

BERICHT

Datum

12.07.2023

Bearbeiter

Mohammad Akol
Danilo Berrios

Telefon

+49 3731 79 878 18

Seiten

8

Auftragsnummer

4645

E-Mail

akol@geoenergie-konzept.de
berrios@geoenergie-konzept.de

Fax

+49 3731 79 878 29

Anlagen

5

Geothermische Testarbeiten

Neubau Förderschule Radebeul
Gemarkung Trachau
Flurstück 732/15

AUFTRAGGEBER

Anschrift

Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen
Wilhelm-Liebkecht-Str. 1a
09337 Hohenstein-Ernstthal

Ansprechpartner

Frau Weber

E-Mail

weber@erdwaerme-bohrtechnik.com

Telefon

+49 (0) 3723 - 769140

Projektnummer AG

geoenergie-konzept.de
geoENERGIE Konzept GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
09599 Freiberg

Geschäftsführer
Dipl.-Geol. Rüdiger Grimm

Konto Sparkasse Mittelsachsen
IBAN DE57 8705 2000 3115 0268 10
BIC WELADED1FGX

Konto Commerzbank Freiberg
IBAN DE77 8704 0000 0303 4535 00
BIC COBADEFFXXX

Handelsregister
Amtsgericht Chemnitz · HRB 23305

Identnummern
Steuernummer 220/109/02952
Finanzamt Freiberg
USt-IdNr. DE 252240063

Erdwärme.
Aus einer Hand.

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. Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen wurde die Fa. geoENERGIE Konzept GmbH am 13.02.2023 mit der Durchführung geothermischer Testarbeiten am Bauvorhaben Neubau Förderschule in Radebeul beauftragt. In der nachfolgenden Abbildung ist der ungefähre Standort der untersuchten Bohrung dargestellt.

