 3 Kurzprotokoll

Kurzprotokoll: Thermal Response Test		
Projektnr. AN	5047	geoENERGIE Konzept GmbH Alfred-Lange-Straße 15, 09599 Freiberg Tel.: +49 3731 79878 110 info@geoenergie-konzept.de
Projektnr. /Bestellnr. AG	AZG2307109	
Bauvorhaben	Mittelschule Wenzelbach Roither Weg 15 93713 Wenzelbach	
Auftraggeber	BauGrund Süd Gesellschaft für Geothermie mbH Zeppelinstraße 10 88410 Bad Wurzach	Kontaktperson AG Herr Springenberg
Bohrunternehmen	BauGrund Süd Gesellschaft für Geothermie mbH Zeppelinstraße 10 88410 Bad Wurzach	
Randbedingungen		
Messzeitraum	19.03.2024 - 22.03.2024	
Bohrtiefe	140 m	
Sondenlänge	140 m	
mittlerer Bohrdurchmesser	152 mm	
Sondentyp	Doppel-U PE100-RC 32 x 3,0 mm	
Verpressmaterial	-	
Messreihen TRT		
		
Bemerkungen	TRT an Probebohrung	
Testergebnisse		
mittlere Untergrundtemperatur	12,2 °C	
effektive Wärmeleitfähigkeit	2,5 ± 0,1 W/(m·K)	
thermischer Bohrlochwiderstand	0,10 (m·K)/W	

Anlage 4 Fotodokumentation



Abbildung 6: Erdwärmesonde vor Aufbau des Messgeräts.



Abbildung 7: Aufgebautes Messgerät am Standort.

Datum

10.04.2024

Auftragsnummer

5047

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Mittelschule Wenzelbach, Wenzelbach

Anlage 4 Fotodokumentation



Abbildung 8: Erdwärmesonde nach Testende.

Datum

10.04.2024

Auftragsnummer

5047

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Mittelschule Wenzelbach, Wenzelbach

Anlage 5 Schichtenverzeichnis

Das nachfolgende Bohrprofil wurde durch die Bohrfirma BauGrund Süd Gesellschaft f. Geothermie mbH übergeben und steht für diese Dokumentation zur Verfügung. Es erfolgte eine grundlegende Prüfung der Daten. Allerdings ist eine vollständige Plausibilitätsprüfung durch die Fa. geoENERGIE Konzept GmbH auf der uns verfügbaren Datengrundlage nicht möglich.

Datum

10.04.2024

Auftragsnummer

5047

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Mittelschule Wenzenbach, Wenzenbach

tewag GmbH	Projekt : Schulen, Wenzelbach
BlumenstraÙe 24	Projektnr.: 31101
93055 Regensburg	MaÙstab 1: 750
info@tewag.de	

Wenzelbach 12.03.2024

