



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.



Europäischer Sozialfonds

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt:

**Thermische Speichervorgänge im Umfeld von Erdwärmesonden
beim Heizen und Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen**

Kapitel C: Einfluss von Geologie und Hydrogeologie auf das geothermische Standortpotenzial von Erdwärmesondenanlagen

M. Sc. Geol. Axel Gerschel

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Wirtschaftsingenieurwesen

GERSCHEL, A. (2021): Einfluss von Geologie und Hydrogeologie auf das geothermische Standortpotenzial von Erdwärmesondenanlagen. – in: GERSCHEL, A.; HERLING, M.; SCHÄFER, T.; STÖCKMANN, L.; SUBRAMANI, P.; WALTER, T.; SCHÜTTE, T.; KRIMMLING, J. & MEINERT, J. (2021): Thermische Speichervorgänge im Umfeld von Erdwärmesonden beim Heizen und Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen. – Abschlussbericht, HSZG (Hrsg.), **2769**: 143-220; Zittau.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	146
Tabellenverzeichnis	149
Symbolverzeichnis	151
Abkürzungsverzeichnis	153
1 Motivation und Zielstellung	154
2 Geologische und hydrogeologische Einflussgrößen bei geothermischen Nutzungen.....	155
2.1 Grundlagen.....	155
2.1.1 Gesteinswärmeleitfähigkeit und -wärmekapazität.....	156
2.1.2 Natürliche Untergrundtemperatur	158
2.1.3 Grundwasserströmung	159
2.1.4 In-situ Bestimmung von Untergrundparametern	161
2.1.5 Auslegungswerkzeuge zur Anlagendimensionierung.....	163
2.2 Zusammenhang zwischen realisierbarer spezifischer Sondenentzugsleistung und Filtergeschwindigkeit	164
2.2.1 Abriss bisheriger Forschungsarbeiten	164
2.2.2 Modellbeschreibung	167
2.2.2.1 Energetischer Lösungsansatz	167
2.2.2.2 Dreidimensionaler Modellaufbau	167
2.2.2.3 Randbedingungen und Untergrundparametrierung.....	168
2.2.2.4 Erdwärmesondenmodell.....	169
2.2.3 Simulationsergebnisse und Diskussion	170
2.2.3.1 Regressions- und Sensitivitätsanalyse des Zusammenhangs von Filtergeschwindigkeit und spez. Sondenentzugsleistung	170
2.2.3.2 Kältefahnausbreitung unterschiedlicher geohydraulischer Szenarien.....	174
2.3 Simulative Abbildung von Grundwassereinfluss durch gesteigerte (effektive) Gesteinswärmeleitfähigkeiten.....	177
2.3.1 Abriss bisheriger Forschungsarbeiten	177
2.3.2 Modellbeschreibung	178
2.3.2.1 Energetik	178
2.3.2.2 Dreidimensionaler Modellaufbau	180
2.3.2.3 Randbedingungen und Untergrundparameter	181
2.3.2.4 Erdwärmesondenmodell.....	182
2.3.3 Simulationsergebnisse und Diskussion	182
2.3.3.1 Mittels TRTs bestimmte effektive Gesteinswärmeleitfähigkeiten.....	182
2.3.3.2 Einfluss grundwasserbedingter Konvektion und äquivalent gesteigerter Gesteinswärmeleitfähigkeiten auf den Anlagenbetrieb	183

3	Kleinräumige (hydro)geologisch-geothermische 3D-Modellierung am Standort Zittau.....	187
3.1	Regionalgeologischer Überblick	187
3.2	Datenbasis der Modellierung	190
3.2.1	<i>Recherche hydro-/geologischer Fachdaten für das gewählte Modellgebiet.....</i>	<i>190</i>
3.2.2	<i>Datenerhebung modellrelevanter Parameter an der Erdwärmesondenversuchsanlage der HSZG.....</i>	<i>194</i>
3.2.2.1	Kurzbeschreibung der Erdwärmesondenversuchsanlage.....	194
3.2.2.2	Messung und Interpretation des natürlichen Temperaturregimes im geologischen Untergrund	196
3.2.2.3	Messtechnische Präzisierung der Stoffeigenschaften des Wärmeträgerfluids	197
3.2.2.4	Ergebnisse durchgeführter Thermal Response Tests.....	199
3.2.2.5	Thermisch angeregte Temperaturprofile und bohrlochgeophysikalischer Messungen.....	201
3.3	Modellaufbau mittels Finite-Elemente-Software FEFLOW	202
3.3.1	<i>Geologisches Strukturmodell.....</i>	<i>202</i>
3.3.2	<i>Grundwasserströmungsmodell.....</i>	<i>206</i>
3.4	Modellkalibrierung	208
3.4.1	<i>Modellvorkalibrierung mittels tiefenaufgelöster Profilmessungen der natürlichen Untergrundtemperatur.....</i>	<i>208</i>
3.4.2	<i>Bohrloch- und Gebirgskalibrierung anhand von TRT-Messdaten</i>	<i>210</i>
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	214
	Literaturverzeichnis	216

Abbildungsverzeichnis

Abb. C-2.1	Schematische Darstellung der Ausprägung eines Kältetrichters um eine Erdwärmesonde im Heizbetrieb (Wärmeentzug) und resultierende Wärmetransportprozesse im geologischen Untergrund. ...	157
Abb. C-2.2	Schematische Darstellung des natürlichen Temperaturregimes im Tiefenbereich der oberflächennahen Geothermie (nach ETI 2009).	158
Abb. C-2.3	Erläuterung von geohydraulischen Gesetzmäßigkeiten (nach HÖLTING & COLDEWEY 2019) und Geschwindigkeitsbegriffen (nach DIN 4049-1:1954-03).	160
Abb. C-2.4	Thermal Response Test.	162
Abb. C-2.5	Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v_f und spezifischer Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ bzw. ihres grundwasserbedingten Steigerungspotenzials $\Delta\dot{q}_{EWS,sp}$	166
Abb. C-2.6	Dreidimensionaler Aufbau und Diskretisierung des FEFLOW-Modells inkl. Positionierung der implementierten Erdwärmesonde.....	168
Abb. C-2.7	Anhand numerischer Modellrechnungen ermittelter Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v_f und spezifischer Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ für eine ungestörte Untergrundtemperatur von 10 °C gegenübergestellt mit dem Kurvenverlauf aus SCHELENZ (2017).	171
Abb. C-2.8	Sensitivitätsanalyse der Einflussnahme verschiedener Parametern auf die spez. Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ bei Betrachtung unterschiedlicher Filtergeschwindigkeiten v_f	173
Abb. C-2.9	Exemplarische Darstellung der maximalen Kältefahnausbreitung am Beispiel von Szenario B-5 im 10. Simulationsjahr (Temperatur-Kolorierung mit durchgezogener Isotherme) sowie jährliche Entwicklung der ersten neun Betriebsjahre (gestrichelte Isothermen).	174
Abb. C-2.10	Szenario- und zeitabhängige Ausbreitung der Kältefahne (0,1 K-Isotherme) in GW-Fließrichtung.	175
Abb. C-2.11	Zusammenhang zwischen maximaler Kältefahnausbreitung (0,1 K-Isotherme) und Filter- bzw. Abstandsgeschwindigkeit im 10. Simulationsjahr.	176
Abb. C-2.12	Gesteinstypabhängiger Zusammenhang zwischen effektiver Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{eff} und Filtergeschwindigkeit v_f (nach HUBER 2013). ..	177
Abb. C-2.13	Thermische Sondenfeldbelastung in Form eines stündlich aufgelösten Lastprofils.	179
Abb. C-2.14	Monatliche Entzugsenergien, getrennt nach Heiz- und Kühlbetrieb. ..	179
Abb. C-2.15	Dreidimensionaler Aufbau und Diskretisierung des FEFLOW-Modells inkl. Positionierung des implementierten Erdwärmesondenfeldes.....	180

Abb. C-2.16	Szenarioabhängige Monatsmittel-Quellentemperaturen für die Betriebsphase Heizen.....	184
Abb. C-2.17	Szenarioabhängige Abweichungen der Monatsmittel-Quellentemperaturen im Vergleich zum Referenzmodell für die Betriebsphase Heizen.	184
Abb. C-2.18	Szenarioabhängige Monatsmittel-Quellentemperaturen für die Betriebsphase Kühlen.....	185
Abb. C-2.19	Szenarioabhängige Abweichungen der Monatsmittel-Quellentemperaturen im Vergleich zum Referenzmodell für die Betriebsphase Kühlen. ...	185
Abb. C-3.1	Regionalgeologische Übersichtskarte der Oberlausitzer Tertiärbecken (nach STEDING et al. 1991).....	187
Abb. C-3.2	Schematische Darstellung der Entwicklungsgeschichte des Zittauer Beckens (aus WAGENBRETH & STEINER 1982).....	188
Abb. C-3.3	Schematischer Schnitt durch das Zittauer Becken (nach HIRSCH et al. 1989 und VULPIUS 2015).	189
Abb. C-3.4	Eingangsdaten für das geologische Strukturmodell: Genutzte Bohrdaten und geologische Schnittverläufe in Relation zur Lage des gewählten Modellgebiets mit der Erdwärmesonden-Versuchsanlage der HSZG.	191
Abb. C-3.5	Positionierung der mit Temperatursensoren ausgestatteten Sondenbohrungen am Versuchsstand der HSZG.....	194
Abb. C- 3.6	Gebäudeseitige Hauptkomponenten der Versuchsanlage.	195
Abb. C-3.7	Natürliches Temperaturregime des geologischen Untergrundes für den Bereich der Erdwärmesondenversuchsanlage (GERSCHEL 2018). ...	196
Abb. C-3.8	Gemessene und nach DIN 12791-3:1983-06 korrigierte temperaturabhängige Dichte-Werte des in der Versuchsanlage genutzten Wärmeträgerfluids sowie zugeordnete Stoffwert-Kennlinie aus LibSecRef (KRETZSCHMER et al. 2018).....	198
Abb. C-3.9	Temperaturabhängige Stoffwert-Kennlinien der spezifischen Wärmekapazität, dynamischen Viskosität und Wärmeleitfähigkeit für ein 41,5 Gew.-%iges Wasser-Ethylenglykol-Gemisch, wie es in der Versuchsanlage genutzt wird (Datenbasis: LibSecRef, KRETZSCHMER et al. 2018).	199
Abb. C-3.10	Exemplarische Aufheizkurve für den TRT an der Testfeldsonde EWS 1 (17.-22.03.2020).	200
Abb. C-3.11	Teufenkorrigiertes geologisches Profil für den Nahbereich des Versuchsstandes, gegenübergestellt mit den tiefenaufgelösten Temperaturabklingprofilen und Bohrlochgeophysikmessungen.	204
Abb. C-3.12	Dreidimensionaler Aufbau und Diskretisierung des FEFLOW-Modells inkl. Positionierung des implementierten Versuchsstandes....	205

- Abb. C-3.13 Überlagerung der Hydroisohypsen für die Grundwasserstockwerke G1 sowie ZiC mit lokal resultierenden Fließrichtungen als Pfeildarstellung (Datenbasis: LfULG, vgl. Abschnitt 3.2.1). 206
- Abb. C-3.14 Natürliches Temperaturregime im Untergrund des Sondentestfeldes (Profilmessungen an unterschiedlichen Sonden) sowie Veranschaulichung von schichtabhängigen Schwankungen des geothermischen Gradienten ab 25 m Tiefe gegenübergestellt mit dem ungestörten Temperaturverlauf des vorkalibrierten FEFLOW-Modells. ... 209
- Abb. C-3.15 Gegenüberstellung der real gemessenen Aufheizkurven von Sondenvor- und -rücklauf mit den Simulationsergebnissen nach erfolgreicher Bohrlochkalibrierung für die ersten 150 min des am 23.09.2019 durchgeführten TRTs an EWS1 sowie Darstellung des gemessenen und für die Modellrechnung geglätteten Verlauf der aufgeprägten Sondenleistung. 211
- Abb. C-3.16 Gegenüberstellung der real gemessenen Aufheizkurven von Sondenvor- und -rücklauf mit den Simulationsergebnissen nach erfolgreicher Gebirgskalibrierung für den am 23.09.2019 durchgeführten TRT an EWS1 sowie Darstellung des gemessenen und für die Modellrechnung geglätteten Verlauf der aufgeprägten Sondenleistung. 212

