

DOKUMENTATIONSBERICHT
zur Durchführung von geothermischen Messungen
(Temperaturmessungen und Geothermal Response Test)
und Simulation des Betriebes eines Erdwärmesondenfeldes
als Planungsbestandteil einer vorgesehenen geothermischen
Nutzung des Untergrundes

BAUVORHABEN

Sanierung und Erweiterung
Grundschule und Hort Dissenchen
Dissencher Schulstraße 1
03052 Cottbus

AUFTRAGGEBER

R+S Bohrgesellschaft mbH
Stadtring 3
03042 Cottbus

AUFTRAGNEHMER



Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH
Gerhart-Hauptmann-Straße 19, 18055 Rostock
Telefon: 0381 252 898 10
E-Mail: info@hsw-rostock.de

BEARBEITER

Dipl.-Ing. Björn Oldorf
M.Sc. Mathias Dasse

HSW-PROJEKTNUMMER

2025/11/060

ERSTELLT

26.03.2025



DIN EN ISO/IEC 17025:2005
u.a. Durchführung und Auswertung
von Geothermal Response Tests

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass.....	1
2	Herstellung der Test-Erdwärmesonde.....	1
3	Thermophysikalische Bewertung der erbohrten geologischen Schichten	2
4	Geothermische Messungen - Hintergrund	3
5	Temperatur-Profilmessungen, GRT-Durchführung und - Auswertung.....	4
5.1	Messung der ungestörten Untergrundtemperatur (vor dem GRT)	4
5.2	Übersicht zur GRT-Durchführung	6
5.3	Umwälzphase	7
5.4	Messphase Wärmeeintrag	7
5.5	Auswertung der Messdaten.....	8
5.6	Ergebnisse der Auswertung.....	9
5.7	Ergebniskonvergenz	9
5.8	Fehlerabschätzung	10
5.9	Temperatur-Profilmessung nach dem GRT	10
6	Simulation des Betriebes eines Erdwärmesondenfeldes	12
6.1	Ziel der Berechnung	12
6.2	Eingangsparameter und Bemessungskriterien	12
6.3	Ergebnisse der EED-Simulation	14
7	Zusammenfassung und Ergebnisinterpretation	16

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Standort des Bohrpunktes bzw. der Test-Erdwärmesonde.....	2
Abbildung 2: Temperatur-Tiefen-Profil vor dem GRT.....	5
Abbildung 3: Thermisch isoliertes Messgerät am Test-Standort.....	6
Abbildung 4: Umwälzphase, Messung der Fluidtemperatur vor GRT-Beginn.....	7
Abbildung 5: Temperaturverläufe und Heizleistung während der Messphase.....	8
Abbildung 6: Mittlere Fluidmitteltemperatur für den Auswertzeitraum.....	9
Abbildung 7: Sequenzielle Auswertung der Wärmeleitfähigkeit.....	10
Abbildung 8: Temperatur-Tiefen-Profile vor und nach dem GRT sowie Bohrprofil.....	11
Abbildung 9: Prognostizierter Verlauf der Fluidtemperaturen im Betrachtungszeitraum.....	15

Anlage 1: Bohrprofil der Erkundungsbohrung

Anlage 2: EED-Berechnungsprotokoll

1 Anlass

Auf dem Areal der Grundschule Dissenchen westlich der Dissenchener Schulstraße in 03052 Cottbus (Bundesland Brandenburg) ist in Zusammenhang mit der geplanten Sanierung und Erweiterung des Schulgebäudes sowie des Horts eine wärmepumpengestützte geothermische Nutzung des Untergrundes mittels Erdwärmesonden vorgesehen. Bauherr ist die Stadt Cottbus.

Aufgrund des Vorhabenumfanges (hier: Heizleistung der Wärmepumpenanlage $\sim 38,5$ kW) ist der Nachweis der thermophysikalischen Eigenschaften des Untergrundes zur aufbauenden bzw. begleitenden Planung erforderlich und wird i.d.R. bei größeren Vorhaben auch im Rahmen des wasserrechtlichen Genehmigungsverfahrens behördlich beauftragt.

Die *H.S.W. GmbH* wurde am 25.02.2025 durch das Fachbohrunternehmen *R+S Bohrgesellschaft mbH* (Cottbus) mit nachfolgenden Leistungen beauftragt, die im vorliegenden Bericht dokumentiert sind:

- Temperatur-Tiefen-Messungen in einer bauseits hergestellten Test-Erdwärmesonde zum Nachweis der ungestörten Untergrundtemperatur und ggf. zur Ableitung grundwasserdynamischer Einflüsse
- Durchführung eines Geothermal Response Tests (GRT) zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der anstehenden geologischen Schichten am Messstandort und des thermischen Bohrlochwiderstandes der Test-Erdwärmesonde
- Dimensionierung des erforderlichen Erdwärmesondenfeldes mittels der Geosoftware *EED* (*Earth-Energy-Designer 4.3*) auf Basis der in situ gewonnenen Messergebnisse und unter Berücksichtigung des geplanten Versorgungskonzeptes

2 Herstellung der Test-Erdwärmesonde

Die Erkundungsbohrung sowie die Herstellung der Test-Erdwärmesonde erfolgten im Auftrag des Bauherrn durch das zertifizierte Fachbohrunternehmen *R+S Bohrgesellschaft mbH*. Die Erkundungsbohrung wurde am 22.02.2025 bis zur Endtiefe von 95 m durchgeführt (Standort gemäß Abbildung 1 umseitig).

Der Bohrdurchmesser betrug ca. 160 mm. Eine temporäre Schutzverrohrung kam gemäß der vorliegenden Bohrdokumentation nicht zum Einsatz

Der Ausbau der Bohrung erfolgte mit einer Doppel-U-Erdwärmesonde bei einem Einzelrohrdurchmesser von 32 x 3,0 mm (Außendurchmesser x Wandstärke) mit einer dokumentierten Einbautiefe von ebenfalls 95 m.

Zur Verfüllung des Bohrlochringraumes wurde das thermisch verbesserte Produkt *Füllbinder EWM* (Laborwert der Wärmeleitfähigkeit $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) des Herstellers *SCHWENK Zement GmbH & Co. KG* verwendet.

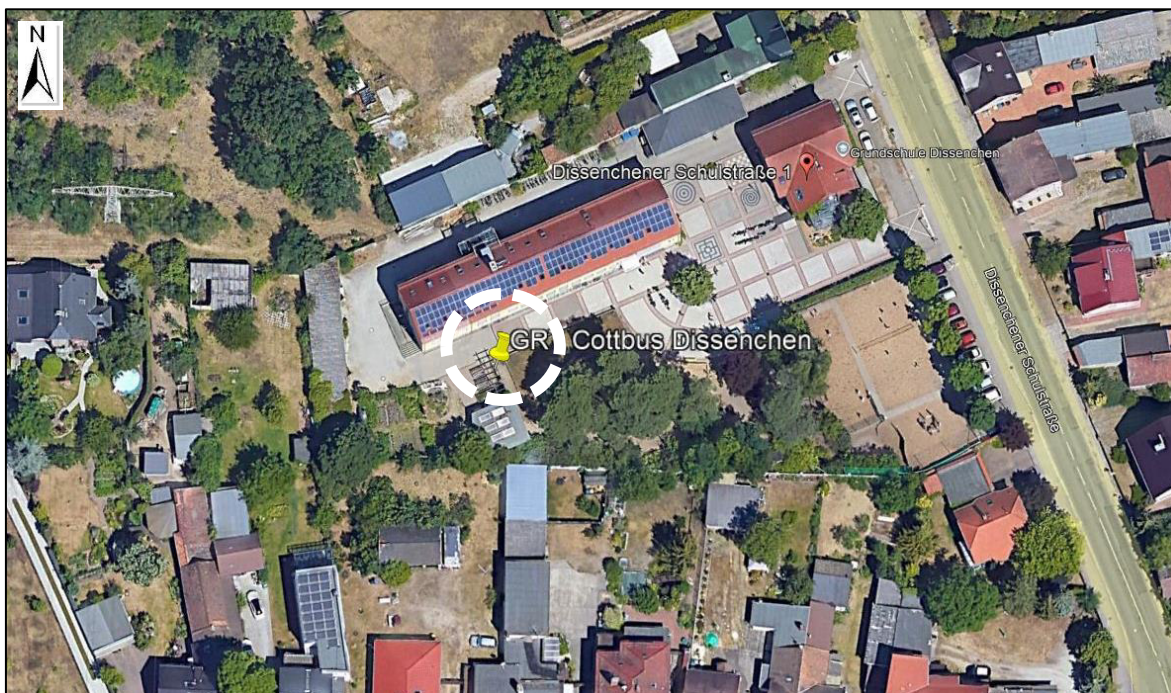


Abbildung 1: Standort des Bohrpunktes bzw. der Test-Erdwärmesonde (Quellen: Google Earth)

3 Thermophysikalische Bewertung der erbohrten geologischen Schichten

Die prozentualen Anteile der erbohrten geologischen Schichten stellen sich bis zur Erschließungstiefe der Erdwärmesonde dem Anteil nach zunehmend wie folgt dar:

- ca. 5 % Braunkohlenschluff
- ca. 16 % Feinkies
- ca. 79 % Feinsand

Die geologischen Einheiten können aufgrund der gesteinsphysikalischen Eigenschaften sowie variierender Wassergehalte erhebliche Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Des Weiteren können regionale Unterschiede der scheinbaren bzw. effektiven Wärmeleitfähigkeit infolge eines zusätzlichen konvektiven Wärmetransportes durch das Grundwasser auftreten.

