

Geothermische Testarbeiten

Bundeswehrkaserne Hof
Hohe Straße
95030 Hof

Inhalt

1	Vorbemerkungen.....	3
2	Thermal Response Test.....	3
3	Randbedingungen	3
3.1	Bohrung	3
3.2	TRT	4
4	Messergebnisse.....	4
4.1	Ruhetemperaturprofil	4
4.2	TRT	4
5	Fazit	6

Anlagen

- 1 Funktionsprinzip Thermal Response Test
- 2 Messreihen

1 Vorbemerkungen

Durch die Fa. _____ wurde die Fa. _____ am 20.11.2014 mit der Durchführung geothermischer Testarbeiten in Hof beauftragt.

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.

2 Thermal Response Test

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 ausgebauten Erdwärmesonde.

Bei einem TRT wird über einem 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. _____ errichtet. In der Tabelle 1 sind die wesentlichen Randbedingungen der Bohrung aufgeführt:

Tab. 1: Randbedingungen der Bohrung/Erdwärmesonde

Parameter der Bohrung	
Bohrverfahren	Imlochhammer
Bohrtiefe	130,0 m
Sondenlänge	130,0 m
Bohrdurchmesser	152 mm
Durchmesser/Tiefe Verrohrung	178 / 8 mm / m
Sondentyp	Doppel-U PE; 32 x 2,9 mm
Verpressmaterial	ThermoCem Plus
Wärmeleitfähigkeit gemäß Datenblatt	2,00 W/m,K

3.2 TRT

Nachfolgende Tabelle zeigt die wesentlichen Randbedingungen der Messung.

Tab. 2: Parameter des TRTs

Randbedingungen TRT		
Messzeitraum	24.11.2014 - 27.11.2014	
Außentemperaturen	-1,0 ... 6,5 °C	
mittlere Heizleistung	5446 W	
Wärmeträgermedium	Wasser	
Durchsatz	19,5 l/min	
Temperaturspreizung	4,0 K	
Strömungsregime	turbulent	

4 Messergebnisse

4.1 Ruhetemperaturprofil

Durch die Messung eines Ruhetemperaturprofils können Aussagen zu jahreszeitlichen Einflüssen, dem geothermischen Gradienten und ggf. vorkommenden Grundwasser getroffen werden. Die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Messung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tab. 3: Ergebnisse Temperaturprofil

Ergebnisse des Ruhetemperaturprofils			
Tiefe saisonale Zone	$t_{saisonal}$	25,0 m	
mittlere Untergrundtemperatur ohne saisonale Zone	T_{T-log}	9,56 °C	
geothermischer Gradient (ab 50m)	g	1,40 K/100 m	

4.2 TRT

Mit dem durchgeführten Test konnten die folgenden Untergrundeigenschaften bestimmt werden:

Tab. 4: Testergebnisse

Ergebnisse des TRT		
ungestörte Untergrundtemperatur	T_{mittel}	9,1 °C
effektive Wärmeleitfähigkeit	λ^*	3,32 W/m,K
thermischer Bohrlochwiderstand	R_b	0,08 K/W/m
Sondenlänge (berechnet aus TRT)	l_{TRT}	129 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. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit über die Testdauer.

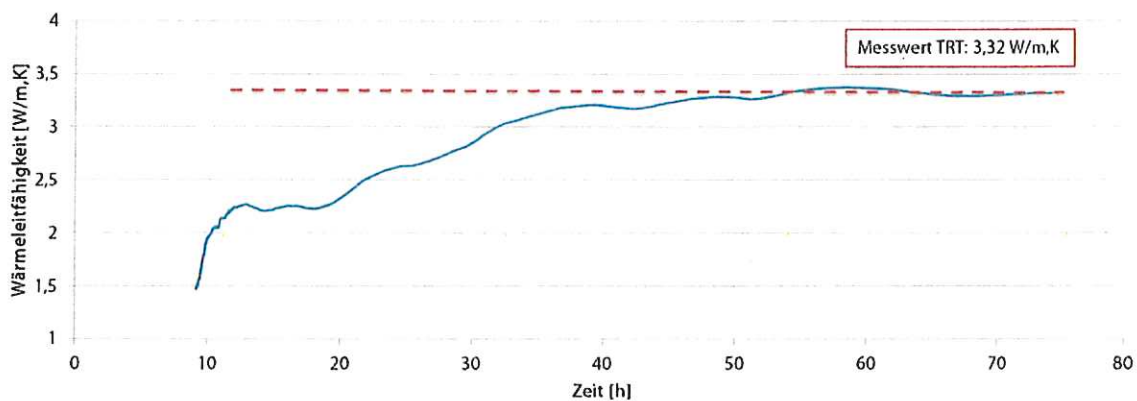


Abb. 1: graduelle Auswertung der Wärmeleitfähigkeit

Der Messwert konvergiert gegen den in Tabelle 4 dargestellten Wert und bestätigt damit die Richtigkeit der gemessenen Größen.