Tabellenverzeichnis

Tab. C-2.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse einer exemplarischen Modellrechnung mit Variation der Untergrundparameter für eine mittelgroße Erdwärmesondenanlage.	156
Tab. C-2.2	Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogene spezifische Wärmekapazität für einige exemplarische Gesteinstypen (nach VDI 4640-1:2010-06).	157
Tab. C-2.3	Anhaltswerte für die Durchlässigkeit von Lockergesteinen (nach DIN 18130-1:1998-05).	160
Tab. C-2.4	Berechnete spez. Entzugsleistungen in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit und Gesteinswärmeleitfähigkeit nach Formel C.14.	165
Tab. C-2.5	Gesteinsspezifische Parametrierung der betrachteten Simulationsreihen.	168
Tab. C-2.6	Parametrierung des im FEFLOW-Modellkörper implementierten Erdwärmesondenmodells.	169
Tab. C-2.7	Übersicht der szenarioabhängigen hydraulischen Randbedingungen sowie Gegenüberstellung von Filtergeschwindigkeiten v_f und simulativ resultierenden spez. Entzugsleistungen $\dot{q}_{EWS,sp}$	170
Tab. C-2.8	Maximale Ausbreitungsstrecken der Kältefahnen (0,1 K-Isotherme) in GW-Fließrichtung verschiedener geohydraulischer Szenarien in Abhängigkeit des Simulationsjahres.	175
Tab. C-2.9	Empfehlungen für effektive Gesteinswärmeleitfähigkeiten von wasserführenden Sanden (nach HUBER et al. 2014).	178
Tab. C-2.10	Gebäudetechnische Spezifikation aus im Vorfeld erfolgter Gebäude- und Anlagensimulation mit TRNSYS.	178
Tab. C-2.11	Parametrierung der betrachteten Modellszenarien.	181
Tab. C-2.12	Parametrierung des im FEFLOW-Modellkörper implementierten Erdwärmesondenmodells.	182
Tab. C-2.13	TRT-Ergebnisübersicht für die geohydraulischen Szenarien A.1 und A.2.	183
Tab. C-3.1	Übersicht der für das geologische Strukturmodell ausgewählten Bohrungen.	192
Tab. C-3.2	Vereinfachtes Normalprofil der Grundwasserstockwerke im Zittauer Becken (nach LfULG).	193
Tab. C-3.3	Übersicht verwendeter GW-Messstellen und Stichtagsmessungen.	193
Tab. C-3.4	Übersicht erdseitiger Temperatursensorik der Versuchsanlage.	195
Tab. C-3.5	Ergebnisse der durchgeführten TRTs an den Testfeldsonden EWS 1 und EWS 2.	201
Tab. C-3.6	Lithostratigraphisches Normalprofil für das gewählte Modellgebiet.	203

- Tab. C-3.7 Parametrierung der im Modell implementierten Testfeldsonden. 212
- Tab. C-3.8 Parametrierung des geologischen Modells im Ergebnis des Kalibrierungsprozesses (Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätswerte wurden anhand der jeweiligen effektiven Porosität rechnerisch in einen Fluid- und einen Feststoffanteil aufgesplittet). ... 213

Symbolverzeichnis

Symbol	Parameter	Einheit
α	Temperaturleitfähigkeit (thermische Diffusivität), $\alpha = \lambda/c_v$	[m ² /s]
a	Rohr-Mittenabstand	[mm]
A	Durchströmte Fläche des zugehörigen Grundwasserleiters	[m ²]
b	Breite	[m]
c_p	Spezifische Wärmekapazität	[J/(kg·K)]
c_v	Spezifische volumetrische Wärmekapazität, $c_v = \rho \cdot c_p$	[J/(m ³ ·K)]
COP	Leistungszahl der Wärmepumpe (Coefficient Of Performance)	[-]
d	Durchmesser	[mm]
D	Distanz	[m]
e	Eulersche Zahl, $e \approx 2,7183$	[-]
E	Energie (thermische Entzugs-/Einspeisenergie)	[kWh]
γ	Euler-Mascheroni-Konstante, $\gamma \approx 0,5722$	[-]
G	Geothermischer Gradient	[K/m]
GWF	Grundwasserfluss nach PANTELEIT & REICHLING (2006)	[-]
h	Höhe	[m]
h_D	Druckhöhenunterschied	[m]
H	Erdwärmesondenlänge	[m]
i	Hydraulischer Gradient	[-]
JAZ	Jahresarbeitszahl	[-]
k	Steigung	[-]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
λ_{eff}	Effektive Untergrundwärmeleitfähigkeit über die Sondenlänge	[W/(m·K)]
l	Fließlänge	[m]
m	Achsenabschnitt	[-]
n	Anzahl	[-]
η_{Fluid}	Dynamische Viskosität des Sondenfluids	[10 ⁻³ kg/(m·s)]
n_{eff}	Nutzbare Gesteinsporosität	[-]
n_{EWS}	Sondenanzahl	[-]
π	Kreiszahl, $\pi \approx 3,1416$	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
\dot{q}	Wärmestromdichte	[J/(s·m ²)]
\dot{q}_{EWS}	Gesamtsondenentzugsleistung	[W]

Symbol	Parameter	Einheit
$\dot{q}_{EWS,sp}$	Spezifische Sondenentzugsleistung	[W/m]
\dot{q}_{Feld}	Erdwärmesondenfeld-Entzugsleistung	[W]
\dot{Q}	An die Erdwärmesonde angelegte thermische Leistung	[W]
\dot{Q}_{WP}	Wärmepumpenheizleistung	[W]
\dot{Q}_V	Wärmepumpenverdampferleistung	[W]
r_b	Bohrlochradius	[m]
R^2	Bestimmtheitsmaß	[-]
R_b	Thermischer Bohrlochwiderstand	[K/(W/m)]
s	Materialstärke	[mm]
t	Zeit	[s]
t_{Heiz}	Heizzeitraum	[s]
t_B	Betriebs- / Jahresvolllaststunden	[h/a]
T	Temperatur	[°C]
T_{in}	Sondenvorlauf-Temperatur	[°C]
T_{out}	Sondenrücklauf-Temperatur	[°C]
ΔT	Temperatur-Unterschied / -Spreizung	[K]
T_b	Über die Sondentiefe gemittelte ungestörte Untergrundtemperatur	[°C]
T_f	Fluidmitteltemperatur (arithmetischer Mittelwert Sondenvor- und -rücklauf)	[°C]
v_a	Abstandsgeschwindigkeit	[m/s]
v_f	Filtergeschwindigkeit	[m/s]
\dot{V}	Volumenstrom / Durchsatz	[m³/s]

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Wortlaut
DGM	Digitales Geländemodell
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DV	Direktverdampfer-Sonde
EWS	Erdwärmesonde
EED	Earth Energy Designer
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
HSZG	Hochschule Zittau / Görlitz
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Ma	Millionen Jahre vor heute
NN	Normalnull
PE	Polyethylen
PE-RC	Verstärktes Polyethylen (Resistance to Crack)
PE-Xa	Peroxidvernetztes Polyethylen
TRT	Thermal Response Test
UBG	Unterbegleiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WP	Wärmepumpe

1 Motivation und Zielstellung

Vor dem Hintergrund energiepolitischer Zielstellungen der deutschen Bundesregierung (BMWi 2015), stellen erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen bei der Gebäudetemperierung eine effiziente und zukunftsorientierte Alternative zu konventionellen Heiz- und Kühlwendungen dar. Der geologische Untergrund dient hierbei als Wärmequelle bzw. -senke. Dessen geothermische Erschließung kann mithilfe unterschiedlichster Wärmetauschersysteme erfolgen, wie z. B. Flächenkollektoren, Energiekörben oder thermisch aktivierten Pfahlgründungen (Energiepfähle). Häufigste Verwendung finden allerdings untiefe Erdwärmesonden aus Kunststoff (PE), welche in der Regel bis in Tiefen von ca. 100 m in den Untergrund eingebacht werden – in anderen Ländern, wie der Schweiz, sind aber auch deutlich tiefere Bohrungen üblich.

Erdwärmesondenanlagen sollten keinesfalls pauschal, d. h. unabhängig von der standortspezifischen Geologie, ausgelegt werden. Ansonsten besteht die Gefahr einer Unterdimensionierung, die neben einem Totalausfall auch mit irreversiblen Schäden am unterirdischen Wärmetauschersystem (Frostschäden) einhergehen kann. Der in diesem Zusammenhang ebenfalls mögliche Fall einer ungewollten Überdimensionierung hingegen würde mit unnötigen Investkosten zu Buche schlagen und die Anlage somit weniger konkurrenzfähig gegenüber alternativen Heiz- und Kühlkonzepten machen. Eine fachgerechte Auslegung von Erdwärmesondenanlagen ist somit obligatorisch und erfordert eine fundierte Auseinandersetzung mit den jeweiligen geologischen und hydrogeologischen Standortverhältnissen. Hierbei sind insbesondere thermische und hydraulische Gesteinseigenschaften von Interesse, da sie den konduktiven und ggf. auch konvektiven Wärmetransport im Untergrund und somit das geothermische Standortpotenzial direkt beeinflussen. Vorliegender Beitrag soll sich daher im ersten Themenfeld mit geothermisch relevanten Gesteinseigenschaften auseinandersetzen. Der Fokus wird hierbei insbesondere auf hydrogeologische und somit konvektiv wirksame Einflussgrößen gelegt, da diese heutzutage bei der Anlagendimensionierung aufgrund des unverhältnismäßigen Zeitaufwands bzw. mangels geeigneter Auslegungstools meist noch vernachlässigt werden. Hierbei gilt es unter anderem, mittels numerischer Modellrechnungen den Einfluss grundwasserbedingter Konvektion auf das geothermische Standortpotenzial für fiktive Szenarien zu verdeutlichen und die Möglichkeit analytischer Zusammenhänge zu prüfen.

Eine weitere Zielstellung der vorliegenden Arbeit besteht im Aufbau eines detaillierten thermo-hydraulischen 3D-Modells des geologischen Untergrundes im Nahbereich der Erdwärmesondenversuchsanlage der HSZG am Standort Zittau. Hierbei gilt es zunächst, die sehr komplexe Wechsellagerung vor allem tertiärer Sedimentschichten im Zittauer Becken mittels lithologisch-stratigraphischer sowie geophysikalischer Bohrungsdaten strukturell zu erfassen, um diese anschließend in ein räumliches Finite-Elemente-Modell überführen zu können. Die Integration eines realitätsnahen Strömungsmodells soll darüber hinaus sicherstellen, dass neben dem konduktiven Wärmetransport ebenso grundwasserbedingte Konvektion im Untergrund um die Versuchsanlage simulativ abgebildet werden kann. Für zukünftige Forschungsarbeiten am Erdwärmesondenversuchsstand wird somit die Möglichkeit geschaffen, Auswirkungen experimenteller Untersuchungen auf das Untergrundtemperaturregime vorab modelltechnisch zu prüfen bzw. zeitaufwendige

Versuchsdurchführungen grundlegend virtuell durchzuführen. Des Weiteren können erforderliche thermische Regenerationszeiten zwischen einzelnen Versuchsreihen im Zuge von Simulationsrechnungen präzise ermittelt werden. Die umfangreiche Messensorik im Untergrund der Erdwärmesondenversuchsanlage gestattet es darüber hinaus auch, in umgekehrter Weise Modellergebnisse mit realen Messdaten zu validieren. Somit sind auch im Rahmen von Folgeforschungsprojekten die Voraussetzungen geschaffen, direkte Zusammenhänge zwischen Grundwasserströmung und dem geothermischen Standortpotenzial am Fallbeispiel Zittau modelltechnisch zu untersuchen und mit Realdaten zu unterlegen.