Der Grundwasserstand/Druckwasserspiegel wurde aufgrund des verwendeten Spülbohrverfahrens nicht dokumentiert, wird gemäß den recherchierten amtlichen Informationen (hier: Kartenserver des LfU Brandenburg) bei ca. 10...15 m u. GOK geschätzt. Es ist somit von überwiegend grundwassergesättigten Verhältnissen auszugehen.

In der VDI-Richtlinie 4640 werden für die einzelnen Substrate entsprechende Wärmeleitfähigkeiten und volumenbezogene spezifische Wärmekapazitäten beispielhaft angegeben, u.a. für:

	Wärmeleitfähigkeit	spezifische Wärmekapazität
- Ton/Schluff (wassergesättigt)	1,1 - 3,1 W/(m·K)	2,0 - 2,8 MJ/(m ³ ·K)
- Kies/Steine (wassergesättigt)	2,2 - 3,0 W/(m·K)	2,2 - 2,8 MJ/(m ³ ·K)
- Sand (wassergesättigt)	2,0 - 3,0 W/(m·K)	2,2 - 2,8 MJ/(m ³ ·K)
- Sand (trocken)	0,3 - 0,9 W/(m·K)	1,3 - 1,6 MJ/(m ³ ·K)

Je nach Anteil, Zusammensetzung und Wassergehalt der Schichten kann die Wärmeleitfähigkeit bzw. die spezifische Wärmekapazität variieren.

4 Geothermische Messungen - Hintergrund

Für die Planung und Leistungsberechnung - insbesondere von mittleren bis großen Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Erdwärmesonden - sind möglichst exakte Kenntnisse über die thermophysikalischen Eigenschaften des Untergrundes erforderlich. Bei den geothermischen Messungen (Durchführung von Temperatur-Profilmessungen und eines Geothermal Response Tests (GRT, auch Thermal Response Test genannt (TRT)) ist eine in-situ-Bestimmung entscheidender Parameter für die Bemessung der Erdwärmeanlage möglich. Auf Sicherheitszuschläge der konventionellen Bemessung nach Literaturwerten kann verzichtet werden bzw. ist eine Absicherung der in der Vorplanung angesetzten Parameter möglich.

Der Vorteil der In-situ-Messungen im Vergleich zu Laboruntersuchungen an Bodenproben ist, dass diese bei quasi ungestörten Untergrundverhältnissen über die gesamte Erdwärmesondenlänge durchgeführt werden und thermische Einflüsse der Bohrlochverfüllung, die technische Qualität der Erdwärmesonde bzw. des Sondeneinbaus sowie eine ggf. vorhandene Grundwasserströmung mit in die Messung eingehen. Im Allgemeinen steht die Test-Erdwärmesonde nach Beendigung der Messkampagne für eine uneingeschränkte Nachnutzung zur Verfügung.

Im Zuge der geothermischen Messungen u.a. werden die Parameter

- lokale ungestörte Erdreichtemperatur T_b ,
- lokale effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} und
- ausbauspezifischer thermischer Bohrlochwiderstand R_b

bestimmt.

Die **ungestörte Untergrundtemperatur** hat entscheidenden Einfluss auf das Potential bzw. die Betriebscharakteristik der geothermischen Gesamtanlage. Sie ist der Ausgangswert für die rechnerisch nachzuweisende Einhaltung technisch und genehmigungsrechtlich konformer Temperaturveränderungen.

Die **Wärmeleitfähigkeit** [$W/(m \cdot K)$] beschreibt das Wärmetransportvermögen mittels Wärmeleitung (Konduktion) im Untergrund. Sie wird im Wesentlichen vom anstehenden Gestein und dessen Wassersättigung bestimmt. Kann sich Grundwasser frei bewegen oder sind wasserführende Klüfte vorhanden, so ist zusätzlich ein konvektiver Wärmetransport gegeben. Die „effektive“ Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt sowohl den konduktiven als auch den konvektiven Wärmetransport.

Der **thermische Bohrlochwiderstand** [$K/(W/m)$] ist ein Maß für die Temperaturdifferenz, die infolge des Wärmestroms vom Gebirge zum Wärmeträgerfluid in der Sonde bzw. umgekehrt entsteht. Der thermische Bohrlochwiderstand setzt sich üblicherweise aus den thermischen Materialwiderständen des Verfüllmaterials und des Rohrmaterials sowie aus dem thermischen Übergangswiderstand von den Sondenrohren zum zirkulierenden Wärmeträgerfluid zusammen. Weiteren Einfluss auf den Bohrlochwiderstand haben die Sondentiefe, die Eigenschaften des verwendeten Wärmeträgerfluids sowie der Sole-Volumenstrom in den Wärmeübertragerrohren. Der thermische Bohrlochwiderstand R_b verhält sich umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit, d.h. je höher die

Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochinstallation (Verfüllung, Sondenmaterial), desto kleiner ist der Wärmewiderstand. Der mittels Geothermal Response Test gemessene thermische Bohrlochwiderstand R_b beschreibt somit die thermische Qualität der Installation einer Erdwärmesonde.

5 Temperatur-Profilmessungen, GRT-Durchführung und - Auswertung

5.1 Messung der ungestörten Untergrundtemperatur (vor dem GRT)

Zur Bestimmung der mittleren ungestörten Untergrundtemperatur wurde am 03.03.2025 in der Test-Erdwärmesonde eine meterweise Temperatur-Profilmessung mit einem werkskalibrierten (kabelgebundenen) Temperaturlichtlot (Hydrotechnik GmbH, Typ 110) durchgeführt. Der Zeitraum zwischen der Sondenherstellung und der Temperaturmessung betrug 9 Tage.

Die Einführung des Temperatursensors in die Sonde war bis zu einer Tiefe von 95 m möglich.

Im Ergebnis der dokumentierten Temperatur-Profilmessung stellte sich ein Temperatur-Tiefen-Verlauf gemäß der Abbildung 2 dar (Seite 5).

Von der Erdoberfläche bis in den Bereich zwischen ~ 10 m und ~ 20 m unter Gelände ist der Temperaturverlauf allgemein - hier bis ca. 16 m Tiefe - durch saisonale Umwelteinflüsse (Lufttemperatur, Solarstrahlung, Niederschlag) ggf. aber auch durch anstehendes/fließendes Schicht-/Grundwasser sowie ortsabhängig ggf. durch anthropogene Einflussnahme gekennzeichnet.

Ab 16 m u. GOK bis zur Tiefe in 33 m ist eine Abnahme der Untergrundtemperatur von $12,1$ °C auf $11,6$ °C ersichtlich. Der „Wärmestrom von oben“ ist im Eigentlichen für zentralstädtische Lagen typisch und u.a. mit einer zunehmenden Absorption solarer Wärme, verursacht durch Bebauungen und Versiegelungen an der Erdoberfläche in den zurückliegenden Jahrzehnten (z.T. auch Jahrhunderten) zu erklären („urbane Wärmeinseln“). Aber auch in ländlichen Bereichen ohne flächendeckende Bebauungen werden diese Temperaturtendenzen zunehmend beobachtet, was hier auf die Zunahme der mittleren Jahreslufttemperaturen (insbesondere in den letzten Jahren) zurückzuführen ist. Dieser gesamte Bereich (inklusive der saisonalen Umwelteinflüsse) wird als „Solarspeicherzone“ bezeichnet.

Der „geosolare Bereich“ (auch „neutrale Zone“ genannt) mit nahezu konstanter Untergrundtemperatur oder nur geringen Temperaturänderungen, in dem sich die Wärmeströme von der Oberfläche und dem Untergrund im Gleichgewicht befinden, erstreckt sich über den Tiefenbereich von ca. 33 m bis 81 m. Die Temperatur befindet sich hier auf einem Temperaturniveau von $11,4$ °C... $11,6$ °C.

Die „terrestrische Zone“ mit einem erwartungsgemäßen Anstieg der Untergrundtemperatur war ab 81 m Tiefe nachweisbar. Die Untergrundtemperaturen steigen bis zur Messendtiefe in 95 m unter GOK von $11,6$ auf $12,2$ °C an. Der mittlere geothermische Gradient beträgt für diesen Messabschnitt $4,3$ K/100 m.

Im Ergebnis der durchgeführten Temperaturmessung wurde eine momentane mittlere Gebirgs-temperatur von $11,4$ °C ermittelt. Ohne saisonalen Einfluss bis 16 m Tiefe beträgt diese $11,7$ °C. Dieser Temperaturwert ist bei der weiteren Planung für die Berechnung des erforderlichen Erdwärmesondenfeldes zugrunde zu legen.