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

5 Fazit

Die aus der Messung ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit des erschlossenen Untergrundes bis 130 m liegt bei 3,32 W/m,K. In der nachfolgenden Abbildung sind die Literaturdaten der einzelnen Schichten, die mittlere Wärmeleitfähigkeit laut Bohrdokumentation sowie das Ergebnis des durchgeführten TRT vergleichend gegenübergestellt.

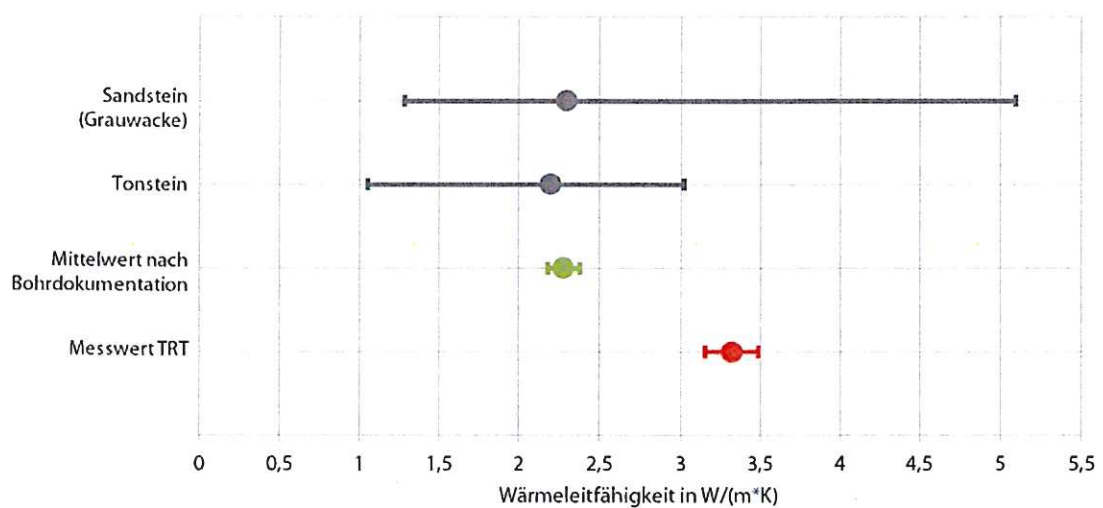


Abb. 2: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten

Die ermittelte mittlere Untergrundtemperatur für die 130 m tiefe Bohrung liegt bei 9,56 °C (ohne saisonale Zone).

Anlage 1

ANLAGE 1 Funktionsprinzip TRT

Datum	28.11.2014
Projekt-Nr.	
Bauvorhaben	Bundeswehrkaserne Hof
zum Bericht	Geothermische Testarbeiten
Seite	1 von 4

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.

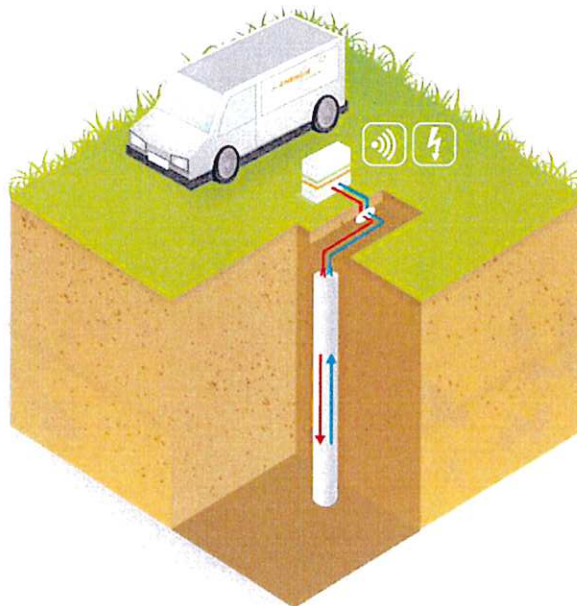


Abb. 1: Prinzip eines Thermal Response Test

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 Erdwärmepumpe 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.

Zu Beginn des Thermal Response Test werden die Rücklauftemperaturen aufgezeichnet. Je nach Sondenlänge und Durchflussrate erhält man in der ersten Phase der Testarbeiten ein Abbild der Erdreichtemperatur. Eine zweite Möglichkeit ist die Aufzeichnung eines Ruhetemperaturprofils. Damit kann eine tiefer aufgelöste Information der Untergrundtemperatur dargestellt werden.

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.

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 erhält demnach qualitative Aussagen über die thermischen Eigenschaften von Sonden- und Verpressmaterial.