2 Geologische und hydrogeologische Einflussgrößen bei geothermischen Nutzungen

2.1 Grundlagen

Im Hinblick auf die Auslegung von Erdwärmesondenanlagen definiert sich das geothermische Standortpotenzial durch die realisierbare Wärmeleistung und -energie, die dem geologischen Untergrund in Abhängigkeit von Betriebszeitraum, Bohrtiefe, Sondenabstand und -anzahl nachhaltig, d. h. unter Berücksichtigung vorgegebener Temperaturgrenzen, entzogen (Heizfall) bzw. zugeführt (Kühlfall) werden kann. Abhängig ist dies vom natürlichen Temperaturregime des thermisch erschlossenen Gesteins sowie vom Wärmetransportvermögen des selbigen. Im geologischen Untergrund vollzieht sich Wärmetransport einerseits durch Konduktion (Wärmeleitung), bei vorhandener Grundwasserströmung allerdings auch mittels Konvektion (STOBER & BUCHER 2020). Vor diesem Hintergrund bestimmen folgende wesentliche Untergrundparameter die geothermischen Standorteigenschaften:

- **Gesteinswärmeleitfähigkeit** und untergeordnet auch -wärmekapazität
- **natürliche Untergrundtemperatur**
- ggf. **Grundwasserströmung** bzw. hydraulische Gesteinseigenschaften

Anhand ausgewählter Modellrechnungen für ein fiktives Fallbeispiel einer mittelgroßen Erdwärmesondenanlage, welche einzig dem Heizzweck dient, zeigt Tab. C-2.1 exemplarisch das Ausmaß der Einflussnahme dieser zentralen Parameter bei der Anlagendimensionierung. Daraus geht hervor, dass eine Erhöhung der mittleren ungestörten Untergrundtemperatur um 2 K (Modell A) im konkreten Fall bereits zu einer Ersparnis von 110 Bohrmetern (~ 17,5 %) führt. Bei einem angesetzten Bohrmeterpreis von 60 €/m ergibt sich im Vergleich mit der Referenzanlage somit ein Kostenunterschied von 6.600 €. Eine höhere Gesteinswärmeleitfähigkeit von 3,7 W/(m·K), ein Wert wie er typisch für den Standort Freiberg/Sachsen ist (Modell B), reduziert die Gesamtbohrmeter um 25,4 % und die Kosten um 9.600 €. Unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung (Modell C), wie sie hinsichtlich der Randbedingungen in Tab. C-2.1 beschrieben ist, verringert sich die erforderliche Gesamtbohrmeteranzahl sogar um 36,5 % bei einer Kosteneinsparung von 13.800 €.

Tab. C-2.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse einer exemplarischen Modellrechnung mit Variation der Untergrundparameter für eine mittelgroße Erdwärmesondenanlage.

	Parameter	Einheit	Parametervariation von Modellanlagen			
			Referenz	A	B	C
Rand- bedingungen ⁽¹⁾	Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{Gestein} ^(2,3)	[W/(m·K)]	2,4	2,4	3,7	2,4
	Ungest. Untergrundtemperatur T_b ⁽³⁾	[°C]	10	12	10	10
	Berücksichtigung Grundwassereinfluss		nein	nein	nein	ja ⁴
Simulations- ergebnisse	Genutzte Simulations-Software		EED	EED	EED	FEFLOW
	Bohrungsanzahl n_{EWS}	[-]	6	5	5	4
	Bohrteufe H	[m]	105	104	94	100
	Gesamtbohrmeter	[m]	630	520	470	400

⁽¹⁾ Fixe Randbedingungen: Heizbedarf: 60 MWh/a, $\dot{Q}_{WP} = 30$ kW, Sondenabstand: 10 m, $JAZ = 4,5$, Sondentyp: PE-RC 32 x 3,0 mm Doppel-U, Auslegungszeitraum: 50 Jahre, $\lambda_{\text{verfüllung}} = 2,0$ W/(m·K) (thermisch verbessert)

⁽²⁾ bezogen auf die Beispiel-Standorte Dresden (2,4 W/(m·K)) und Freiberg (3,7 W/(m·K))

⁽³⁾ als Mittelwert über die gesamte Bohrtiefe

⁽⁴⁾ angesetzte Aquifer-Eigenschaften: Gesamtmächtigkeit über die Bohrtiefe: 30 m, $k_f = 2 \cdot 10^{-4}$ m/s, $n_{eff} = 0,2$, $i = 0,01$

2.1.1 Gesteinswärmeleitfähigkeit und -wärmekapazität

Eine maßgebende Größe für den konduktiven Wärmetransport, d. h. den Energietransport zwischen benachbarten Molekülen eines Materials, ist durch die Wärmeleitfähigkeit gegeben (STEPHAN et al. 2019). Ohne vorhandene Grundwasserströmung stellt Konduktion den primären Wärmetransportmechanismus im geologischen Untergrund dar. Wird dem Untergrundgestein mittels einer Erdwärmesonde für Gebäudeheizzwecke Wärme entzogen, so sinkt die Temperatur im näheren Umfeld der Sonde trichterförmig ab („Kältetrichter“). Aufgrund des Temperaturunterschiedes zum weitläufig umgebenden Untergrundgestein erfolgt mittels Konduktion ein Temperatúrausgleich (Abb. C-2.1). Die Geschwindigkeit dieser thermischen Regeneration und somit auch die über die Erdwärmesonde nachhaltig entziehbare Wärmeleistung und -energie steigt mit zunehmender Gesteinswärmeleitfähigkeit.

Neben der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins stellt auch dessen Wärmekapazität einen geothermisch relevanten Parameter dar, welcher insbesondere bei thermischen Speichernutzungen des Untergrundes als wichtiger Einflussfaktor zum Tragen kommt. Beide Gesteinseigenschaften unterliegen abhängig von der Mineralzusammensetzung, d. h. abhängig vom Gesteinstyp, einer gewissen Schwankungsbreite. Insbesondere bei Lockergesteinen hat darüber hinaus auch die Wassersättigung des Porenraums einen großen Einfluss auf Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (Tab. C-2.2).

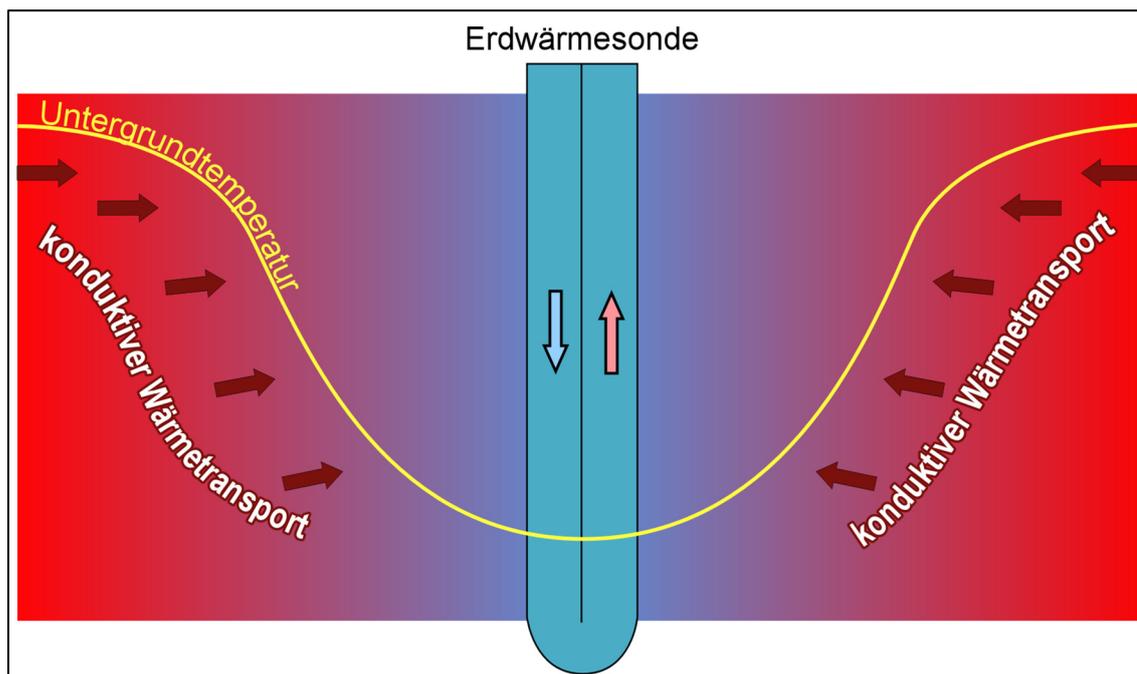


Abb. C-2.1 Schematische Darstellung der Ausprägung eines Kältetrichters um eine Erdwärmesonde im Heizbetrieb (Wärmeentzug) und resultierende Wärmetransportprozesse im geologischen Untergrund.

Tab. C-2.2 Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogene spezifische Wärmekapazität für einige exemplarische Gesteinstypen (nach VDI 4640-1:2010-06).

Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]		Volumenbezogene spez. Wärmekapazität c_v [MJ/m ³ ·K]
	Spannweite	Empfohlener Rechenwert	
Ton / Schluff, trocken	0,4 - 1,0	0,5	1,5 - 1,6
Ton / Schluff, wassergesättigt	1,1 - 3,1	1,8	2,0 - 2,8
Sand, trocken	0,3 - 0,9	0,4	1,3 - 1,6
Sand, feucht	1,0 - 1,9	1,4	1,6 - 2,2
Sand, wassergesättigt	2,0 - 3,0	2,4	2,2 - 2,8
Kies / Steine, trocken	0,4 - 0,9	0,4	1,3 - 1,6
Kies / Steine, wassergesättigt	1,6 - 2,5	1,8	2,2 - 2,6
Kalkstein	2,0 - 3,9	2,7	2,1 - 2,4
Basalt	1,3 - 2,3	1,7	2,3 - 2,6
Granit	2,1 - 4,1	3,2	2,1 - 3,0
Quarzit	5,0 - 6,0	5,5	2,1
Gneis	1,9 - 4,0	2,9	1,8 - 2,4

2.1.2 Natürliche Untergrundtemperatur

Das natürliche bzw. ungestörte Temperaturregime im geologischen Untergrund gliedert sich, wie in Abb. C-2.2 dargestellt, teufenabhängig in drei Zonen.

Die jahreszeitlich geprägte **saisonale Temperaturzone** reicht in der Regel bis in Tiefen von 10 bis 20 m. Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche zeichnen sich innerhalb dieser Tiefenzone zeit- und phasenverzögert ab. Mit zunehmender Teufe verringert sich dabei die Schwankungsbreite (THOLEN & WALKER-HERTKORN 2008).

Als **neutrale Temperaturzone** wird der Tiefenbereich unterhalb der saisonalen Zone bezeichnet, ab dem sich Temperaturschwankungen auf maximal 0,1 K begrenzen (KOENIGSDORFF 2011).

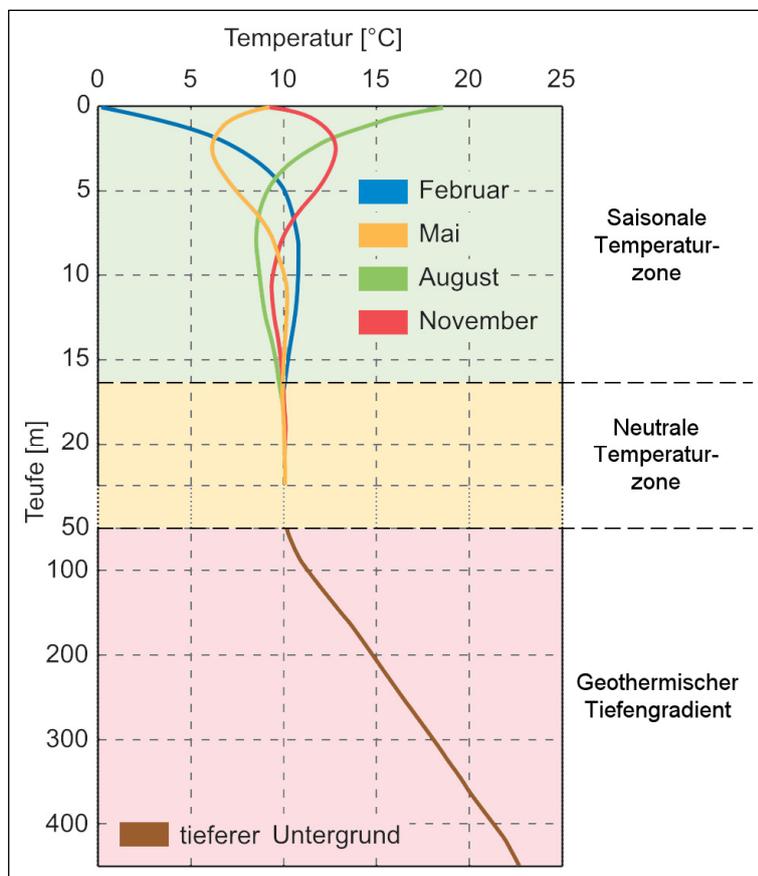


Abb. C-2.2
Schematische Darstellung des natürlichen Temperaturregimes im Tiefenbereich der oberflächennahen Geothermie (nach ETI 2009).