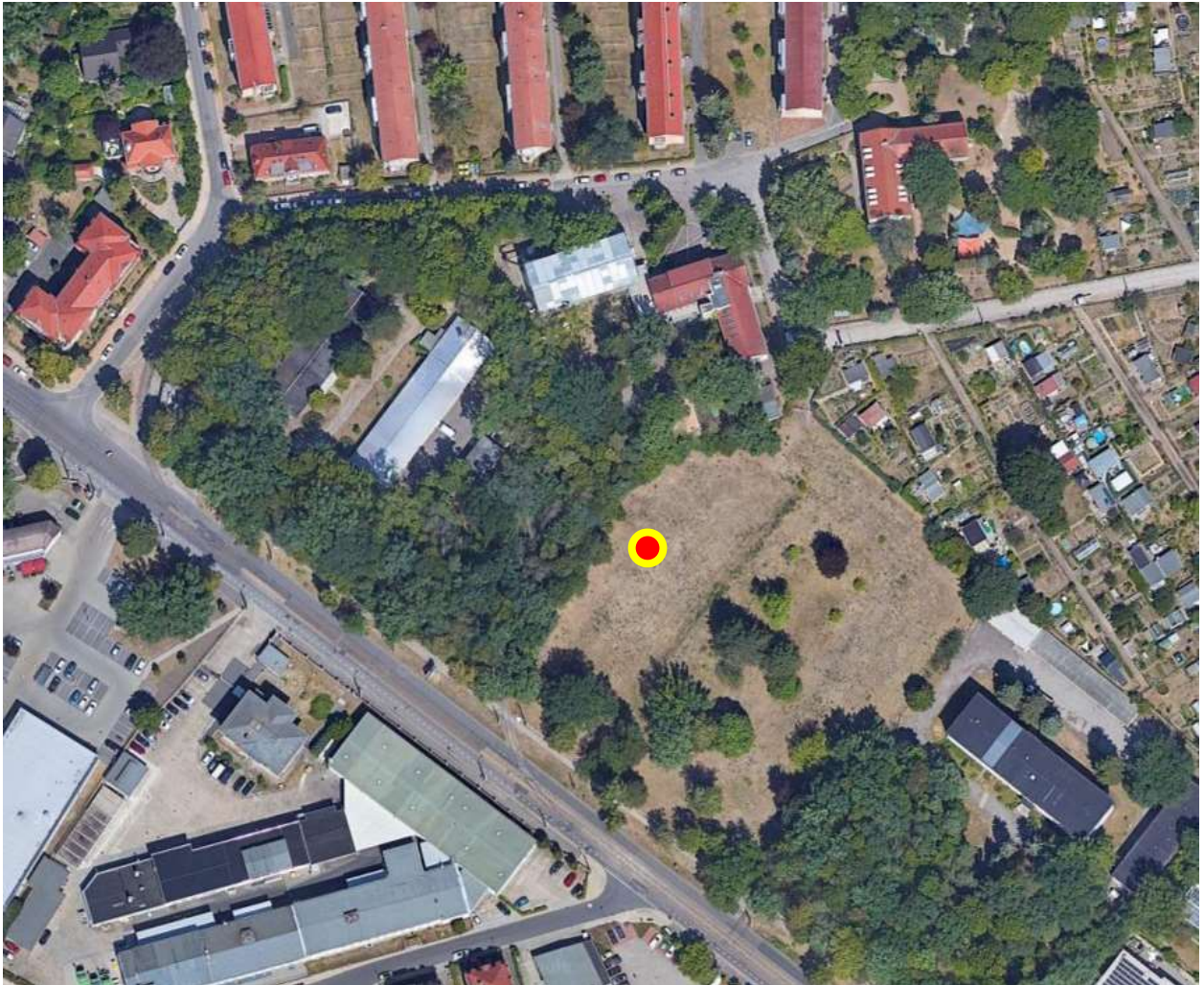


Abbildung 1: Lage der untersuchten Erdwärmesonde (Quelle: maps.google.com).

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

12.07.2023

Auftragsnummer

4645

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Neubau Förderschule, Trachau

2 Grundlagen der geothermischen Testarbeiten

2.1 Messung Temperaturtiefenprofil

Zur Bestimmung der mittleren ungestörten Untergrundtemperatur wird vor Beginn des Tests eine tiefendiskrete Temperatur-Profilmessung mit dem Diver-Grundwasserdaten-Logger der Fa. UTK – Klima Consult GmbH zeitlich 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. Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen errichtet. In der Tabelle 1 sind die wesentlichen Randbedingungen der Bohrung aufgeführt:

Tabelle 1: Randbedingungen der Bohrung/Erdwärmesonde

Parameter Bohrung		
Bohrtiefe	100	m
Tiefe Verrohrung	33	m
Bohrdurchmesser verrohrt	178	mm
Bohrdurchmesser unverrohrt	152	mm
Mittlerer Bohrdurchmesser	161	mm
Sondenlänge	100	m
Sondentyp	Doppel-U PE100-RC 32 x 2,9	mm
Verpressmaterial	Calidutherm	
Wärmeleitfähigkeit gemäß Datenblatt	≈ 2,0	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	07.07.2023 - 10.07.2023	
Messdauer	67,9	h
Außentemperatur	13,6 – 43,0	°C
Mittlere Heizleistung	6.997	W
Wärmeträgermedium	Wasser	
Volumenstrom	20,9	l/min
Temperaturspreizung (VL/RL)	4,8	K
Strömungsregime	turbulent	

4 Messergebnisse

4.1 Ruhetemperaturprofil

Durch die Messung eines Ruhetemperaturprofiles 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}	17	m
Mittlere Untergrundtemperatur ohne saisonale Zone	$T_{\text{T-Log}}$	11,9	°C
Geothermischer Gradient (ab 30 m)	g	3,7	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^*	$2,1 \pm 0,1$	W/(m·K)
thermischer Bohrlochwiderstand	R_b	0,10	(m·K)/W
Sondenlänge (berechnet aus TRT)	l_{TRT}	100	m

Für die bestimmte Wärmeleitfähigkeit lässt sich gemäß Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz ein Messfehler von 3,1 % 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.