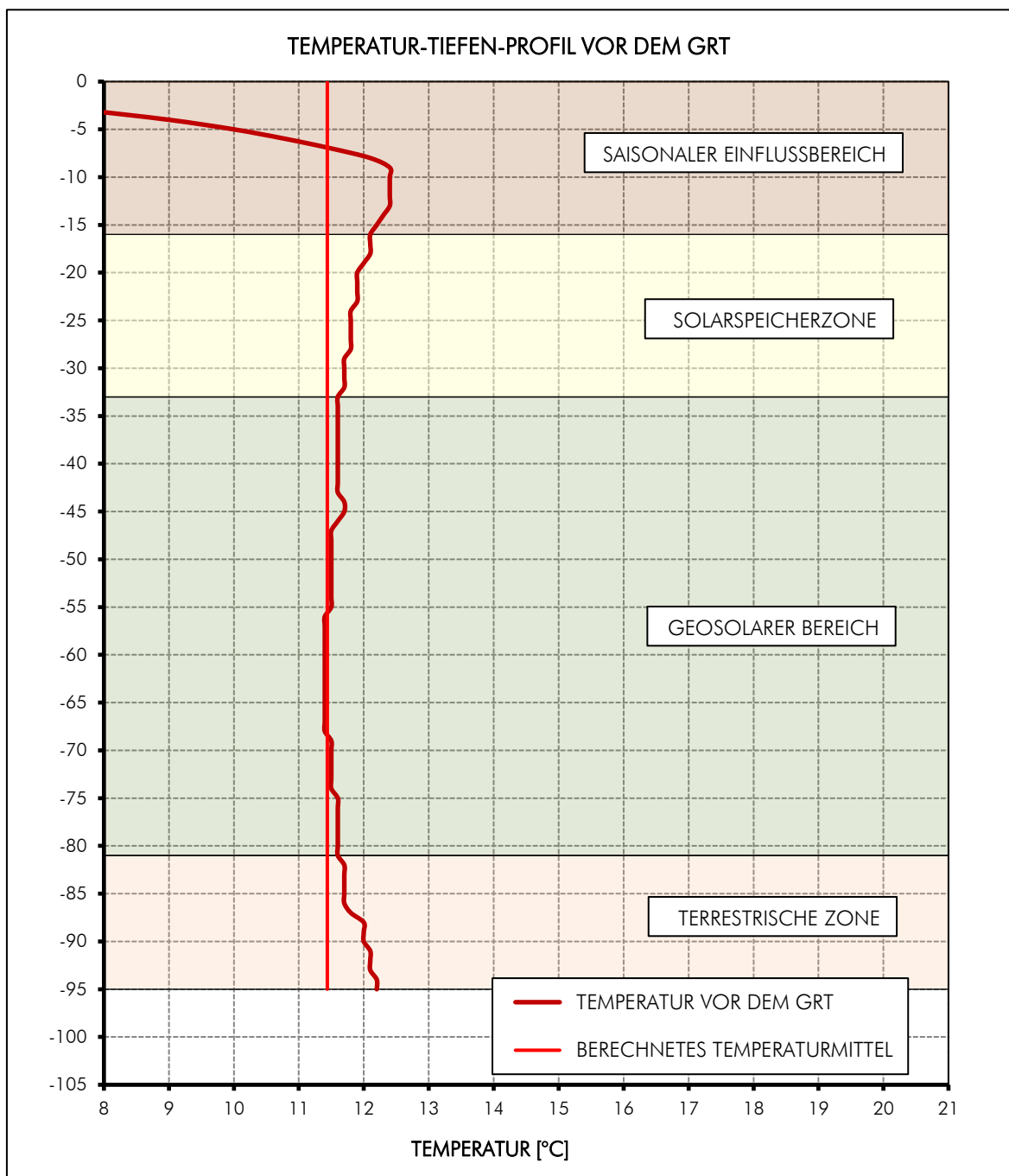


Abbildung 2: Temperatur-Tiefen-Profil vor dem GRT

5.2 Übersicht zur GRT-Durchführung

Eine Übersicht der Sonden- und Bohrlochparameter der Test-Erdwärmesonde sowie zur Testausführung gibt nachfolgende Tabelle:

Dokumentierte Tiefe der Bohrung / der Erdwärmesonde	95 m / 95 m
Tiefe der Temperaturmessung	95 m
Durchmesser Bohrung / Schutzrohr (Tiefe)	ca. 160 mm / -
Erdwärmesonde Typ / Rohrdurchmesser	Doppel-U / 32 x 3 mm
Bohrlochverfüllung Typ / Hersteller	Füllbinder EWM / SCHWENK Zement GmbH
Datum der Fertigstellung der EWS	22.02.2025
Datum der Temperaturmessung / Beginn des GRT	03.03.2025
Stand-/ Ruhezeit der EWS	9 Tage
Leistung Wärmeeintrag GRT	Ø 4,3 kW (entspricht ca. 45 W/m)
Volumenstrom	Ø 1,3 m ³ /h
Dauer der Messung / ausgewerteter Messzeitraum	ca. 98 Stunden / ca. 98 Stunden

Bei der Durchführung des GRT kam ein mobiles Messgerät zum Einsatz. Die Temperaturmessung [°C] erfolgte während der gesamten Testzeit am Vor- und Rücklauf der Sonde (nahezu bodengleich). Des Weiteren wurden mit einer Taktung von 60 Sekunden jeweils Datum und Uhrzeit, Lufttemperatur [°C], Volumenstrom [m³/h] sowie die injizierte Leistung [kW] geloggt.

Das und thermisch isolierte Messequipment am Erkundungsstandort sowie der prinzipielle Testaufbau sind in der nachfolgenden Abbildung 3 dargestellt.

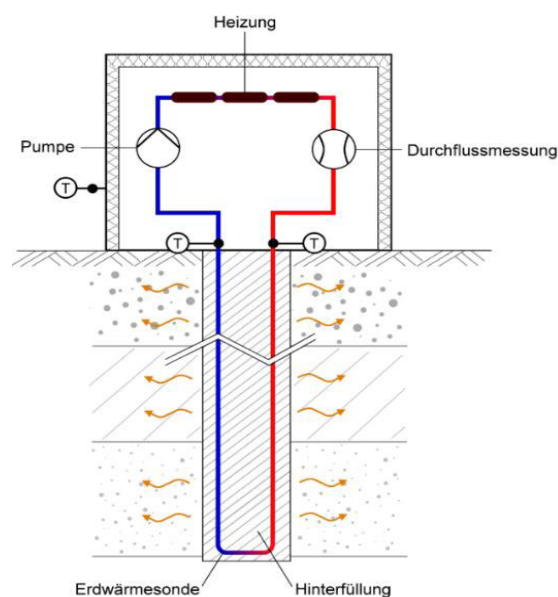


Abbildung 3: Thermisch isoliertes Messgerät am Test-Standort und prinzipieller Aufbau der Messung
 (Quelle: H.S.W. GmbH)

5.3 Umwälzphase

In der Test-Erdwärmesonde fand vor Beginn des GRT eine Phase der ausschließlichen Umwälzung des Fluids von mindestens ca. 45 Minuten statt. Die Fluid-Temperaturen wurden am Ende dieser Umwälzphase im Vor- und Rücklauf der Sonde mit durchschnittlich 11,5 °C aufgezeichnet (Abbildung 4). Das Messergebnis entspricht somit nahezu der mittleren Untergrundtemperatur aus der händischen Messung des Temperaturtiefenprofils (11,4 °C, siehe Seite 4).

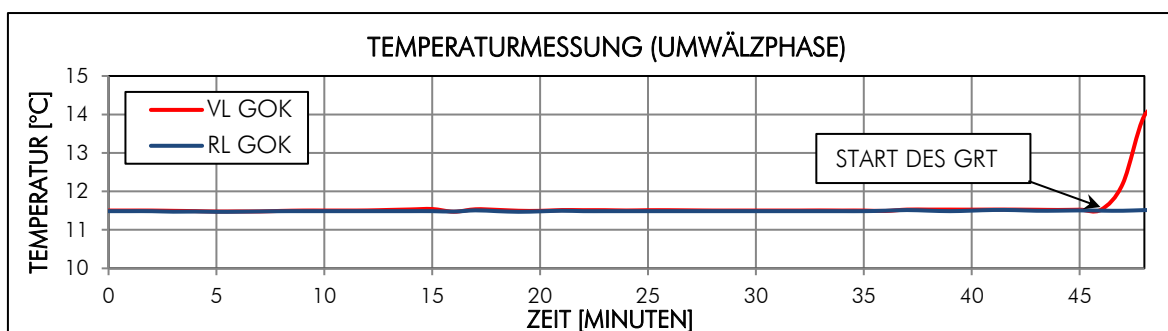


Abbildung 4: Umwälzphase, Messung der Fluidtemperatur vor GRT-Beginn

5.4 Messphase Wärmeeintrag

Der Geothermal Response Test begann mit dem Wärmeeintrag in die Test-Erdwärmesonde am 03.03.2025 um 14:55 Uhr.

Die Abschaltung des Messgerätes erfolgte am 07.03.2025 um 16:32 Uhr. Die Messdauer betrug somit ca. 98 Stunden. Für die Auswertung wurde der gesamte Messzeitraum herangezogen.