Der **geothermische Tiefengradient G** setzt gewöhnlich ab einer Teufe von etwa 50 m ein. Er bewegt sich im mitteleuropäischen Raum durchschnittlich zwischen 2,8 und 3,0 K/100 m (STOBER & BUCHER 2020). Allerdings kann er standortabhängig auch deutlich vom genannten Mittelwert abweichen, wenn es beispielsweise aufgrund von regionalgeologisch bedingten Wärmeanomalien zu einer lokal erhöhten oder verringerten terrestrischen Wärmestromdichte \dot{q} kommt. Über Klüfte aus größeren Tiefen aufsteigende Thermalwässer vermögen ebenfalls eine (scheinbar) gesteigerte Wärmestromdichte herbeizuführen. Darüber hinaus kann der Wärmestrom aus dem Erdinneren durch eine herabge-

setzte oder erhöhte Wärmeleitfähigkeit von Gesteinsschichten in seiner vertikalen Ausbreitung gestaut oder befördert werden. Nachstehende Gleichung C.1 nach MARTIN et al. (2000) verdeutlicht die ausgeführten Zusammenhänge.

$$G = \frac{\dot{q}_{geo}}{\lambda_{Gestein}} \quad (C.1)$$

Die mittlere ungestörte Untergrundtemperatur im üblichen Tiefenbereich untiefer Erdwärmesondenbohrungen wird somit von den lokal vorherrschenden terrestrischen Wärmestromeigenschaften, der Gesteinsbeschaffenheit sowie von den regionalklimatischen Gegebenheiten bestimmt.

Im Hinblick auf die Auslegung und den Betrieb von Erdwärmesondenanlagen erweisen sich für den Heizbetrieb, wie das Modellbeispiel in Tab. C-2.1 verdeutlicht, höhere Untergrundtemperaturen als günstig. Bei Kühlanwendungen hingegen ist ein niedriges natürliches Temperaturniveau des thermisch zu erschließenden Gesteinskörpers von Vorteil.

2.1.3 Grundwasserströmung

Bei ausreichender Durchströmung stellt Konvektion innerhalb von Aquiferen den dominanten Wärmetransportmechanismus dar. Da Konvektion, im Vergleich zur Konduktion, Wärme deutlich effizienter transportiert, erfährt der geologische Untergrund im Bereich grundwasserleitender Gesteinsschichten eine deutlich schnellere Regeneration nach thermischen Belastungen durch Erdwärmesonden. Die Intensität des konvektiven Wärmetransports, die einer Erdwärmesondenanlage durch den Einfluss von Grundwasser zuteilwerden kann, richtet sich neben der Anzahl und Mächtigkeit der durchteuften Grundwasserstockwerke ebenso nach der jeweiligen Stärke der Grundwasserströmung. Diese lässt sich im Porengrundwasserleiter durch die sogenannte **Filtergeschwindigkeit** v_f quantifizieren. Hierzu sei zunächst auf HENRY DARCY (franz. Wasserbauingenieur, 1803-1858) hingewiesen, der bei der Durchströmung von Filtern eine Proportionalität zwischen Volumenstrom \dot{V} , durchströmter Fläche A und hydraulischem Gradienten i (Quotient aus Druckhöhenunterschied h_D und Fließlänge l) feststellte (C.2 / Abb. C-2.3 A).

$$\dot{V} \sim A \cdot \frac{h_D}{l} = A \cdot i \quad (C.2)$$

Als filter- bzw. gesteinspezifischem Proportionalitätsfaktor wurde von DARCY der Durchlässigkeitsbeiwert k_f eingeführt und damit das DARCY-Gesetz (C.3) formuliert (Abb. C-2.3 A).

$$\dot{V} = k_f \cdot A \cdot i \quad (C.3)$$

Die daran anlehrende Filtergeschwindigkeit v_f (auch DARCY-Geschwindigkeit) eines Grundwasserkörpers definiert sich als Quotient aus dem Volumenstrom \dot{V} und der Fläche A des zugehörigen Grundwasserquerschnitts (C.4). Es handelt sich somit, auch wenn es ihre Einheit vermuten lässt, um keine Geschwindigkeit im eigentlichen Sinne (DIN 4049-1:1954-03; Abb. C-2.3 B).

$$v_f = \frac{\dot{V}}{A} \left[\frac{m^3}{m^2 \cdot s} = \frac{m}{s} \right] \quad (C.4)$$

Anhand des DARCY-Gesetzes kann die Filtergeschwindigkeit v_f auch gemäß Formel C.5 beschrieben werden.

$$v_f = k_f \cdot \frac{h_D}{l} = k_f \cdot i \quad (C.5)$$

Im Grundwasserleiter ist die Filtergeschwindigkeit v_f demnach im Wesentlichen vom gesteinspezifischen Durchlässigkeitsbeiwert k_f und dem vorherrschenden hydraulischen Gradienten i abhängig. Die große Variationsbreite der Durchlässigkeit von Lockergesteinen verdeutlicht Tab. C-2.3.

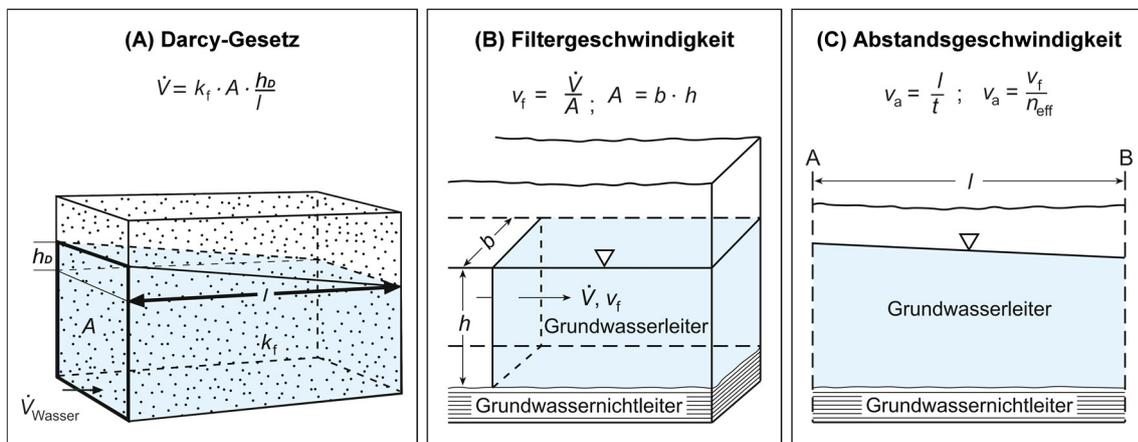


Abb. C-2.3 Erläuterung von geohydraulischen Gesetzmäßigkeiten (nach HÖLTING & COLDEWEY 2019) und Geschwindigkeitsbegriffen (nach DIN 4049-1:1954-03). **A:** Darcy-Gesetz. **B:** Filtergeschwindigkeit. **C:** Abstandsgeschwindigkeit.

Tab. C-2.3 Anhaltswerte für die Durchlässigkeit von Lockergesteinen (nach DIN 18130-1:1998-05).

Lockergesteine	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	Bewertung der Durchlässigkeit
Reiner Kies	$k_f > 10^{-2}$	sehr stark durchlässig
Sandiger Kies, Mittel-, Grobsand	$10^{-4} < k_f \leq 10^{-2}$	stark durchlässig
Feinsand, schluffiger Sand	$10^{-6} < k_f \leq 10^{-4}$	durchlässig
Schluff, toniger Schluff	$10^{-8} < k_f \leq 10^{-6}$	schwach durchlässig
Ton, schluffiger Ton	$k_f < 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig

Nicht unerwähnt sollte in diesem Zusammenhang der Begriff der **Abstandsgeschwindigkeit** v_a bleiben. Sie ist der Quotient aus dem Abstand bzw. der Fließlänge l und der Fließzeit t , lässt sich entsprechend C.6 aber auch als Quotient von Filtergeschwindigkeit v_f und nutzbarer Gesteinsporosität n_{eff} beschreiben (Abb. C-2.3 C).

$$v_a = \frac{l}{t} = \frac{v_f}{n_{eff}} \quad (\text{C.6})$$

Vor dem Hintergrund der erläuterten Termini wird deutlich, dass die umgangssprachliche „Grundwasserfließgeschwindigkeit“ keineswegs mit der Filter- oder Abstandsgeschwindigkeit gleichzusetzen ist. Stattdessen stellt sie in der Geohydraulik lediglich eine übergeordnete Bezeichnung für unterschiedliche genau definierte Geschwindigkeitsbegriffe dar.

2.1.4 In-situ Bestimmung von Untergrundparametern

Wie bereits näher im Abschnitt 2.1.1 ausgeführt, ist bei der Auslegung von Erdwärmesondenanlagen die Kenntnis der standortspezifischen Gesteinswärmeleitfähigkeit von essentieller Bedeutung. Lässt sich die lokale Lithologie beispielsweise anhand von geologischen Nachschlagewerken oder der Dokumentation benachbarter Bohrungen ermitteln, so kann bei der Dimensionierung kleiner Erdwärmesondenanlagen (Heizleistung ≤ 30 kW) anhand der zu erwartenden geologischen Schichtenabfolge auf gesteinstypische Wärmeleitfähigkeitswerte aus der Literatur zurückgegriffen werden, wie sie beispielsweise in der VDI 4640-1:2010-06 zu finden sind (Tab. C-2.2).

Die Dimensionierung größerer Erdwärmesondenanlagen mit Wärmepumpenheizleistungen über 30 kW erfordert in der Regel hingegen eine präzisere Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des geothermisch zu erschließenden Gesteinskörpers. Ein etabliertes Verfahren zur in-situ-Bestimmung dieses wichtigen Ausgangsparameters stellt der Thermal Response Test (TRT) oder Geothermal Response Test dar.

Im Zuge eines TRTs wird gewöhnlich ein mobiles Testgerät (Abb. C-2.4) hydraulisch mit einer fertig installierten Erdwärmesonde verbunden (Pilotbohrung bzw. Test-Sonde, später meist Teil der Anlage). Anschließend wird über einen Zeitraum von etwa 72 Stunden eine konstante Heizleistung an die Sonde bzw. das im Sondeninneren zirkulierende Wärmeträgerfluid angelegt. Während der gesamten Testdauer werden Durchsatz sowie Eintritts- und Austrittstemperaturen kontinuierlich sensorisch erfasst und mittels Datenloggern aufgezeichnet. Die „Temperaturantwort“ der durchteuften Gesteinsschichten führt zu einer charakteristischen Aufheizkurve (Abb. C-3.10). Eine Auswertung der gewonnenen Messdaten ermöglicht unter anderem die Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} des geologischen Untergrundes über die gesamte Sondentiefe. Die gebräuchlichste, auf der KELVIN'schen Linienquellentheorie basierende, Auswertungsmethode wird in der VDI 4640-5:2020-07 umfassend erläutert. Hiernach lässt sich gemäß Linienquellen-Modell die mittlere Fluidtemperatur T_f (Mittel aus Sonderein- und -austrittstemperatur) durch nachstehende Näherungslösung C.7 als Funktion der Zeit beschreiben.

$$T_f(t) = \frac{\dot{Q}}{H \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eff}} \cdot \ln(t) + \frac{\dot{Q}}{H} \cdot \left[\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eff}} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right] + T_b \quad (\text{C.7})$$

Die Zusammenfassung der zeitlich konstanten Größen zu k und m vereinfacht Gleichung C.7 wie folgt:

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (\text{C.8})$$

Demnach ist die Mitteltemperatur des Sondenfluids eine lineare Funktion des natürlichen Logarithmus der Zeit $\ln(t)$ mit der Steigung k und dem Achsenabschnitt m . Eine Darstellung der mittels TRT aufgezeichneten Fluidmitteltemperaturen über den Logarithmus der Zeit ermöglicht somit die Bestimmung von k und m durch einfache lineare Regression. Die effektive Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{eff} (Mittelwert über die Bohrtiefe) errechnet sich dann gemäß Formel C.9.

$$k = \frac{\dot{Q}}{H \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eff}} \Rightarrow \lambda_{eff} = \frac{\dot{Q}}{H \cdot 4 \cdot \pi \cdot k} \quad (C.9)$$

Durch Umformen der Gleichung C.10 zu C.11 lässt sich überdies der effektive thermische Bohrlochwiderstand R_b ermitteln. Dieser ist ein Maß für die Güte der thermischen Anbindung der Sonde an das Gebirge und damit ein Qualitätsmerkmal der Bohrlochhinterfüllung.

$$m = \frac{\dot{Q}}{H} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eff}} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_b \quad (C.10)$$

$$R_b = \frac{H}{\dot{Q}} \cdot (m - T_b) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{eff}} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) \quad (C.11)$$

Vor der Durchführung von Thermal Response Tests erfolgt häufig eine Temperaturprofilmessung an der jeweiligen Pilotsonde, um so die ungestörte Untergrundtemperatur tiefenaufgelöst zu erfassen. Alternativ kann allerdings zu diesem Zweck auch das TRT-Gerät zunächst ohne Zuschaltung einer Heizleistung mit stark turbulenterem Volumenstrom betrieben werden. Nach drei bis fünf Umwälzungen stellt sich meist eine stabile Mischtemperatur des Sondenfluids ein, die im Mittel der ungestörten Untergrundtemperatur über die Bohrtiefe entspricht. Tiefenaufgelöste Temperaturentscheidungen sind bei dieser Methode folglich nicht möglich.