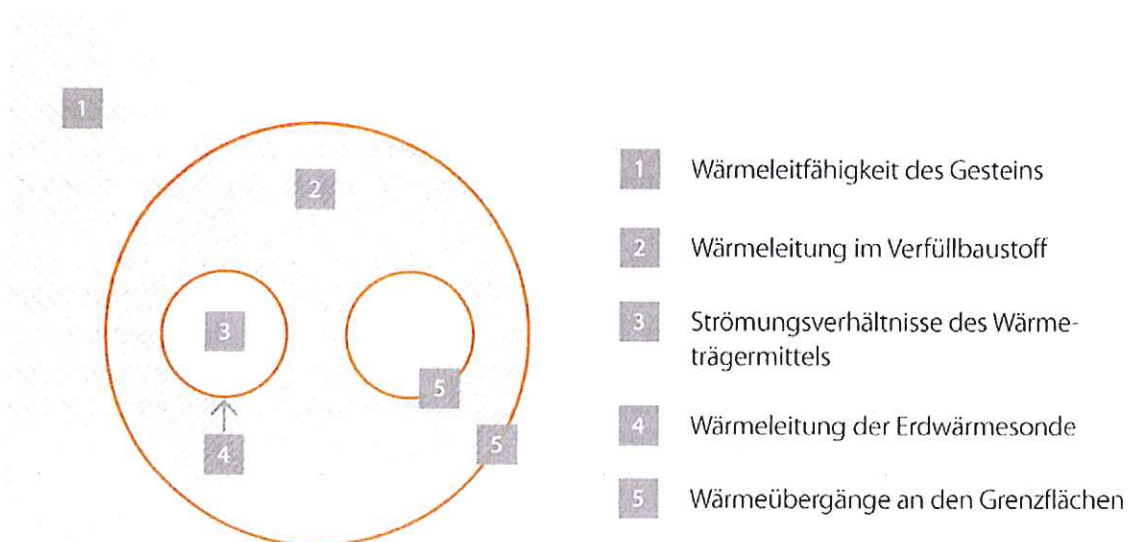


Abb. 2: Einflussfaktoren auf den thermischen Bohrlochwiderstand

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 weitere Verwendbarkeit der Daten.