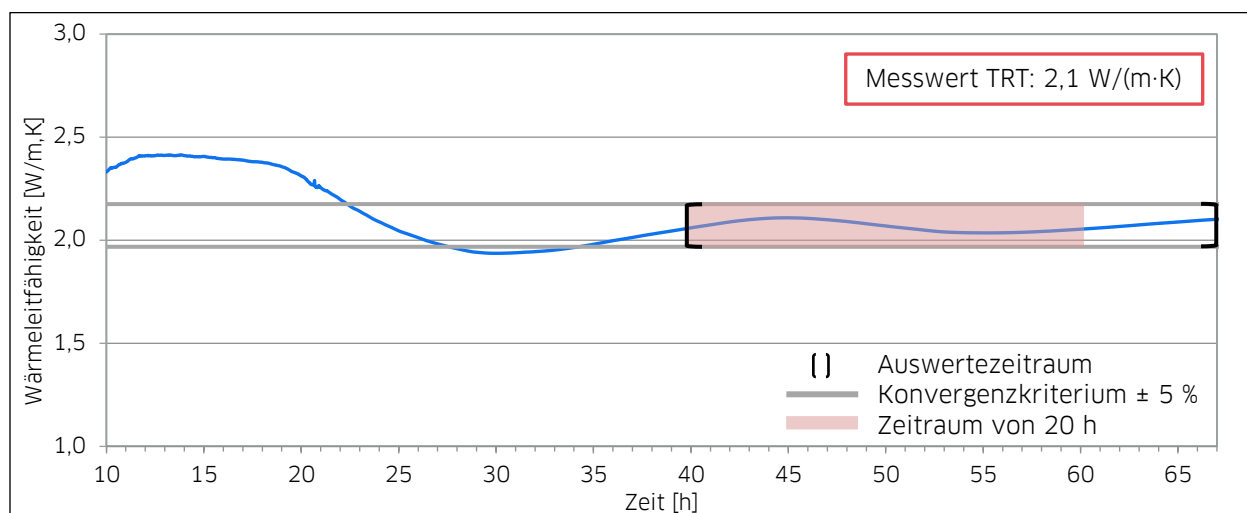


Abbildung 2: Graduelle Auswertung der Wärmeleitfähigkeit inkl. Darstellung Konvergenzkriterium

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 Mindestdauer 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 67 h.

4.3 Ergebnisdiskussion

In der nachfolgenden Abbildung sind Literaturwerte für die Wärmeleitfähigkeit der angetroffenen Gesteine gemäß des übergebenen Schichtenverzeichnisses (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.