Zur Mindest-Messdauer eines Geothermal Response Tests werden Empfehlungen von 48 bzw. 50 h gegeben [u.a. Sanner, B. (2001)]. Die Verlängerung der Messdauer im Vergleich zu den Empfehlungen kann den Einfluss von äußeren Störfaktoren statistisch minimieren und somit die Genauigkeit der Messergebnisse erhöhen.

Die Abbildung 5 (Seite 8) zeigt den Temperaturverlauf während der Messphase sowie die eingetragene thermische Leistung über den gesamten Messzeitraum. Die Temperaturganglinien (Vorlauf- und Rücklauf-temperatur) erreichten sehr schnell einen einheitlich parallelen Verlauf (ΔT_i). Die thermische Leistung wurde während der gesamten Messung auf durchschnittlich 4,3 kW geregelt.

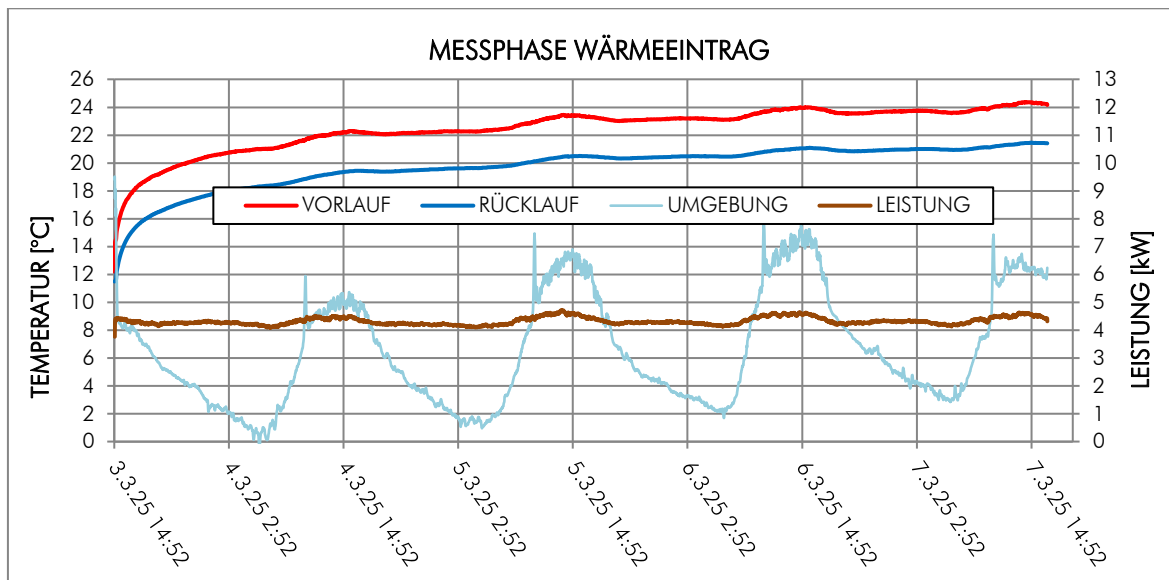


Abbildung 5: Temperaturverläufe und Heizleistung während der Messphase

5.5 Auswertung der Messdaten

Die **Auswertung** eines GRT erfolgt nach der Kelvin'schen Linienquellentheorie [u.a. Hellström, G. (1991 - 1994), Gehlin, S. (1996 - 2000)]:

Gl. 1

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

mit:

T_f	mittlere Fluidtemperatur	[°C],	\dot{Q}	Heizleistung	[W]
λ	Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes	[W/(m·K)],	H	Tiefe der Erdwärmesonde	[m]
t	Zeit	[h],	α	Temperaturleitfähigkeit	[m ² /s]
r_0	Bohrlochradius	[m],	γ	Euler'sche Zahl	
R_b	thermischer Bohrlochwiderstand	[K/(W/m)],	T_s	Temp. des ungestörten Untergrundes	[°C]

Grundlage der Auswertung des GRT ist der Verlauf der Fluidmitteltemperatur (T_f = arithmetische Mittelwerte aus Eintritts- und Austrittstemperatur des Wärmeträgerfluides in die und aus der Erdwärmesonde). Im Ergebnis einer Auftragung der Messwerte der während eines GRT aufgezeichneten mittleren Fluidtemperatur auf eine logarithmische Zeitachse kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes aus der Steigung der sich ergebenden Geraden ermittelt werden.

Nach Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird der thermische Widerstand zwischen Fluid und Bohrlochwand (thermischer Bohrlochwiderstand) berechnet. Für den Startpunkt der Auswertung gilt ein Mindestzeitkriterium (u.a. abhängig vom Bohrlochdurchmesser), welches im konkreten Fall ca. 10 Stunden beträgt.

Der Verlauf der Fluidtemperatur in der Messphase nach dem Startpunkt der Auswertung stellt sich beim Logarithmieren der Zeitwerte für den durchgeführten Test gemäß Abbildung 6 (Seite 9) dar. Das ermittelte Bestimmtheitsmaß R^2 (im Diagramm links oben) gibt den linearen Zusammenhang zwischen der Messreihe und der Regressionsgeraden an. Demzufolge können etwa 96 % der Streuung der Ordinatenwerte (Y) durch lineare Abhängigkeit der Abszissenwerte (X) beschrieben werden.

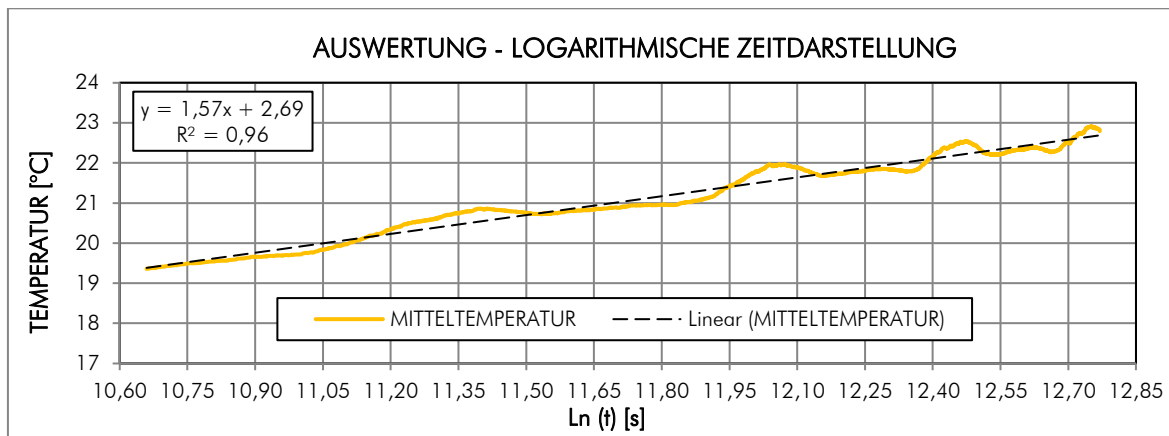


Abbildung 6: Mittlere Fluidmitteltemperatur für den Auswertzeitraum

5.6 Ergebnisse der Auswertung

Maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Auswertung des durchgeführten Tests haben u.a. nachfolgend berücksichtigte Parameter:

Tiefe der Erdwärmesonde (gelotet)	95 m
mittlerer Durchmesser der Bohrung	160 mm
mittlere Leistung des Wärmeeintrages	4,3 kW
Ungestörte Erdreichtemperatur vor dem Messbeginn	11,4 °C
spezifische Wärmekapazität des Erdreichs	2,5 MJ/(m ³ ·K) * ¹

*¹ mittlerer Erwartungswert gemäß VDI-Richtlinie 4640 für die angetroffenen geologischen Schichten

Im Ergebnis der Auswertung des Geothermal Response Tests wurden unter Berücksichtigung der vorgenannten Eingangsdaten nachfolgende thermophysikalische Parameter für den Test-Standort bzw. für die Test-Erdwärmesonde ermittelt:

effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff}	thermischer Bohrlochwiderstand R_b
2,23 W/(m·K)	0,088 K/(W/m)

5.7 Ergebniskonvergenz

Die Konvergenz des Ergebnisses der Wärmeleitfähigkeit wird mittels sequenzieller Auswertung der gemessenen Temperaturantwort ermittelt. Die sequenzielle Auswertung des GRT (zeitlich fortschreitende Auswertung bei gleichem Startzeitpunkt, siehe Abbildung 7 umseitig) zeigt, dass der Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit ab ungefähr der 60. Betriebsstunde relativ konstant bleibt.