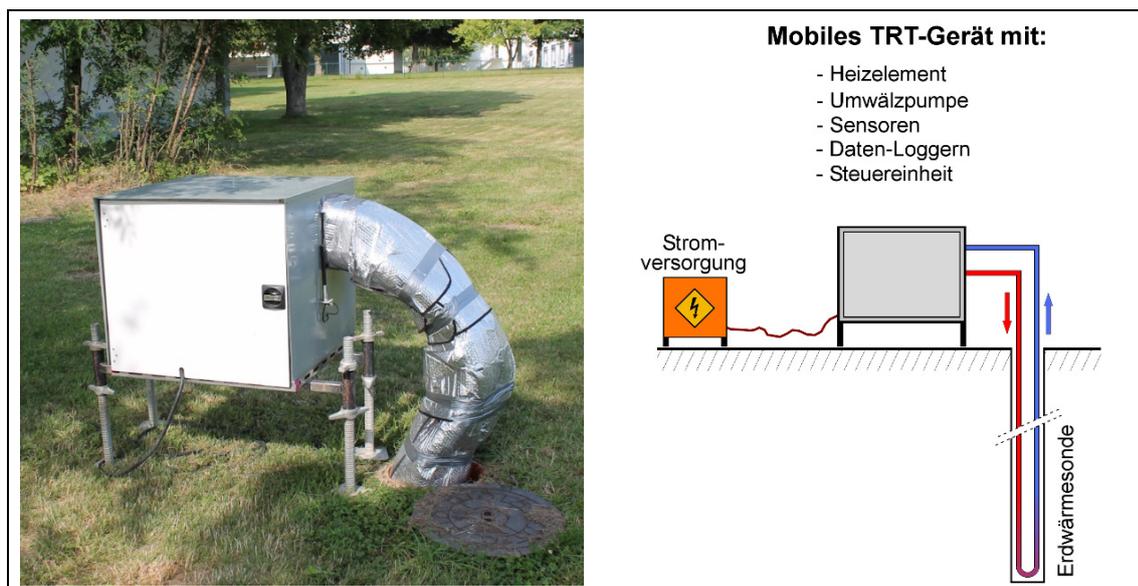


Abb. C-2.4 Thermal Response Test. **Links:** Mobiles TRT-Gerät im Einsatz. **Rechts:** Aufbauschema des Testgerätes (nach GERSCHEL 2015).

2.1.5 Auslegungswerkzeuge zur Anlagendimensionierung

Die Auslegung kleiner Erdwärmesondenanlagen mit einer Wärmepumpenheizleistung \dot{Q}_{WP} von maximal 30 kW erfolgt in vielen Fällen händisch nach den Vorgaben der VDI 4640-2:2019-06 mittels spezifischer Entzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$. Diese ist abhängig von den Jahresvolllaststunden (Wärmepumpe), der angestrebten Sondenanzahl n_{EWS} und der lokalen Gesteinswärmeleitfähigkeit. Die erforderliche Bohrtiefe bzw. Sondenlänge H lässt sich bei diesem Verfahren nach Gleichung C.12 berechnen.

$$H = \frac{\dot{Q}_v}{n_{EWS} \cdot \dot{q}_{EWS,sp}} \quad (\text{C.12})$$

Dabei ist die Wärmepumpenverdampferleistung \dot{Q}_v wie folgt definiert:

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_{WP} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (\text{C.13})$$

Für größere Anlagen ist zwingend eine softwaregestützte Dimensionierung erforderlich. Hierbei nutzt der Planer in der Regel analytische oder seminumerische Simulationsprogramme. Als marktübliche Vertreter sind hier beispielsweise der Earth Energy Designer (EED) von der Firma BLOCON (Schweden) oder EWS von der Huber Energietechnik AG (Schweiz) zu nennen (GERSCHEL 2012). Mithilfe derartiger Programme werden auf Basis des anlagenspezifischen Heiz- und Kühlbedarfs die thermischen Sondenbelastungen sowie die im betrachteten Betriebszeitraum zu erwartenden Sondenfluidtemperaturen ermittelt. Die hohe Berechnungsgeschwindigkeit analytischer bzw. seminumerischer Auslegungstools ermöglicht es dem Planer, in kürzester Zeit das Sondenfelddesign mit Blick auf die vorhandenen Platzverhältnisse hinsichtlich Sondenanzahl, -anordnung, -abstand und -tiefe in einem iterativen Prozess so anzupassen, dass unter Einhaltung geltender Temperaturgrenzwerte eine optimale und somit kostengünstige Gesamtbohrmeteranzahl erreicht wird.

Auch wenn wesentliche Untergrundparameter wie die standortspezifische Gesteinswärmeleitfähigkeit und -wärmekapazität sowie die ungestörte Untergrundtemperatur heute bei gängigen Auslegungsprogrammen für Erdwärmesondenanlagen mit in die Berechnungen einfließen, so stellt die vollständige Berücksichtigung von Grundwasserströmung mangels geeigneter analytischer Ansätze für diesen Softwaretyp noch ein Problem dar (GERSCHEL 2017).

Über die Flexibilität, ebenso den Einfluss grundwasserbedingter Konvektion vollumfänglich simulativ abbilden zu können, verfügen bisher nur komplexe numerische Softwarelösungen, wie z. B. das Finite-Element-Programm FEFLOW von DHI-WASY (Deutschland). Aufgrund des mit Kosten verbundenen zeitlichen Aufwands bei der Modellerstellung und im Hinblick auf die vergleichsweise sehr langen Rechenzeiten, kommen derartige vollnumerische Simulationsprogramme bei der Auslegung von Erdwärmesondenanlagen in der Regel nur zum Einsatz, wenn konvektionsbedingt mit erheblichen Bohrmetereinsparungen zu rechnen ist oder seitens der Genehmigungsbehörde eine thermohydraulische Modellierung vorgeschrieben wird.

2.2 Zusammenhang zwischen realisierbarer spezifischer Sondenentzugsleistung und Filtergeschwindigkeit

2.2.1 Abriss bisheriger Forschungsarbeiten

Erdwärmesondenfelder unter Einbezug der standortspezifischen Grundwasserverhältnisse dimensionieren zu können, birgt, im Hinblick auf die in den meisten Fällen mögliche Reduktion erforderlicher Bohrmeter, ein nicht zu vernachlässigendes Einsparpotenzial seitens der Baukosten (Abschnitt 2.1 / Tab. C-2.1; WANG et al. 2013). Um beispielsweise gegenüber primärenergetisch ineffektiveren, jedoch in der Anschaffung kostengünstigeren Systemen wie Luftwärmepumpen konkurrenzfähiger zu werden bzw. Amortisationszeiten zu verkürzen, sollte allein schon aus energiepolitischen Gründen angestrebt werden, das aufgezeigte grundwasserbedingte geothermische Potenzial effektiver auszunutzen.

Wie bereits im Abschnitt 2.1.5 herausgestellt, ist die vollumfängliche Berücksichtigung von Grundwassereinfluss beim Auslegungsprozess von Erdwärmesondenanlagen bisher nur im Rahmen zeitaufwendiger numerischer Modellierungen möglich. Speziell bei kleinen Anlagen (Wärmepumpenheizleistung ≤ 30 kW) stehen jedoch die Aufwendungen für derartige Simulationsrechnungen meist in keinem wirtschaftlich rentablen Verhältnis zu den Baukosten. Um bei der Dimensionierung der zahlenmäßig überwiegenden Kleinanlagen zukünftig dennoch die aufgezeigten Einsparpotenziale ausschöpfen zu können, bedarf es neuer Lösungsansätze. Die Untersuchung analytischer Zusammenhänge hinsichtlich geohydraulischer Größen kann in diesem Zusammenhang einen Beitrag dazu leisten, modelltechnische Vereinfachungen zu schaffen, die zumindest für kleine Erdwärmesondenanlagen Gültigkeit besitzen und eine zeit- und kostengünstige Auslegung unter Berücksichtigung grundwasserbedingter Konvektion ermöglichen. In diesem Zusammenhang erscheinen Korrelationsuntersuchungen betreffend Filtergeschwindigkeit v_f und spezifischer Erdwärmesondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ (Abschnitt 2.1.5) naheliegend.

Einen ersten Ansatz zur Abschätzung der spezifischen Entzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ in Abhängigkeit von Gesteinswärmeleitfähigkeit $\lambda_{Gestein}$, Jahresvolllaststunden t_B und Grundwasserfluss GWF stellt hierbei die nachstehende Gleichung C.14 von PANTELEIT & REICHLING (2006) verändert nach SCHELENZ (2017) dar.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{EWS,sp} = & \left(-0,85 + \frac{0,1}{300} \cdot (t_B - 1.800) + 0,23 \cdot GWF \right) \cdot \lambda_{Gestein}^2 \\ & + \left(13,6 - \frac{0,6}{300} \cdot (t_B - 1.800) + 0,85 \cdot GWF \right) \cdot \lambda_{Gestein} \\ & + \left(18,8 - \frac{1,25}{300} \cdot (t_B - 1.800) + 4,55 \cdot GWF \right) \end{aligned} \quad (C.14)$$

$$\text{wobei } GWF = 1 - e^{-k_f \cdot i}$$

Bei der von PANTELEIT & REICHLING (2006) eingeführten Größe GWF handelt es sich um einen dimensionslosen Wert zwischen 0 und 1. Als untere Grenze für einen konvektiv

wirksamen Grundwasserfluss definieren die Autoren $GWF = 0$ und setzen dies der Filtergeschwindigkeit $v_f = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ gleich. Die obere Gültigkeitsgrenze der Gleichung ist durch $GWF = 1$ respektive $v_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ festgelegt. Tab. C-2.4 zeigt für ein Fallbeispiel mit 1.800 Jahresvolllaststunden, dass laut PANTELEIT & REICHLING (2006) allein durch Grundwasserströmung eine maximale Steigerung der spezifischen Sondenentzugsleistung zwischen 16,8 und 19,8 % erzielbar ist. Abgesehen von einigen Plausibilitätsproblemen der Gleichung bei Verwendung im Mittelfeld befindlicher Filtergeschwindigkeiten, ist zu vermuten, dass die Autoren die grundwasserbedingten Auswirkungen auf die spezifische Sondenentzugsleistung bei einem GWF -Wert von 1 deutlich unterschätzen. Gestützt wird diese These beispielsweise durch die Feldmessungen von WANG et al. (2009). Hier konnte gezeigt werden, dass bereits eine moderate Grundwasserumströmung der untersuchten Erdwärmesonden auf 10,6 % ihrer Länge, im Vergleich zum Szenario ohne Grundwassereinfluss, zu einer Erhöhung der Gesamtsondenentzugsleistung \dot{q}_{EWS} von 12,9 % führt. Daraus ergibt sich rechnerisch eine Steigerung der spezifischen Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ im Tiefenbereich des Grundwasserleiters von etwa 122 %. Dies liegt deutlich über dem aus PANTELEIT & REICHLING (2006) ableitbaren Steigerungspotenzial (Tab. C-2.4).

Tab. C-2.4 Berechnete spez. Entzugsleistungen in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit und Gesteinswärmeleitfähigkeit nach Formel C.14.

Gesteinswärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Gestein}} \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	Spez. Entzugsleistung ⁽¹⁾ $\dot{q}_{EWS,sp} \text{ [W/m]}$ in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit v_f		Auf GW-Strömung zurückzuführender Anteil der spez. Entzugsleistung	
	$GWF = 0$ ⁽²⁾ $v_f = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$	$GWF = 1$ ⁽³⁾ $v_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	$\Delta\dot{q}_{EWS,sp}$ [W/m]	$\Delta\dot{q}_{EWS,sp}$ [%]
	0,5	25,4	30,4	5,0
1,0	31,6	37,2	5,6	17,8
1,5	37,3	43,6	6,3	17,0
2,0	42,6	49,8	7,2	16,8
2,5	47,5	55,6	8,1	17,1
3,0	52,0	61,1	9,2	17,7
3,5	56,0	66,3	10,3	18,5
4,0	59,6	71,2	11,6	19,5

⁽¹⁾ bei $t_B = 1.800$ Jahresvolllaststunden

⁽²⁾ $GWF = 0$ ist definiert als $k_f = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ und $i = 5 \cdot 10^{-4}$, dies entspricht $v_f = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

⁽³⁾ $GWF = 1$ ist definiert als $k_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ und $i = 2 \cdot 10^{-3}$, dies entspricht $v_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

Bekräftigt wird das von WANG et al. (2009) messtechnisch erfasste grundwasserbedingte Steigerungspotenzial durch die numerischen Modellrechnungen von SCHELENZ (2017). Der darin formulierte Zusammenhang C.15 besitzt gemäß der Autorin Gültigkeit für Filtergeschwindigkeiten zwischen $1,16 \cdot 10^{-8}$ und $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ sowie Gesteinswärmeleitfähigkeiten von 2 bis 3 W/(m·K).

$$\dot{q}_{EWS,sp} = 70,83 + \frac{-51,05}{\left(1 + \left(\frac{v_f}{0,049}\right)^{1,04}\right)} \quad (C.15)$$

Wie Abb. C-2.5 verdeutlicht, beziffert SCHELENZ (2017) das grundwasserbedingte Steigerungspotenzial der spezifischen Sondenentzugsleistung sogar auf Werte bis zu 230 %. Die vielversprechenden Aussagen der Dissertation gaben Anlass, den zugrundeliegenden numerischen Modellansatz durch Qualifizierung der verwendeten Randbedingungen und Parametrierung in vorliegender Arbeit weiterzuentwickeln.