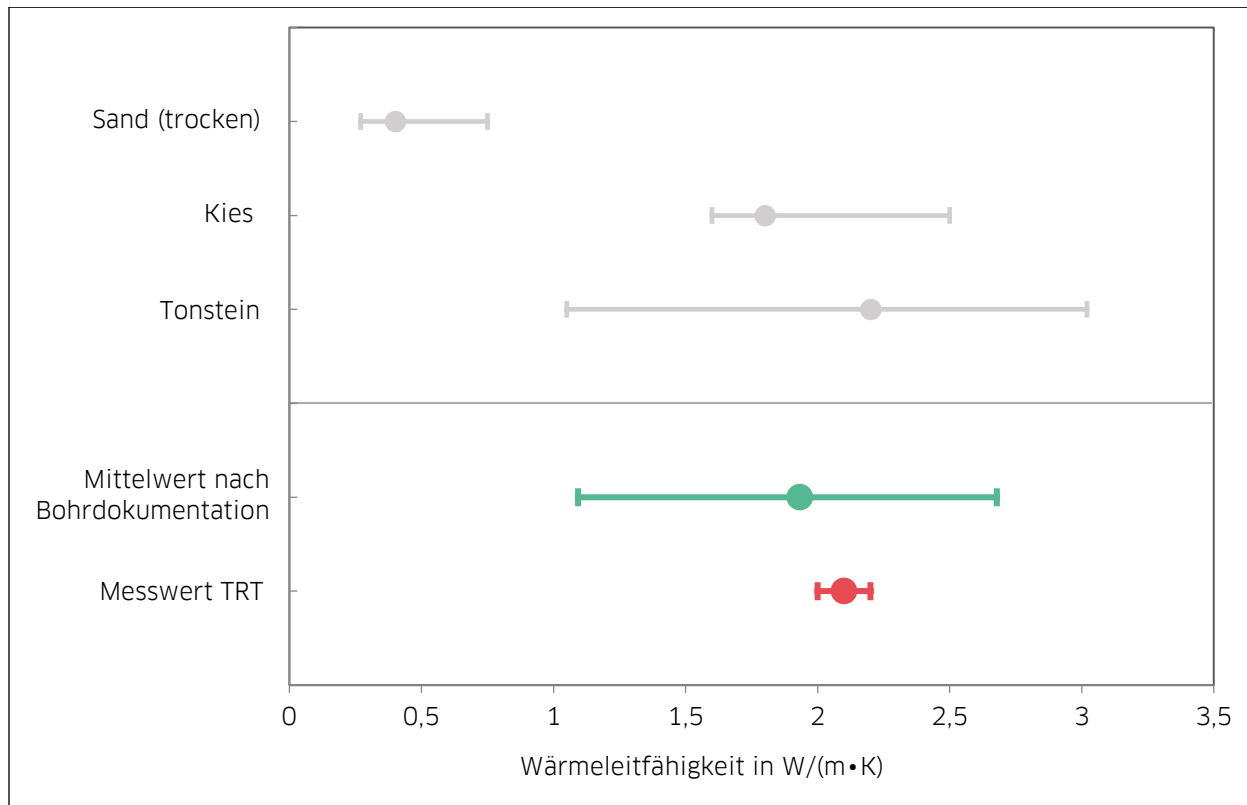


Abbildung 3: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten

Für die anschließenden Simulationsrechnungen zur Anlagendimensionierung werden folgende Werte vorgeschlagen:

- Effektive Wärmeleitfähigkeit: 2,1 W/(m·K)
- Thermischer Bohrlochwiderstand: 0,10 (m·K)/W
- Mittlere ungestörte Untergrundtemperatur: 11,9 °C

5 Zusammenfassung

Im Auftrag der Fa. Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen wurden an einer Pilot-Erdwärmbohrung auf dem Gelände des obengenannten Bauvorhabens in Radebeul geothermische Testarbeiten durchgeführt. Die Messdatenaufzeichnung des darin beinhalteten Thermal Response Tests fand im Zeitraum vom 07.07.2023 – 10.07.2023 statt.

Im Ergebnis der Testarbeiten konnte über die Sondenlänge von 100 m eine effektive Wärmeleitfähigkeit von $2,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ermittelt werden, welche dem Erwartungswert der tiefengemittelten Wärmeleitfähigkeit für das Bohrprofil entspricht.

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 $11,9^\circ\text{C}$. Diese wurde über eine Tiefe von 99 m erfasst.

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

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

Freiberg, 12.07.2023

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.
Leiter Abteilung 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.

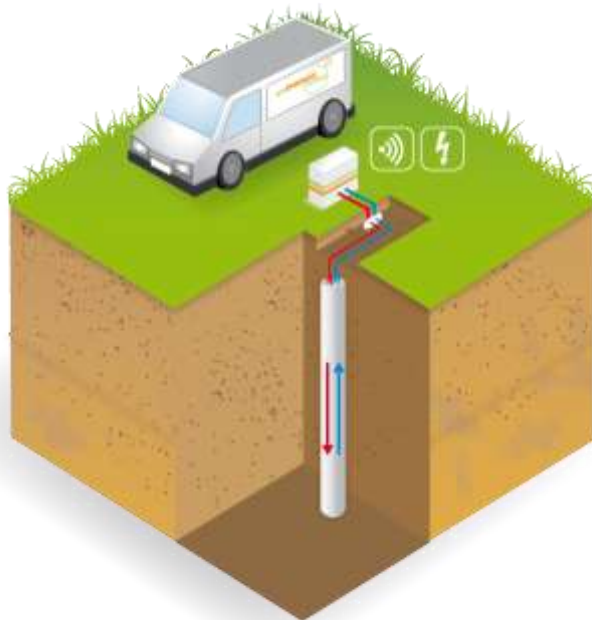


Abbildung 1: Prinzip eines Thermal Response Test.