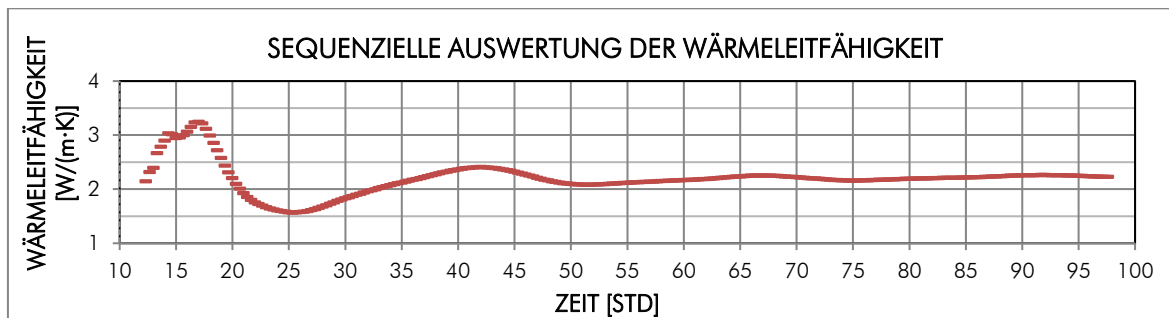


Abbildung 7: Sequenzielle Auswertung der Wärmeleitfähigkeit

Generell lässt ein zeitlich nahezu unveränderter Ergebniswert auf eine ausreichende Messdauer sowie auf keine oder nur geringe äußere Störeinflüsse bzw. grundwasserdynamische Einflüsse schließen. Eine tendenzielle Steigerung des Ergebniswertes mit zunehmenden Messzeitraum zeigt im Regelfall den Einfluss von Grundwasserfließbewegungen an, was bei dieser Messung nicht zu erkennen ist.

5.8 Fehlerabschätzung

Anhand der Darstellung der Fehlerabschätzung ist der Einfluss von Abweichungen der verwendeten Eingangsparameter in Bezug auf die daraus resultierenden Ergebnisse dokumentiert.

Ausgangswerte			2,23		0,088	
Bemessungsparameter	Mess-/ Erwartungswert	Abweichung	Ergebnis λ_{eff} [W/(m·K)]		Ergebnis R_b [K/(W/m)]	
Tiefe der Erdwärmesonde	95 m	+ / - 1 %	2,21	2,25	0,090	0,087
Mittlerer Durchmesser der Bohrung	160 mm	+ / - 10 %	(kein Einfluss)		0,095	0,081
Leistung des Wärmeeintrages	4,3 kW	+ / - 5 %	2,34	2,12	0,083	0,095
ungestörte Erdreichtemperatur	11,4 °C	+ / - 10 %	(kein Einfluss)		0,062	0,115
spezifische Wärmekapazität des Erdreichs	2,5 MJ/(m³K)	+ / - 10 %	(kein Einfluss)		0,092	0,085

5.9 Temperatur-Profilmessung nach dem GRT

Zur Ableitung ggf. vorhandener schichtenspezifischer Unterschiede in der Temperaturwiederangleichung des aufgewärmten Untergrundes an die natürliche Gebirgstemperatur (z.B. infolge von Grundwassereinflüssen bzw. heterogener Eigenschaften der geologischen Schichten) wurde am 07.03.2025 ab 18:20 Uhr (~2 Stunden nach Abschaltung des Wärmeeintrages) eine weitere Temperatur-Profilmessung in der Test-Erdwärmesonde vorgenommen.

Die Ergebnisse der Messung wurden zur Bewertung und Interpretation dem Temperaturprofil vor dem GRT unter Einbeziehung des Bohrprofils gegenübergestellt - siehe Abbildung 8 (Seite 11).

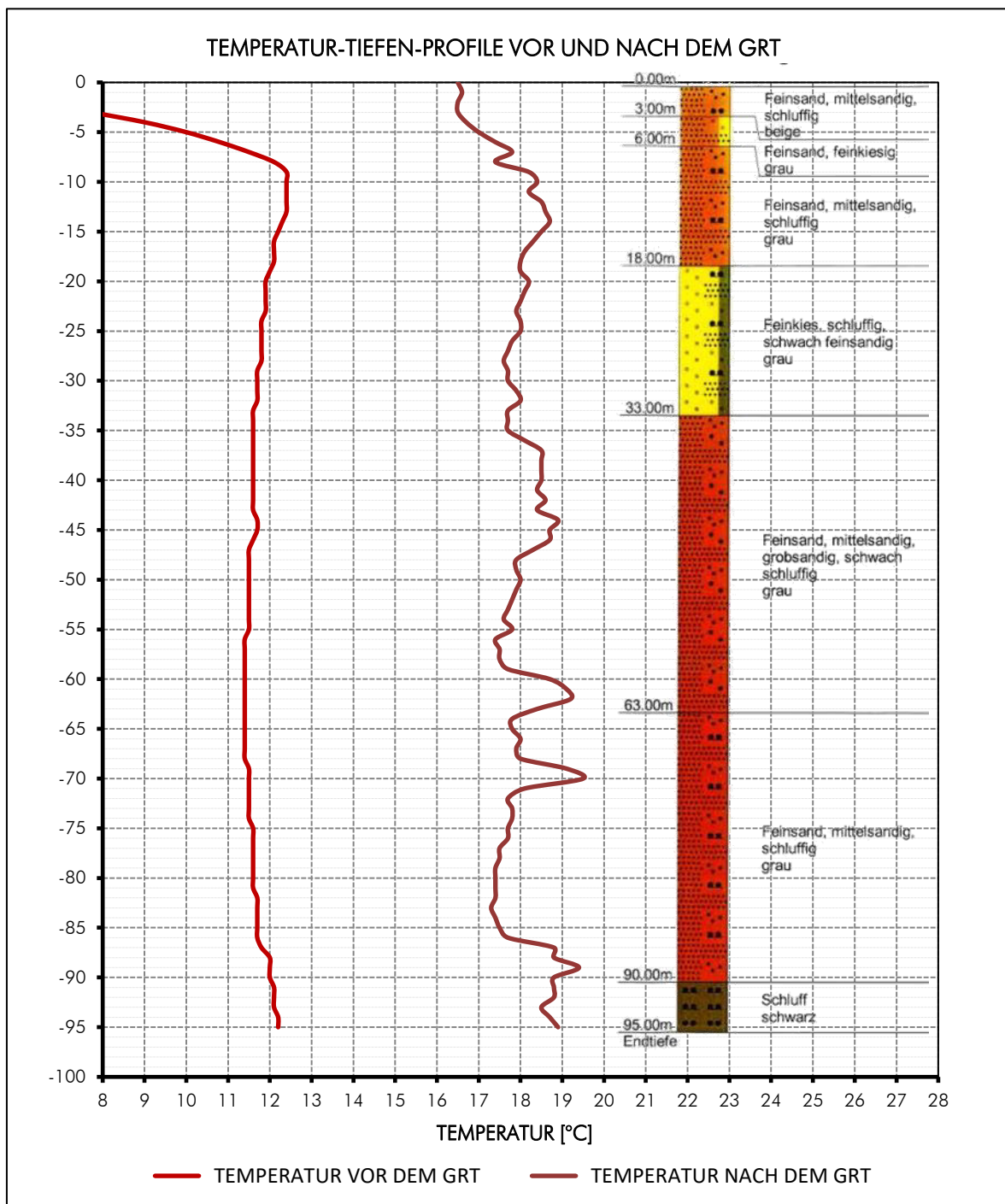


Abbildung 8: Temperatur-Tiefen-Profile vor und nach dem GRT sowie Bohrprofil (nach Geophysik)

Signifikante Grundwasserbewegungen bzw. deutliche Unterschiede oder konkrete Zuweisungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit einzelner Schichten sind aus den Messergebnissen für den Tiefenbereich von etwa 60 bis 70 m (Schluffbänder/-lagen?) und ab ca. 86 m (Schluff/Braunkohlenschluff) abzuleiten. Die langsamere Temperaturwiederangleichung bedeutet eine vergleichsweise niedrigere Wärmeleitfähigkeit der schluffigen Horizonte (plausibel).

6 Simulation des Betriebes eines Erdwärmesondenfeldes

Die fachgerechte Dimensionierung der Erdwärmesonden ist für eine nachhaltige und effiziente Funktion der geothermischen Gesamtanlage unabdingbar und wird bei größeren Erdwärmeevorhaben durch die Genehmigungsbehörde im Zuge des wasserrechtlichen Antragsverfahrens als Nachweis eines für den Grundwasserschutz unbedenklichen Anlagenbetriebes gefordert.

Die Anlagendimensionierung setzt möglichst detaillierte Kenntnisse über verschiedenste projektspezifische Randbedingungen und Anforderungen voraus. Maßgebende Parameter für die Bemessung sind u.a.:

- Anzahl, Tiefe, Konfiguration und Abstand der Erdwärmesonden (EWS)
- Sondentyp, verwendete Baustoffe und Materialien
- geologische/hydrogeologische und thermophysikalische Eigenschaften des Untergrundes (u.a. effektive Wärmeleitfähigkeit, Untergrundtemperatur, spezifische Wärmekapazität)
- geplantes geothermisches Versorgungs-/Nutzungskonzept/Bedarfsanforderungen
- technisch oder behördlich vorgegebene Temperaturlimits im Anlagenbetrieb
- berücksichtigte Simulationsdauer/betrachteter Betriebszeitraum

Die Vielfalt der relevanten Bemessungsparameter und deren Wechselwirkungen bedürfen einer rechnergestützten Simulation der geothermischen Quellenanlage. Zur Nachbildung der dynamischen Speicher- und Transportvorgänge im Einflussbereich von erdgebundenen Wärmeübertragern kommen spezielle Softwarelösungen zum Einsatz, z.B. das hier verwendete Spezialprogramm Earth Energy Designer (EED). Die nachfolgende Simulation wurde unter Berücksichtigung der beim GRT ermittelten thermophysikalischen Parameter (T_u , λ_{eff}) durchgeführt.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Simulation mit EED stationäre Grundwasserhältnisse voraussetzt. Die Darstellung von Grundwasserfließbewegungen im Untergrund und die Ableitung des diesbezüglichen Einflusses auf den Anlagenbetrieb ist nur anhand eines 3D-Untergrundmodells und der Verwendung einer FEM-Software (z.B. Feflow) möglich.