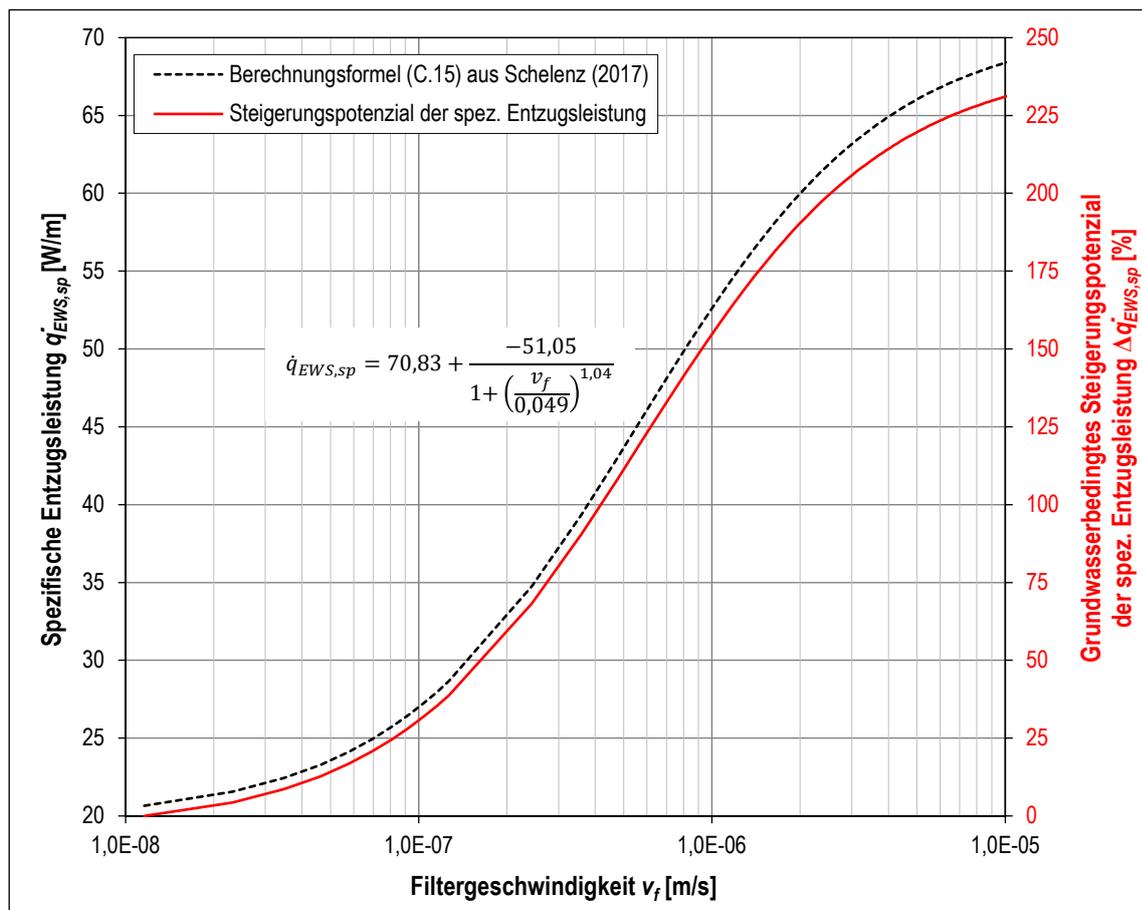


Abb. C-2.5 Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v_f und spezifischer Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ bzw. ihres grundwasserbedingten Steigerungspotenzials $\Delta \dot{q}_{EWS,sp}$.

2.2.2 Modellbeschreibung

2.2.2.1 Energetischer Lösungsansatz

Bei der Untersuchung des Abhängigkeitsverhaltens von Filtergeschwindigkeit v_f und spezifischer Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ fand die Finite-Elemente-Software FEFLOW (Version 7.3) von DHI-WASY Anwendung. Die Umsetzung erfolgte auf Basis des energetischen Lösungsansatzes aus SCHELENZ (2017). Hierbei wird eine Erdwärmesonde, die auf ihrer vollen Länge einem definierten Grundwassereinfluss ausgesetzt ist, pro Jahr über eine sieben Monate währende Heizperiode konstant mit einer Sondereintrittstemperatur $T_{in} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ durchströmt. Aus der resultierenden Temperaturspreizung zwischen Sonden- vorlauf T_{in} und -rücklauf T_{out} errechnet sich zum Zeitpunkt t_i die Sondenentzugsleistung \dot{q}_{EWS,t_i} gemäß Gleichung C.16.

$$\dot{q}_{EWS,t_i} = \dot{V}_{t_i} \cdot \rho_{Fluid} \cdot c_{p,Fluid} \cdot (T_{out,t_i} - T_{in,t_i}) \quad (\text{C.16})$$

Dabei ergibt sich die dem Untergrund mittels Erdwärmesonde über 10 Jahre entzogene thermische Energie $E_{Entzug,10a}$ durch Aufsummierung sämtlicher Produkte aus Sondenleistung \dot{q}_{EWS,t_i} und zugehörigem Zeitintervall (C.17) über alle n programminternen Rechenschritte in FEFLOW, die zur Simulation des zehnjährigen Betriebszeitraums (davon insgesamt 70 Monate Heizbetrieb) erforderlich sind.

$$E_{Entzug,10a} = \sum_1^n \dot{q}_{EWS,t_i} \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (\text{C.17})$$

Daraus ist die durchschnittliche Sondenleistung \dot{q}_{EWS} anhand des bekannten Heizzeitraums t_{Heiz} (= 70 Monate) bestimmbar (C.18).

$$\dot{q}_{EWS} = \frac{E_{Entzug,10a}}{t_{Heiz}} \quad (\text{C.18})$$

Abhängig von der Sondenlänge H ergibt sich anschließend die über den Zeitraum t_{Heiz} gemittelte spezifische Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ durch Gleichung C.19.

$$\dot{q}_{EWS,sp} = \frac{\dot{q}_{EWS}}{H} \quad (\text{C.19})$$

2.2.2.2 Dreidimensionaler Modellaufbau

Das zur Realisierung des dargelegten Lösungsansatzes gewählte Modellgebiet umfasst ein Areal von 400 x 100 m bei einer 150 m messenden Vertikalerstreckung (Abb. C-2.6). Die implementierte 100 m lange Erdwärmesonde setzt 1 m unter Modelloberkante an und befindet sich jeweils in einer Entfernung von 50 m zur Nord-, Süd- und Westgrenze des Modells. Insgesamt verfügt das Layer-basierte Modell über 492.228 Elemente (dreiseitige Prismen) und 255.884 Rechenknoten. Im Sondennahbereich sowie in Gebieten einer zu erwartenden Kältefahnenausbreitung erfolgte aus rechentechnischen Gründen eine entsprechend feinere Diskretisierung.

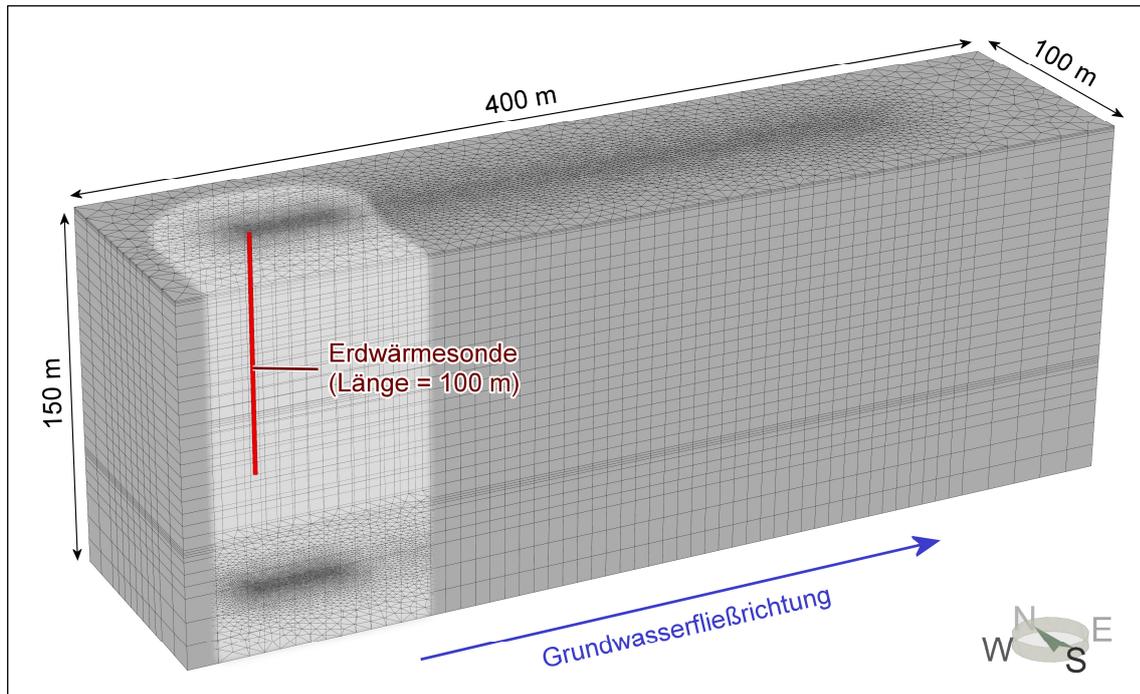


Abb. C-2.6 Dreidimensionaler Aufbau und Diskretisierung des FEFLOW-Modells inkl. Positionierung der implementierten Erdwärmesonde.

2.2.2.3 Randbedingungen und Untergrundparametrierung

Die Modellbetrachtungen erfolgten in separaten Simulationsreihen A, B und C für drei typische Lockergesteinstypen mit grundwasserleitenden Eigenschaften. Die in Tab. C-2.5 zusammengefasste gesteinspezifische Parametrierung erfolgte zur besseren Vergleichbarkeit Großteils in Anlehnung an SCHELENZ (2017). Bei der Festlegung effektiver Gesteinsporositäten kam nachstehende Formel C.20 von MAROTZ (1968) zum Einsatz.

$$n_{eff} = |0,462 + 0,045 \cdot \ln(k_f)| \quad (C.20)$$

Anhand der gesteinspezifischen effektiven Porosität war darüber hinaus die für FEFLOW-Modelle erforderliche rechnerische Aufspaltung der Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätswerte in einen Fluid- und Feststoffanteil umsetzbar.

Tab. C-2.5 Gesteinspezifische Parametrierung der betrachteten Simulationsreihen.

Simulationsreihe	Lithologie	Kürzel nach DIN 4023:2006-02	Effektive Porosität n_{eff} [-]	Wärme- leitfähigkeit $\lambda_{Gestein}$ [W/(m·K)]	Vol. Wärme- kapazität c_v [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	
						horizontal	vertikal
A	Sand, kiesig	S,g	0,15	2,0	2,2	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$
B	Mittelsand	mS	0,14	2,4	2,5	$7,2 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$
C	Sand, schluffig	S,u	0,06	3,0	2,8	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$

Als ungestörte Untergrundtemperatur wurde für das gesamte Modell ein Wert von 10 °C festgelegt. Dieser Wert fand auch bei der Temperaturrandbedingung 1. Art (Dirichlet-Randbedingung) Verwendung, welche an der Modellober- und -unterkante sowie am Westrand des Modells lokalisiert ist.

Zur Realisierung unterschiedlicher Strömungsszenarien erfolgte mithilfe entsprechender hydraulischer Randbedingungen am Modellwest- und -ostrand eine Variation des hydraulischen Gradienten gemäß Tab. C-2.7. Die in Kombination mit den gesteinspezifischen k_f -Werten (Horizontalwerte, Tab. C-2.5) resultierenden Filtergeschwindigkeiten sind ebenfalls Tab. C-2.7 zu entnehmen.