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 Erdwärmepumpenbohrungen 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.

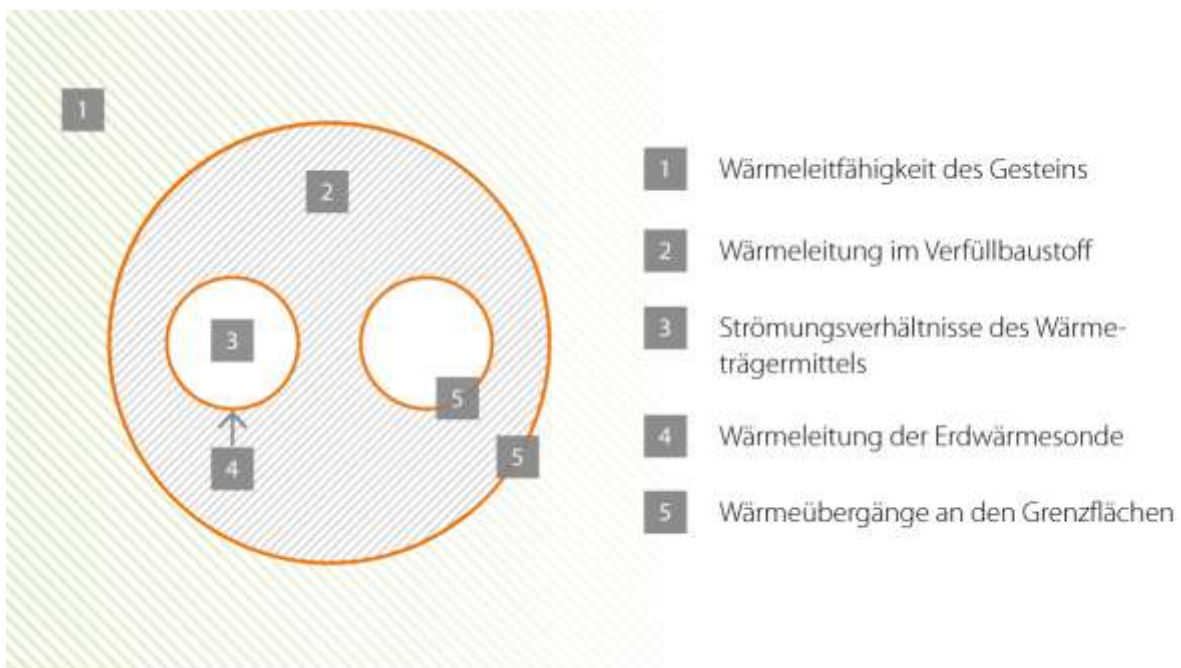


Abbildung 2: Einflussfaktoren auf den thermischen Bohrlochwiderstand.

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 $[\text{m}^2/\text{s}]$, $\alpha = \lambda/(\rho \cdot c_p)$
r_0	Bohrlochradius $[\text{mm}]$

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 ($\pm 0,1 \text{ K}$) und den Volumenstromsensor ($\pm 0,1 \text{ l/min}$) 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