6.1 Ziel der Berechnung

Im Zuge der nachfolgenden Simulation soll das geothermische Nutzungspotential der vorgeplanten Erdwärmesondenanlage, u.a. konform zur aktuellen VDI-Richtlinie 4640 (Ausgabe Juni 2019) und landesspezifischen Regelungen (hier: „*Handlungsempfehlung über Anforderungen des Gewässerschutzes bei Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren*“, MLUK 2023), unter Berücksichtigung des Versorgungskonzeptes und genehmigungsrechtlicher Bemessungsrandbedingungen ermittelt werden.

6.2 Eingangparameter und Bemessungskriterien

Die bei der Bemessung zugrunde gelegten Eingangparameter und Bemessungskriterien werden im Folgenden zusammengefasst:

Berücksichtigte Parameter des Untergrundes bis zu einer Tiefe von 95 m

- gemessene mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit: 2,23 W/(m·K)
- geschätzte mittlere spezifische Wärmekapazität: 2,5 MJ/(m³·K)

- mittlere Untergrundtemperatur (ohne saisonalen Einfluss): 11,7 °C

Anzahl, Tiefe, Konfiguration und Ausbauparameter der Erdwärmesonden

- Im Ergebnis der Vorplanung des Bauherrn wurden 12 Erdwärmesonden mit einer geplanten Einheitstiefe von 95 m (max. 99 m) ausgewiesen.
- Der wechselseitige Abstand der Erdwärmesonden wurde mit 8,0 m vorgegeben.
- In Anlehnung an den bereitgestellten Bohrpunkteplan wird für die Simulation ein „L“ als Anordnung der Erdwärmesonden berücksichtigt.
- Der Bohrlochausbau der weiteren Erdwärmesonden erfolgt analog zu der Testsonde:
 - Doppel-U-Erdwärmesonden, 32 x 3,0 mm Einzelrohrdurchmesser,
 - Bohrlochdurchmesser 160 mm,
 - Ringraumverfüllung: „thermisch verbessertes“ Verfüllmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\geq 2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Versorgungskonzept/Bedarfsdaten/Wärmepumpenbetrieb

Das nachfolgend beschriebene geothermische Versorgungskonzept, die thermischen Bedarfsdaten, die geplanten Deckungsanteile der Geothermie sowie Angaben zur Betriebsweise wurden durch den Fachbereich Hochbau der Stadt Cottbus und den AG übermittelt sowie fernmündlich abgestimmt.

Versorgungskonzept/Bedarfsdaten:

- Es ist eine anteilige Abdeckung des Heizwärmebedarfs der geplanten bzw. sanierten Schulgebäude (inkl. Hort) mittels einer erdgekoppelten zentralen Wärmepumpenanlage vorgesehen. Als 2. Wärmeerzeuger soll ein Gaskessel zum Einsatz kommen.
- Die Warmwasserbereitung soll dezentral erfolgen (nicht über die WPA).
- Eine geothermische Gebäudekühlung ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht vorgesehen.
- Folgende thermische Bedarfsdaten wurden durch den AG bzw. den Bauherrn übermittelt:
 - Gebäudeheizlast: 127 kW
 - Heizwärmebedarf: 177,8 MWh/a (entspricht 1.400 h/a)
 - Deckungsanteil Geothermie: zu ermitteln (Zielwert gemäß Vorplanung: $\sim 70 \%$)

Hinweis: Die Bearbeiter setzen voraus, dass die Heizlast im Rahmen einer Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 ermittelt wurde. Gebäudebedarfsdaten sind generell von klimatischen Bedingungen und erheblich von der Art/Häufigkeit der Nutzung abhängig und können daher in der Praxis teils deutlich von den theoretisch berechneten Werten abweichen. Die H.S.W. GmbH übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der übermittelten/abgeschätzten Daten/Werte.

Wärmepumpen-/Anlagenbetrieb:

- Gemäß dem zuvor beschriebenen Versorgungskonzept ist eine „bivalente“ Betriebsweise der Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage im Heizbetrieb geplant.
- Die Wärmepumpenanlage wurde wie folgt übermittelt (Muster):
 - Hersteller/Typ: Buderus WPS-HT 38
 - Heizleistung (B0/W45): 38,5 kW (COP: 3,6)
 - Volumenstrom Primärkreis: 8,8 m³/ bei 3 K Temperaturspreizung bzw. 2,4 l/s
- Die mittlere Jahresarbeitszahl [JAZ] der Sole-Wasser-Wärmepumpe wird entsprechend des vorgegebenen COP beim Betriebspunkt B0/W45 mit 3,6 im Heizbetrieb rechnerisch berücksichtigt.

- Ein Lastprofil (monatliche Verteilung der Energiemengen) für den Heizbetrieb wurde nicht vorgegeben. Es wurde deswegen vorläufig ein Standard-Lastprofil für ein bivalenten Anlagenbetrieb zugrunde gelegt - siehe auch Anlage 2.
- Es wird entsprechend den Angaben aus dem Datenblatt der Wärmepumpe davon ausgegangen, dass als Wärmeträgerfluid im Primärkreis ein Monoethylenglykol-Wassergemisch mit ca. 30 % Monoethylenglykol-Anteil zum Einsatz kommt.
- Die Eigenschaften der Wärmeträgerflüssigkeit (u.a. kinematische Viskosität, Dichte) werden für eine Soletemperatur von ca. 0 °C berücksichtigt.

Weitere Bemessungskriterien

- Gemäß der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (Juni 2019) muss die Auslegung von Erdwärmesonden so erfolgen, dass die Fluidtemperaturen im vorgesehenen Betrachtungszeitraum innerhalb vorgegebener Grenzen bleiben.
- Im Heizbetrieb soll die Eintrittstemperatur des Wärmeträgermediums in die Erdwärmesonde(n) im Monatsmittel 0 °C nicht unterschreiten. Bei Spitzenlastbetrieb (nicht oder nur kurzzeitig unterbrochener Betriebszyklus der Wärmepumpe) soll diese Temperatur nicht unter -3 °C liegen (Anforderung: frostfreie Ringraumverfüllung, vgl. u.a. Anforderung MLUK 2023, HLOG 2011, Untersuchung TEWAG 2014). Die sich einstellende Temperaturspreizung zwischen Sondenein- und -austritt wird mit 3 K angenommen. Daraus ergeben sich folgende „mittlere“ Fluidtemperaturen in den Erdwärmesonden als Bemessungsgrenze:
Grundlastbetrieb: $\geq 1,5 \text{ °C}$
Spitzenlastbetrieb: $\geq -1,5 \text{ °C}$
- Die Dauer des Spitzenlastbetriebes (mehrständiger Wärmeentzug mit nicht oder nur kurzzeitig unterbrochenem Betriebszyklus) wird in der Simulation entsprechend den jährlichen Volllaststunden (hier: $> 2.800 \text{ h}$) in Anlehnung an die Empfehlungen der o.g. VDI Richtlinie mit 22 Stunden im Heizbetrieb angesetzt.
- Die Temperaturlimits müssen im 25-jährigen Simulationszeitraum eingehalten werden.
- Der Beginn der Simulation wurde mit dem Monat September definiert.

Es ist unbedingt erforderlich, dass seitens des AG und der beteiligten Fachplaner eine kritische Prüfung sämtlicher Bemessungsgrundlagen (u.a. Leistung, Jahresarbeit, Temperaturlimits, Nutzwärmestufen, Wärmebilanzen, Lastprofil, Jahresarbeitszahlen, Solevolumenstrom und Betriebsstunden der Wärmepumpenanlage) vorgenommen wird und eventuelle Änderungen den Bearbeitern mitgeteilt werden. Alle nachfolgend dargestellten Ergebnisse sind nur im Zusammenhang mit den hier aufgeführten Vorgaben bzw. Annahmen gültig.

6.3 Ergebnisse der EED-Simulation

Unter Berücksichtigung des vorgenannten geothermischen Versorgungskonzeptes, der definierten Bemessungsgrenztemperaturen sowie der beschriebenen Simulations-Randbedingungen wären gemäß dem Ergebnis der EED-Simulation mit dem vorgeplanten Erdwärmesondenfeld (12 Erdwärmesonden mit einer einheitlichen Tiefe von 99 m) dem Untergrund jährlich maximal ca. **79 MWh** zu entziehen. Dies entspricht gebäudeseitig ca. **110 MWh/a** bzw. ca. **62 % Deckungsanteil** am prognostizierten Gesamt-Heizwärmebedarf.