Neben den 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

ANLAGE 2
Messdaten

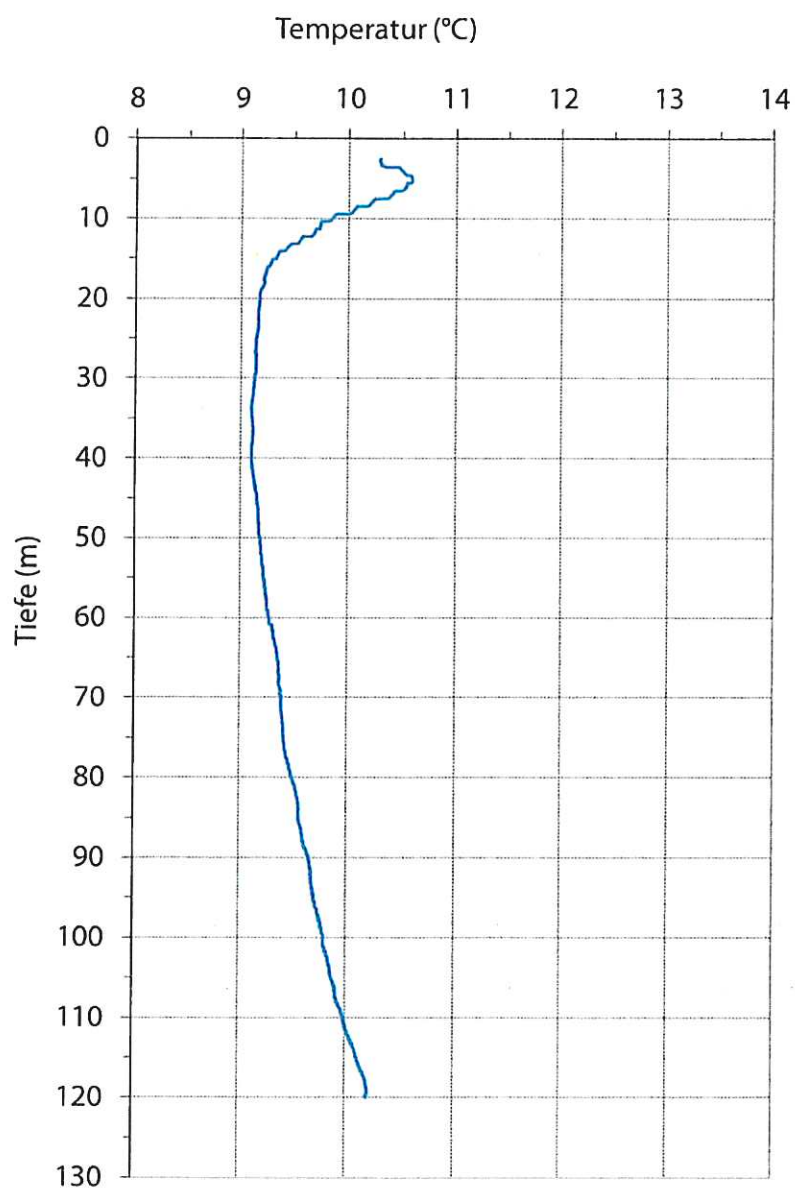


Abb. 1: Ruhetemperaturprofil

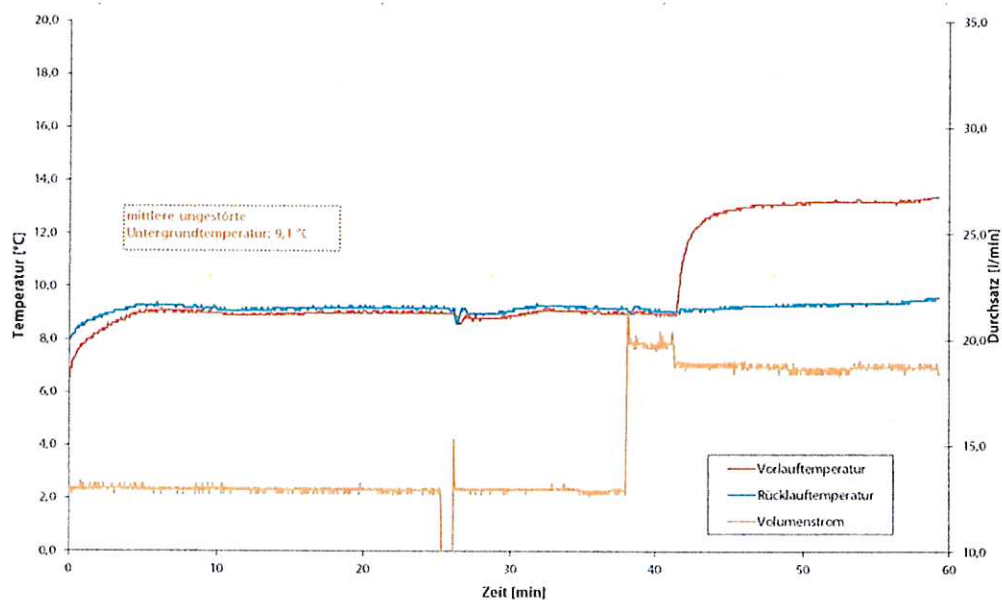


Abb. 2: Erste Testphase zur Bestimmung der ungestörten Untergrundtemperatur

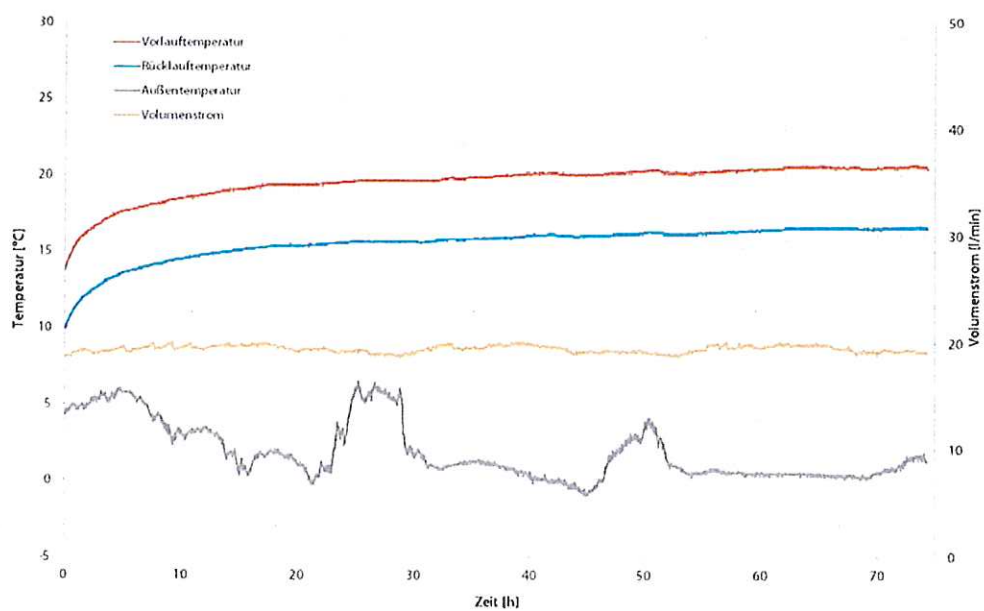


Abb. 3: Übersicht der Messreihen des TRT