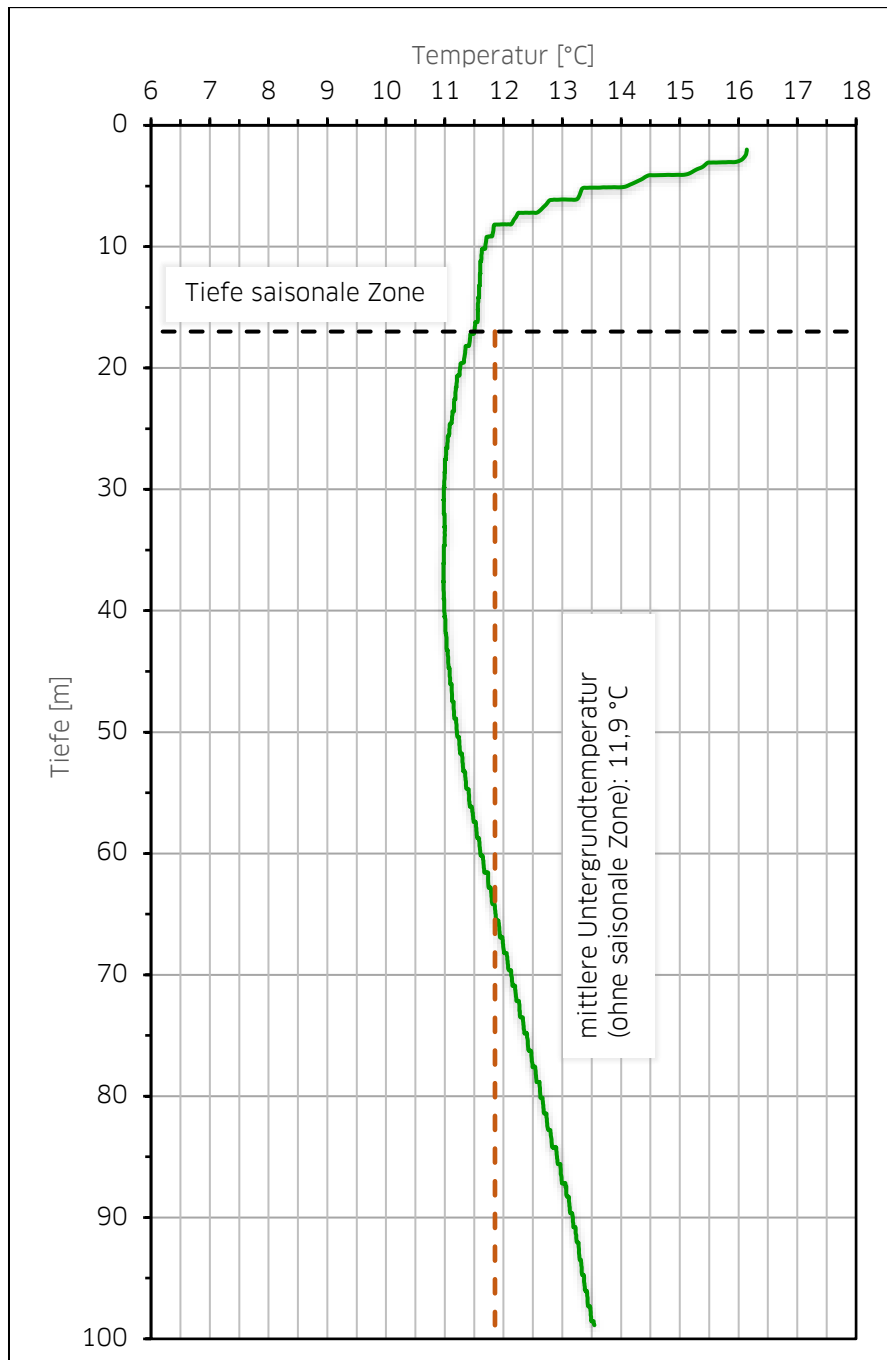


Abbildung 3: Tiefenprofil der ungestörten Untergrundtemperatur.