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse/Kenndaten:

Gesamt-Erdwärmesondenlänge: 1.188 m (12 x 99 m)
 Erdwärmesondentyp: Doppel-U-Ausführung, 32 mm Rohrdurchmesser
 mittlerer Bohrdurchmesser: 160 mm
 Bohrlochverfüllung: thermisch verbessert, $\lambda \geq 2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 wechselseitiger Abstand der EWS: 8,0 m
 Anordnung der EWS: „L“-Konfiguration
 Strömungsverhältnisse bei Spitzenlast: laminar in den EWS (Reynoldszahl ca. 1.150)

Berücksichtigte thermische Bedarfsanforderungen / Untergrundbeanspruchung:

gebäudeseitige Deckungsanteile WPA mit Erdwärmesonden		erdseitig	
Heizleistung WPA	38,5 kW	Entzugsleistung	27,8 kW
Wärmeabgabe	110,0 MWh/a	Wärmeentzug	79,4 MWh/a

Aus der Berechnung ergeben sich folgende **spezifische erdseitige Werte** je Meter EWS:

Entzugsleistung	23,4 W/m	Entzugsarbeit	66,8 kWh/(m·a)
-----------------	----------	---------------	----------------

Die gemäß EED-Simulation prognostizierten mittleren Fluidtemperaturen im Solekreis sind in der Abbildung 9 dargestellt (Berechnungsprotokoll siehe Anlage 2).

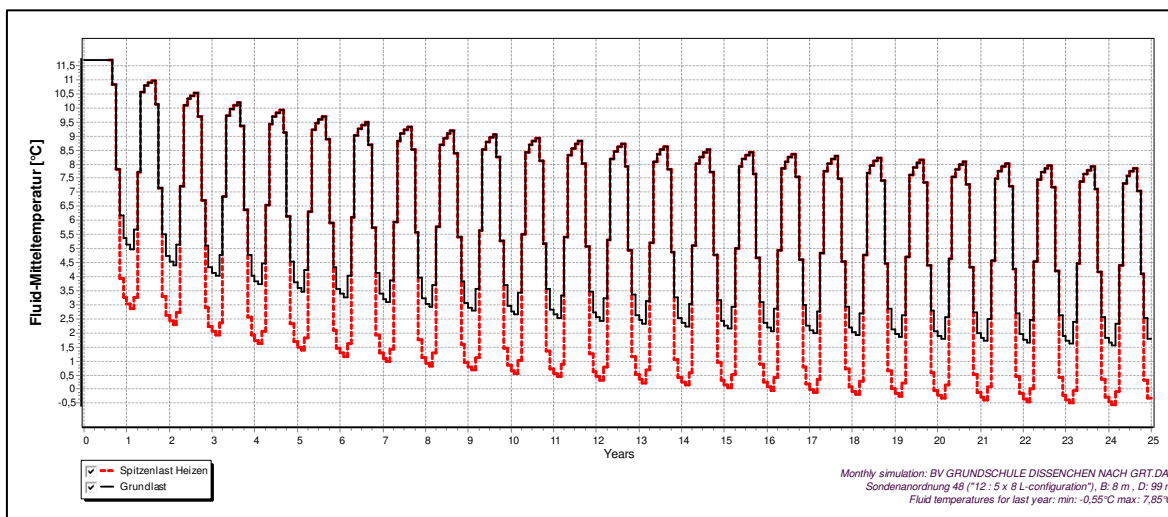


Abbildung 9: Prognostizierter Verlauf der Fluidtemperaturen im Betrachtungszeitraum (25 Jahre)

7 Zusammenfassung und Ergebnisinterpretation

Im Rahmen der Planungen einer geothermischen Nutzung des Untergrundes auf dem Areal der Grundschule Dissenchen (hier: westlich der Dissenchener Schulsstraße in 03052 Cottbus) wurden durch die *H.S.W. GmbH* im Auftrag der *R+S Bohrgesellschaft mbH* geothermische Messungen vorgenommen. Dazu gehörten die Durchführung von Temperaturmessungen und eines Geothermal Response Tests.

Die Erkundungsbohrung und die Herstellung der Test-Erdwärmesonde erfolgten durch den o.g. Auftraggeber am 22.02.2025. Die dokumentierte Bohr- und die Ausbautiefe betrug 95 m.

Im Zeitraum vom 03.03. bis zum 07.03.2025 (beginnend 9 Tage nach Fertigstellung der Test-EWS) wurden die geothermischen Messungen an der Test-Erdwärmesonde durchgeführt.

Die momentane, mittlere Temperatur in der Erdwärmesonde vor dem GRT wurde bis zu einer Tiefe von 95 m mit 11,4 °C bestimmt. Ohne Berücksichtigung des nachgewiesenen saisonalen Einflusses bis ~16 m unter GOK beträgt die gemittelte ungestörte Temperatur des Untergrundes 11,7 °C (für die Bemessung der Erdwärmesondenanlage angesetzt Jahresmittelwert).

Der GRT führte zu einem plausiblen Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes von 2,23 W/(m·K) für die Gesamttiefe der Test-Erdwärmesonde. Unter Berücksichtigung der erbohrten geologischen Schichten (hier: überwiegend Feinsand und Feinkies) entspricht dies dem mittleren Erwartungswert der gemäß VDI-Richtlinie vorgegebenen Richtwerte der integrierten Wärmeleitfähigkeit für das nachgewiesene Bohrprofil. Signifikante grundwasserdynamische Einflüsse lassen sich aus dem Verlauf der GRT-Messung sowie aus den Temperaturmessungen nicht ableiten.

Die mittlere spezifische Wärmekapazität des Untergrundes ist in Anbetracht der angetroffenen Substrate (s.o.) mit 2,5 MJ/(m³·K) bewertet worden.

Der thermische Bohrlochwiderstand R_b wurde unter Berücksichtigung der Sonden-Ausbauparameter (hier: Durchmesser der Bohrung ca. 160 mm, Messung im Doppel-U-Rohr 32 x 3 mm, Verfüllung mit *Füllbinder EWM* u.a.) sowie unter Berücksichtigung des beim GRT verwendeten Wärmeträgerfluides (Wasser) und des eingestellten Volumenstroms (1,3 m³/h) mit $R_b = 0,088$ K/(W/m) ermittelt. Der gemessene thermische Bohrlochwiderstand ist repräsentativ für den Bohrlochausbau und die Qualität der Ringraumverfüllung/Sondeninstallation.

Im Ergebnis der Modellprognose (Simulation mit dem Programm *EED 4.3*) über einen Betrachtungszeitraum von insgesamt 25 Jahren wären unter Berücksichtigung der definierten Bemessungskriterien mit dem vorgeplanten Erdwärmesondenfeld (12 Erdwärmesonden mit einer einheitlichen Tiefe von 99 m, Sondenabstand 8,0 m) dem Untergrund jährlich **maximal ca. 79 MWh zu entziehen**. Dies entspricht **gebäudeseitig etwa 110 MWh/a bzw. 62 % Deckungsanteil** am prognostizierten Gesamt-Heizwärmebedarf. Die rechnerisch zugrunde gelegte **Entzugsleistung der Wärmepumpe beträgt ~28 kW**.

Ein Monitoring des Anlagenbetriebes mit regelmäßiger Auswertung und Beurteilung hinsichtlich des berücksichtigten Wärmeentzugs sowie der Anlageneffizienz wird empfohlen.



Dipl.-Ing. Björn Oldorf
(Bearbeiter)

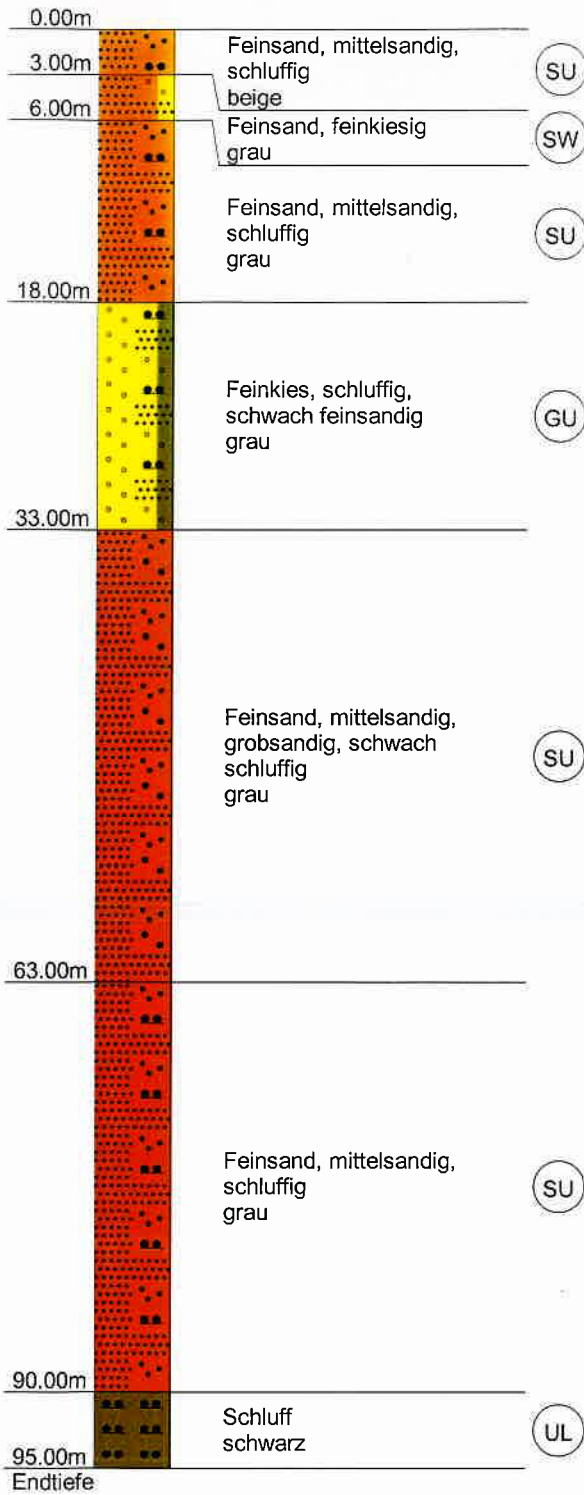


M.Sc. Mathias Dasse
(Co-Bearbeiter)