2.2.2.4 Erdwärmesondenmodell

Die Sondenimplementierung erfolgte im FEFLOW-Modell durch eine sogenannte Erdwärmesondenrandbedingung. Hinsichtlich des hierbei zugrundeliegenden Modelltyps wurde der quasi-stationäre, analytische Ansatz von ESKILSON & CLAESSON (1988) genutzt (vgl. DIERSCH 2014). Die Parametrierung des eingebundenen Erdwärmesondenmodells erfolgte in Anlehnung an die VDI 4640-2:2019-06 und ist in nachstehender Tab. C-2.6 aufgeschlüsselt. Die Materialparameter des Sondenfluids entsprechen gemäß Stoffdatenbank LibSecRef (KRETZSCHMAR et al. 2018) einem 25 Vol.-% Wasser-Ethylenglykol-Gemisch bei einer Temperatur von +1,5 °C (entspricht Fluidmitteltemperatur bei $T_{in} = 0$ °C und geschätzter Spreizung $\Delta T = T_{out} - T_{in} = 3$ K).

Tab. C-2.6 Parametrierung des im FEFLOW-Modellkörper implementierten Erdwärmesondenmodells.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Maßstabsgerechter Querschnitt
Bohrlochdurchmesser	$d_{Bohrloch}$	150	mm	
Rohrdurchmesser	d_{Rohr}	32	mm	
Rohrwandstärke	s_{Wand}	3,0	mm	
Rohr-Mittenabstand waagrecht	a_{hor}	53,03	mm	
Rohr-Mittenabstand diagonal	a_{diag}	75,00	mm	
WLF Sondenmaterial	λ_{EWS}	0,42	W/(m·K)	
WLF Bohrlochhinterfüllung	$\lambda_{Verf\u00fcllung}$	0,8	W/(m·K)	
WLF Sondenfluid	λ_{Fluid}	0,458	W/(m·K)	
Vol. Wärmekapazität Sondenfluid	$c_{v,Fluid}$	3,872	MJ/(m³·K)	
Dyn. Viskosität Sondenfluid	η_{Fluid}	$3,721 \cdot 10^{-3}$	kg/(m·s)	
Dichte Sondenfluid	ρ_{Fluid}	1.039,98	kg/m³	
Sondendurchsatz	\dot{V}	1,30	m³/h	
Sondentyp	Doppel-U			
EWS Berechnungsmodell	quasi-stationär, analytisch (ESKILSON & CLAESSON 1988; DIERSCH 2014)			

2.2.3 Simulationsergebnisse und Diskussion

2.2.3.1 Regressions- und Sensitivitätsanalyse des Zusammenhangs von Filtergeschwindigkeit und spez. Sondenentzugsleistung

Im Zuge der durchgeführten numerischen Modellrechnungen konnten in drei Simulationsreihen insgesamt 22 geohydraulische Szenarien betrachtet werden. Die im Ergebnis aus den jeweiligen Filtergeschwindigkeiten v_f resultierenden spezifischen Entzugsleistungen $\dot{q}_{EWS,sp}$ sind in Tab. C-2.7 aufgelistet.

Tab. C-2.7 Übersicht der szenarioabhängigen hydraulischen Randbedingungen sowie Gegenüberstellung von Filtergeschwindigkeiten v_f und simulativ resultierenden spez. Entzugsleistungen $\dot{q}_{EWS,sp}$.

Simulationsreihe	Szenario	Hydraulischer Gradient i [-]	Abstandsgeschwindigkeit v_a [m/s]	Filtergeschwindigkeit v_f [m/s]	Spez. Entzugsleistung resultierend aus num. Modellrechnungen $\dot{q}_{EWS,sp}$ [W/m]
A (Sand, kiesig)	A-1	2,10E-06	1,40E-08	2,10E-09	19,49
	A-2	2,10E-05	1,40E-07	2,10E-08	20,68
	A-3	2,10E-04	1,40E-06	2,10E-07	29,04
	A-4	2,10E-03	1,40E-05	2,10E-06	47,40
	A-5	2,10E-02	1,40E-04	2,10E-05	56,24
B (Mittelsand)	B-1	2,10E-06	1,08E-08	1,51E-09	21,75
	B-2	2,10E-05	1,08E-07	1,51E-08	22,52
	B-3	8,04E-05	4,13E-07	5,79E-08	24,72
	B-4	2,10E-04	1,08E-06	1,51E-07	28,55
	B-5	6,84E-04	3,52E-06	4,92E-07	36,50
	B-6	1,16E-03	5,97E-06	8,35E-07	40,73
	B-7	1,63E-03	8,38E-06	1,17E-06	43,42
	B-8	2,10E-03	1,08E-05	1,51E-06	45,35
	B-9	6,84E-03	3,52E-05	4,92E-06	52,38
	B-10	1,16E-02	5,97E-05	8,35E-06	54,31
	B-11	1,63E-02	8,38E-05	1,17E-05	55,20
	B-12	2,10E-02	1,08E-04	1,51E-05	55,72
C (Sand, schluffig)	C-1	2,10E-06	3,50E-10	2,10E-11	24,59
	C-2	2,10E-05	3,50E-09	2,10E-10	24,60
	C-3	2,10E-04	3,50E-08	2,10E-09	24,69
	C-4	2,10E-03	3,50E-07	2,10E-08	25,58
	C-5	2,10E-02	3,50E-06	2,10E-07	32,21

Die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse in Abb. C-2.7 zeigt für Filtergeschwindigkeiten $v_f > 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ einen hochsignifikanten Zusammenhang zur spezifischen Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$. Das Streuungsverhalten von Messwerten unterschiedlicher Gesteinstypen bei ähnlichen Filtergeschwindigkeiten lässt außerdem Rückschlüsse zum jeweils dominierenden Wärmetransportmechanismus zu. So zeugt die ausgeprägter zutage tretende Messwertvarianz bei Filtergeschwindigkeiten unter $3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ von Konduktion als dominantem Wärmetransportmechanismus. Ursächlich für die Streuung der Messwerte sind hier Unterschiede der jeweiligen gesteinspezifischen Wärmeleitfähigkeit. Mit zunehmender Grundwasserströmung setzt sich nach einer gewissen Übergangszone ab einer Filtergeschwindigkeit von etwa $2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ Konvektion als vorherrschender Wärmetransportmechanismus durch. Bei Filtergeschwindigkeiten über $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ist die Konvektionsdominanz schließlich derart stark ausgeprägt, dass die Gesteinswärmeleitfähigkeit als konduktiv wirksamer Parameter keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die realisierbare spezifische Sondenentzugsleistung hat, sodass diese gewissermaßen einzig von der Filtergeschwindigkeit (und Grundwassertemperatur) abhängt.

Anhand der Simulationsergebnisse lässt sich mittels Regressionsanalyse nachstehende Gleichung C.21 zur Berechnung der resultierenden spezifischen Sondenentzugsleistung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9887$ für Filtergeschwindigkeiten zwischen $1,0 \cdot 10^{-8}$ und $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ sowie einer ungestörten Untergrundtemperatur von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ableiten. Der entsprechende Kurvenverlauf ist in Abb. C-2.7 dargestellt.

$$\dot{q}_{EWS,sp} = \frac{0,4888 \cdot v_f^3 + 179,4 \cdot v_f^2 + 0,1529 \cdot v_f + 4,491 \cdot 10^{-8}}{v_f^2 + 0,002704 \cdot v_f + 1,981 \cdot 10^{-9}} \quad (\text{C.21})$$

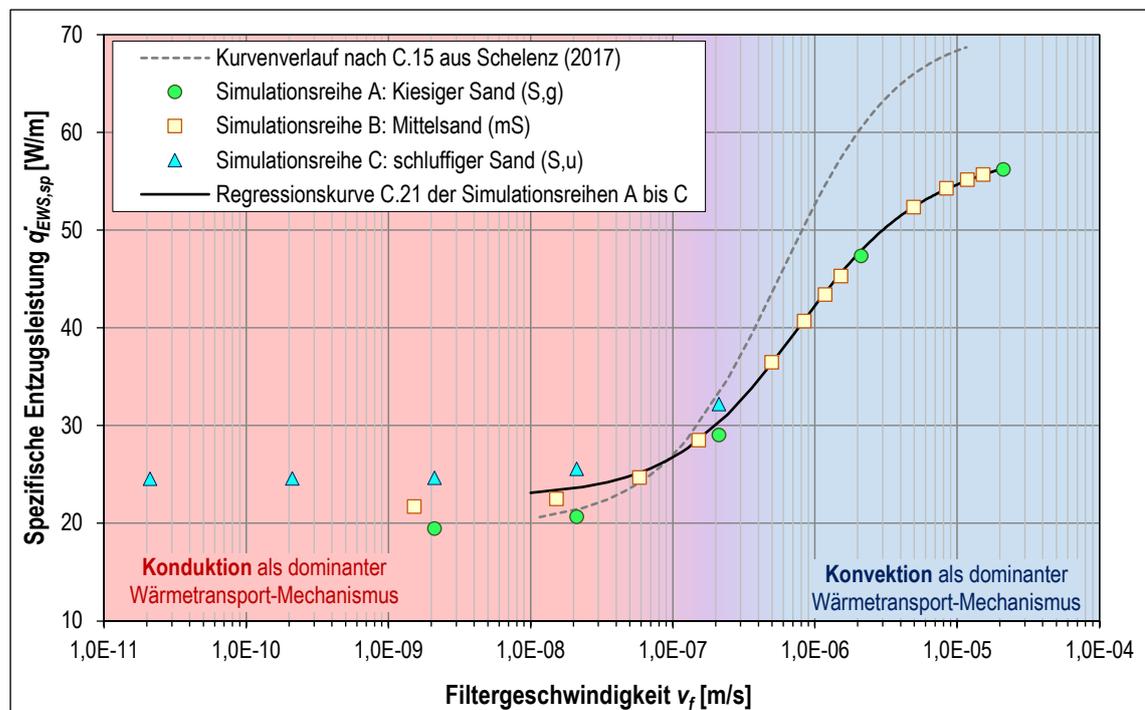


Abb. C-2.7 Anhand numerischer Modellrechnungen ermittelter Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v_f und spezifischer Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ für eine ungestörte Untergrundtemperatur von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenübergestellt mit dem Kurvenverlauf aus SCHELENZ (2017).

In Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit weist der in Abb. C-2.7 zu Vergleichszwecken ebenfalls visualisierte Kurvenverlauf nach Gleichung C.15 aus SCHELENZ (2017) gegenüber vorliegenden Simulationsergebnissen Abweichungen der resultierenden spezifischen Entzugsleistung von bis zu 27,5 % auf. Aufgrund des von SCHELENZ (2017) übernommenen Energetikansatzes (Abschnitt 2.2.2.1) sowie der Verwendung nahezu identischer Materialparameter und Randbedingungen für den geologischen Untergrund ist diese Diskrepanz im Wesentlichen auf Unterschiede der Sondenmodellparametrierung zurückzuführen. Mittels Sensitivitätsanalyse wurden diesbezüglich der Sondendurchsatz \dot{V} , der Rohr-Mittlenabstand a_{hor} bzw. a_{diag} und die Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochhinterfüllung als maßgebende Größen identifiziert (Tab. C-2.6). Wie Abb. C-2.8 verdeutlicht, führen gesteigerte Werte dieser Parameter einerseits grundlegend zu einer höheren spezifischen Sondenentzugsleistung, andererseits verstärkt sich deren Einflussnahme auf die spezifische Sondenentzugsleistung überdies auch deutlich mit zunehmender Filtergeschwindigkeit.

Für vorliegende Modellbetrachtungen wurde der Sondendurchsatz \dot{V} mit $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$ entsprechend praxisnaher Auslegungskriterien im knapp turbulenten Bereich festgelegt, um damit einen wirtschaftlichen Energieverbrauch der Umwälzpumpe zu gewährleisten. Dem gegenüber setzt SCHELENZ (2017) mit $\dot{V} = 2,25 \text{ m}^3/\text{h}$ für ihre Simulationsrechnungen einen deutlich höheren Wert an. Die Szenarien in Abb. C-2.8 zeigen, dass dies zum Großteil bereits ursächlich für die festgestellte Diskrepanz sein kann. Darüber hinaus unterschätzt die Autorin die gesteigerte Einflussnahme des Sondendurchsatzes bei grundwasserbedingter Konvektion im Zuge der eigenen Sensitivitätsanalyse, da diese nur für ein geohydraulisches Strömungsszenario mit sehr niedriger Filtergeschwindigkeit ($v_f = 1,16 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$) erfolgte.