Anlage 2 Messdaten

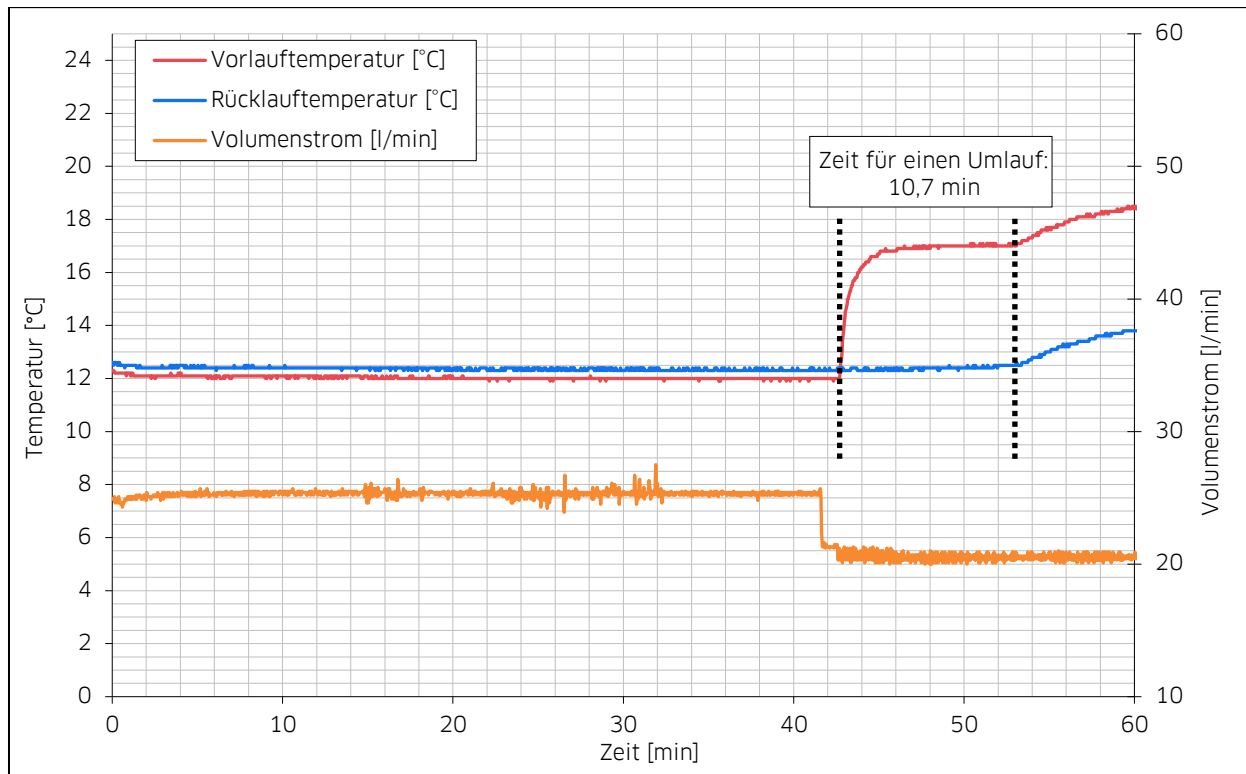


Abbildung 4: Erste Testphase zur Bestimmung der Sondenlänge.