Literatur:

- Bernier M.: Ground-coupled heat pump system simulation. ASHRAE Transactions. 107, p.605-616, 2001
- Bernier M. und Shirazi A. S.: Solar Heat Injection Into boreholes: A preliminary analysis, 2nd Canadian Solar Buildings Conference, Calgary, June 10-14, 2007
- Carslaw H.S. und Jaeger J.C.: Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, Oxford University Press, 2nd Edition, 1947
- Chiasson, A. - Advances in Modelling of Ground-Source Heat Pump Systems. Dissertation Oklahoma State University, 1999
- Deng Z.: Modelling of standing column wells in ground source heat pumps, P.hD Thesis, Oklahoma State University, 2004
- Diao N. et al.: Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, Int. Journal of Thermal Sciences, 43, 1203-1211, 2004
- Eugster, W.J. und Laloui, L. - Workshop „Geothermische Response Tests“, Geothermische Vereinigung e.V. 49744 Geeste, 2002
- Gustafson, A.-G. - Thermal Response Test - Numerical simulations and analyses, Lulea University of Technology, 2006
- Gehlin S. - Thermal Response Test - In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock, Licentiate Thesis, Lulea 1998
- Hanschke, Th. & Freund, R. Geothermal Response Tests mit geregeltm Wärmeeintrag - erste Betriebserfahrungen mit der neuen GRT-Messeinheit. 9. Geothermische Fachtagung Karlsruhe, Oktober 2006
- Hanschke, Th.; Kühl, J.-U.; Oldorf, B. & Uebigau M.: Energetischer Doppelnutzen; Energiepfähle und thermoaktive erdberührte Bauteile, Deutsches Ingenieurblatt, Ausgabe 07-08, 2010
- Ingersoll L. R. et al.: Heat Conduction with Engineering, Geological and other applications, Madison, WI: The University of Wisconsin Press, 1954
- Kastura T. et al.: Heat transfer experiments in the ground with groundwater advection, Proceedings of 10th Energy Conservation Thermal Energy Storage Conference Ecstock'2006, New Jersey
- Kavanaugh S.P. et al.: Investigating Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties From Short Term Field Tests, ASHRAE, Final Report September 1999 – September 2000
- Kübert, M. et al: Thermal Response Tests und Temperaturtiefenprofile Erfahrungen aus Praxis und Forschung, Beitrag zum Geothermiekongress 2009
- Koelbel T.: Grundwassereinfluss auf Erdwärmesonden: Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2010
- Sass, I. und Lehr, C.: Improvements on the Thermal Response Test Evaluation, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, 2011

GRT Bohrung



Anlage 2 - EED-Berechnungsprotokoll

EED 4.3 - www.buildingphysics.com - license for info@hsw-rostock.de
 Eingabedatei: S:\Geothermie\Brandenburg\Cottbus\Dissenchener Schul-
 straße 1, GRT R&S\EED\BV Grundschule Dissenchen nach GRT.DAT
 Diese Ausgabedatei: BV GRUNDSCHULE DISSENCHEN NACH GRT.OUT Datum:
 25.03.2025 Uhrzeit: 16:28:34

DATEN KURZFASSUNG

Kosten	-
Anzahl Bohrungen	12
Tiefe der Erdwärmesonde	99 m
Erdwärmesondenlänge gesamt	1188 m

E I N G A B E D A T E N (P L A N U N G)

=====

UNTERGRUND

Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	2,23 W/(m·K)
Spez. Wärmekapazität des Erdreichs	2,5 MJ/(m ³ ·K)
Mittl. Temperatur d. Erdoberfläche	11,7 °C
Geothermischer Wärmefluss	0 W/m ²

BOHRUNG UND ERDWÄRMESONDE

Sondenanzordnung	48 ("12 : 5 x 8 L-configuration")
Tiefe der Erdwärmesonde	99 m
Abstand der Erdwärmesonden	8 m
Sondentyp	Doppel-U
Bohrlochdurchmesser	160 mm
U-Rohr, Außendurchmesser	32 mm
U-Rohr, Wandstärke	3 mm
U-Rohr, Wärmeleitfähigkeit	0,42 W/(m·K)
U-Rohr, Mittenabstand d. U-Schenkel	68 mm
Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung	2 W/(m·K)
Übergangswiderst. Rohr/Verfüllung	0 (m·K)/W

THERMISCHE WIDERSTÄNDE

Thermischer Bohrlochwiderstand wird berechnet
 Anzahl der Berechnungsstützpunkte 10
 Interner Wärmeübergang zw. auf- und abwärts führenden Rohren berücksichtigt

WÄRMETRÄGERMEDIUM

Wärmeleitfähigkeit	0,45 W/(m·K)
Spezifische Wärmekapazität	3770 J/(Kg·K)
Dichte	1052 Kg/m ³
Viskosität	0,0045 Kg/(m·s)
Gefrierpunkt	-16 °C
Umwälzmenge pro Bohrloch	0,2 l/s

GRUNDLAST

Jährlicher Warmwasserbedarf	0 MWh
Jahresheizarbeit	110 MWh
Jahreskühlarbeit	0 MWh
Jahresarbeitszahl (WW)	3
Jahresarbeitszahl Heizen	3,6
Jahresarbeitszahl Kühlen	20

Monatliches Bedarfsprofil [MWh]

Monat	Wärmebedarf	Kühlbedarf	Erdseite	
1	0,165	18,2	0	13,1
2	0,165	18,2	0	13,1
3	0,14	15,4	0	11,1
4	0,08	8,8	0,025	6,36
5	0	0	0,05	0
6	0	0	0,25	0
7	0	0	0,35	0
8	0	0	0,25	0
9	0,025	2,75	0,05	1,99
10	0,11	12,1	0,025	8,74
11	0,15	16,5	0	11,9
12	0,165	18,2	0	13,1
Gesamt	1	110	1	79,4

SPITZENLAST
Monatliche Spitzenlast [kW]

Monat	Spitzen-Heizlast	Dauer	Spitzen-Kühlleistung	Dauer [h]
1	38,5	22	0	0
2	38,5	22	0	0
3	38,5	11	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	38,5	11	0	0
12	38,5	22	0	0

Dauer der Simulation (Jahre)	25
Monat der Inbetriebnahme	9

SPITZENLAST HEIZEN: FLUID-MITTELTEMPERATUR (zum Monatsende) [°C]

Jahr	1	2	5	10	25
1	11,7	3,03	1,73	0,79	-0,45
2	11,7	2,85	1,61	0,68	-0,55
3	11,7	3,25	2,06	1,13	-0,089
4	11,7	7,7	6,54	5,63	4,42
5	11,7	10,6	9,44	8,54	7,33
6	11,7	10,8	9,69	8,79	7,59
7	11,7	10,9	9,83	8,94	7,75
8	11,7	11	9,92	9,04	7,85
9	10,8	10,1	9,11	8,24	7,06
10	7,81	7,13	6,14	5,28	4,1
11	3,95	3,29	2,32	1,47	0,3
12	3,26	2,63	1,68	0,84	-0,33

SPITZENLAST HEIZEN: JAHR 25

minimale Fluid-Mitteltemperatur -0,55 °C zum Ende 2

maximale Fluid-Mitteltemperatur 7,85 °C zum Ende 8

SPITZENLAST KÜHLEN: FLUID-MITTELTEMPERATUR (zum Monatsende) [°C]

Jahr	1	2	5	10	25
1	11,7	5,13	3,84	2,89	1,66
2	11,7	4,95	3,71	2,78	1,55
3	11,7	5,67	4,48	3,56	2,34
4	11,7	7,7	6,54	5,63	4,42
5	11,7	10,6	9,44	8,54	7,33
6	11,7	10,8	9,69	8,79	7,59
7	11,7	10,9	9,83	8,94	7,75
8	11,7	11	9,92	9,04	7,85
9	10,8	10,1	9,11	8,24	7,06
10	7,81	7,13	6,14	5,28	4,1
11	6,16	5,51	4,54	3,69	2,52
12	5,37	4,73	3,79	2,94	1,78

SPITZENLAST KÜHLEN: JAHR 25

minimale Fluid-Mitteltemperatur 1,55 °C zum Ende 2

maximale Fluid-Mitteltemperatur 7,85 °C zum Ende 8