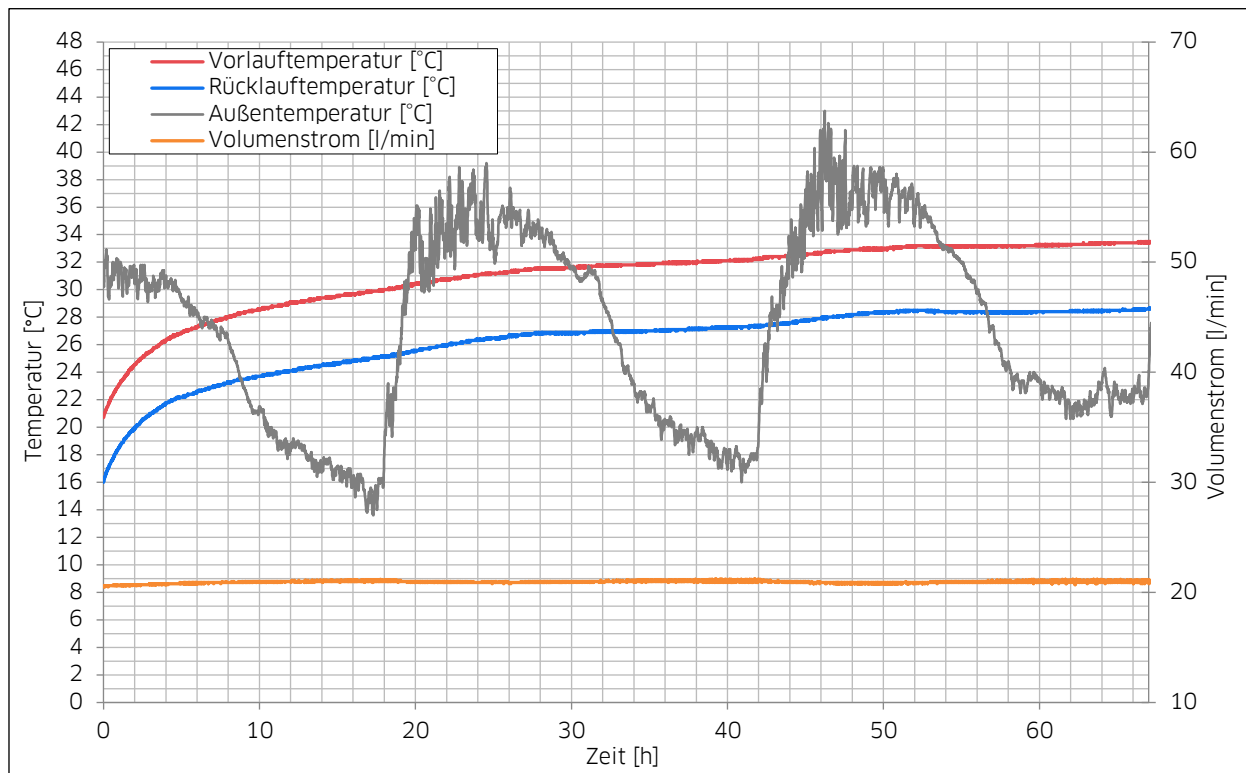


Abbildung 5: Zweite Testphase zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.

Anlage 3 Kurzprotokoll

Kurzprotokoll: Thermal Response Test		
Projektnr. AN	4645	geoENERGIE Konzept GmbH Am St. Niclas Schacht 13, 09599 Freiberg Tel.: +49 3731 79878 10 info@geoenergie-konzept.de
Projektnr. AG		
Bauvorhaben	Neubau Förderschule Radebeul Gemarkung Trachau Flurstück 732/15	
Auftraggeber	Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen Wilhelm-Liebkecht-Str. 1a 09337 Hohenstein-Ernstthal	Kontaktperson AG Frau Weber
Bohrunternehmen	Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen Wilhelm-Liebkecht-Str. 1a 09337 Hohenstein-Ernstthal	
Randbedingungen		
Messzeitraum	07.07.2023 - 10.07.2023	
Bohrtiefe	100 m	
Sondenlänge	100 m	
mittlerer Bohrdurchmesser	161 mm	
Sondentyp	Doppel-U PE100-RC 32 x 2,9 mm	
Verpressmaterial	Calidutherm	
Messreihen TRT		
Bemerkungen	TRT an Probebohrung	
Testergebnisse		
mittlere Untergrundtemperatur	11,9 °C	
effektive Wärmeleitfähigkeit	2,1 ± 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

12.07.2023

Auftragsnummer

4645

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Neubau Förderschule, Trachau

Anlage 4 Fotodokumentation



Abbildung 8: Erdwärmesonde nach Testende.

Datum

12.07.2023

Auftragsnummer

4645

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Neubau Förderschule, Trachau

Anlage 5 Schichtenverzeichnis

Das nachfolgende Bohrprofil wurde durch die Bohrfirma Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen 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

12.07.2023

Auftragsnummer

4645

Bericht

Geothermische Testarbeiten

Bauvorhaben

Neubau Förderschule, Trachau