Dennoch gibt dieser Sachverhalt Anlass, übliche Auslegungskriterien hinsichtlich des Sondendurchsatzes bei Anwesenheit starker Grundwasserströmung im Rahmen künftiger Forschungsarbeiten zu überdenken. In Abhängigkeit der mittels Erdwärmesonde erschlossenen Aquifermächtigkeit und der vorherrschenden Filtergeschwindigkeit erscheint es bei bestimmten Standortsituationen durchaus plausibel, bewusst den mit einem erhöhten Sondendurchsatz einhergehenden Mehrenergieverbrauch der Umwälzpumpe in Kauf zu nehmen, um dennoch netto-energetisch von der hierdurch gesteigerten Sondenentzugsleistung zu profitieren.

Selbstverständlich sollte bei weiterführenden Forschungsarbeiten zum Abhängigkeitsverhalten der spezifischen Sondenentzugsleistung in Grundwasserleitern auch die ungestörte Untergrund- bzw. Grundwassertemperatur als wichtiger Einflussfaktor verstärkt in die Betrachtungen einbezogen werden. Der in Abb. C-2.8 exemplarisch für nur ein geohydraulisches Szenario dargestellte Zusammenhang verdeutlicht den gewichtigen Einfluss dieses Parameters. Demnach führt eine Erhöhung der ungestörten Untergrund- bzw. Grundwassertemperatur um 4 K zu einer um 50 % gesteigerten spezifischen Entzugsleistung. Somit finden die diesbezüglichen Modellrechnungen von SCHELENZ (2017) Bestätigung.

Um perspektivisch eine Vergleichbarkeit mit den grundwasserunabhängigen spezifischen Entzugsleistungen der VDI 4640-2:2019-06 herstellen zu können, erfordert die weiterführende Auseinandersetzung mit der Thematik eine Überarbeitung des zugrundeliegenden Energetikansatzes (Abschnitt 2.2.2.1) sowie eine Erweiterung der Modellbetrachtung auf

bis zu fünf Erdwärmesonden, die sich ggf. gegenseitig thermisch beeinflussen. Insbesondere bei geringen Filtergeschwindigkeiten, im Übergangsbereich zum konduktionsdominierten Wärmetransport (Abb. C-2.7), ist außerdem stets die Einbeziehung der Gesteinswärmeleitfähigkeit in die Modellbetrachtungen angebracht.

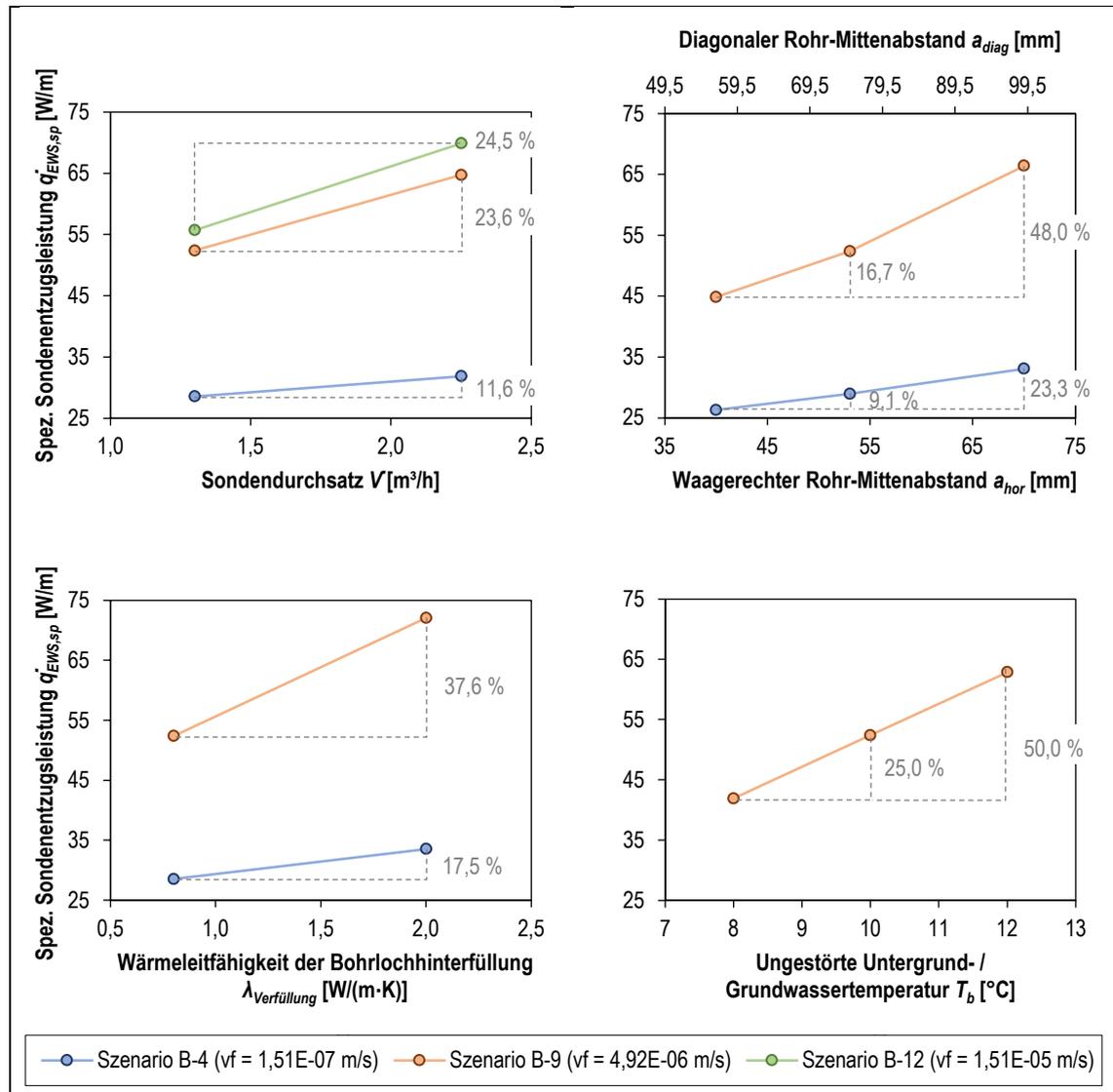


Abb. C-2.8 Sensitivitätsanalyse der Einflussnahme verschiedener Parameter auf die spez. Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ bei Betrachtung unterschiedlicher Filtergeschwindigkeiten v_f . **Oben links:** Einfluss des Sondendurchsatzes \dot{V} . **Oben rechts:** Einfluss des Rohr-Mittenabstands a . **Unten links:** Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Bohrlöcherfüllung $\lambda_{verfüllung}$. **Unten rechts:** Einfluss der ungestörten Untergrundtemperatur T_b .

2.2.3.2 Kältefahnenausbreitung unterschiedlicher geohydraulischer Szenarien

Neben den vorgestellten Ergebnissen zur spezifischen Sondenentzugsleistung ermöglicht die Auswertung der durchgeführten Modellrechnungen ebenso Korrelationsuntersuchungen bezüglich des zeit- und szenarioabhängigen Ausbreitungsverhaltens wärmeentzugsbedingter Kältefahnen im Grundwasserleiter. Intension dahinter ist die zunehmende Verdichtung geothermischer Nutzungen insbesondere in urbanen Gebieten. Die damit einhergehend mögliche thermische Beeinflussung benachbarter Erdwärmesondenanlagen kann unter bestimmten Umständen die Effizienz von ungünstig positionierten Einzelanlagen herabsetzen (GERSCHEL 2017). Die Entwicklung einfacher händischer Berechnungsverfahren zur frühzeitigen (behördenseitigen) Detektion derartiger thermischer Konfliktsituationen ist essentiell für die künftige geothermische Bewirtschaftung im urbanen Raum.

Vor diesem Hintergrund wurde anhand vorliegender Modellrechnungen der Zusammenhang zwischen Filter- bzw. Abstandsgeschwindigkeit und der Kältefahnenausbreitung D in Grundwasserfließrichtung geprüft. Als zeitabhängig zu vermessende Kältefahnen-grenze wurde hierbei eine Abkühlung um 0,1 K (Isotherme) gegenüber der ungestörten Untergrundtemperatur festgelegt (schematische Darstellung Abb. C-2.9). Die zu diesem Zweck genutzten geohydraulischen Szenarien inklusive jahresabhängig resultierender Ausbreitungsstrecken sind in Tab. C-2.8 zusammengefasst. Eine Visualisierung dieser untersuchten Datenbasis ist zudem Abb. C-2.10 zu entnehmen.

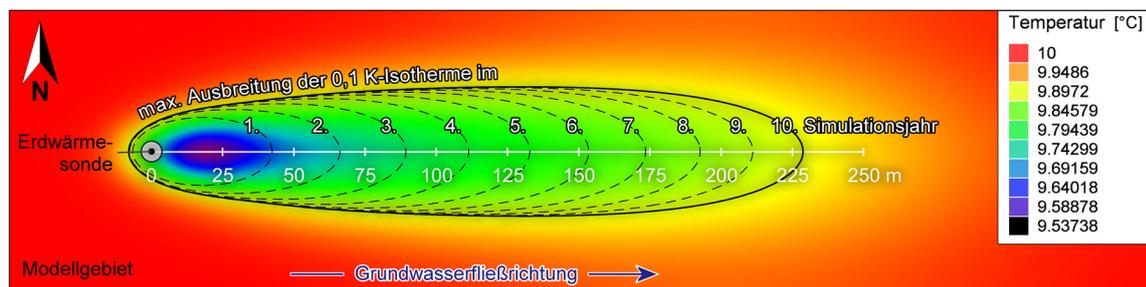


Abb. C-2.9 Exemplarische Darstellung der maximalen Kältefahnenausbreitung am Beispiel von Szenario B-5 im 10. Simulationsjahr (Temperatur-Kolorierung mit durchgezogener Isotherme) sowie jährliche Entwicklung der ersten neun Betriebsjahre (gestrichelte Isothermen).

Mittels Regressionsanalyse kann festgestellt werden, dass zwischen max. Kältefahnenausbreitung D und Filtergeschwindigkeit v_f ein hochsignifikanter Zusammenhang besteht (Abb. C-2.11), der sich für die betrachteten geohydraulischen Szenarien durch nachstehende Gleichung C.22 mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9941$ beschreiben lässt.

$$D = 4,0 \cdot 10^8 \cdot v_f + 34,788 \quad (\text{C.22})$$

Dem gegenüber korreliert die zusätzlich von der nutzbaren Gesteinsporosität abhängige Abstandsgeschwindigkeit v_a mit einem Bestimmtheitsmaß von nur $R^2 = 0,7923$ deutlich schlechter mit der maximalen Kältefahnenausbreitung D (Abb. C-2.11). Demnach eignen sich bei der Ableitung vereinfachter Handrechenverfahren zu Abschätzung der Kältefahnenausbreitung insbesondere numerische Modellrechnungen, denen variierende Filtergeschwindigkeiten als Untersuchungsgegenstand zugrunde liegen.

Tab. C-2.8 Maximale Ausbreitungsstrecken der Kältefahnen (0,1 K-Isotherme) in GW-Fließrichtung verschiedener geohydraulischer Szenarien in Abhängigkeit des Simulationsjahres.

Simulationsreihe	Szenario	Maximale Ausbreitung 0,1 K-Isotherme in GW-Fließrichtung D [m] in Abhängigkeit vom Simulationsjahr t_{sim} [a]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A (kiesiger Sand)	A-1	12,49	16,45	19,74	22,59	25,08	27,38	29,45	31,38	33,19	34,86
	A-2	14,33	19,28	23,51	27,15	30,40	33,32	36,04	38,53	40,89	43,12
	A-3	29,25	43,68	57,32	69,79	81,46	92,74	103,50	114,00	124,10	133,94
B (Mittelsand)	B-1	12,46	16,36	19,61	22,43	24,89	27,15	29,18	31,09	32,86	34,50
	B-2	13,57	18,10	21,94	25,31	28,36	31,12	33,71	36,14	38,40	40,56
	B-4	23,25	33,63	43,49	52,62	61,35	69,75	77,82	85,69	93,36	100,84
	B-5	42,17	66,03	89,17	111,29	132,68	153,34	173,28	195,64	210,97	237,53
C (Sand, schluffig)	C-1	12,63	16,59	19,79	22,59	25,07	27,29	29,32	31,18	32,93	34,53
	C-4	14,08	18,77	22,81	26,38	29,58	32,53	35,52	37,80	40,20	42,49
	C-5	25,18	36,69	47,88	58,28	68,20	77,73	87,01	95,98	104,79	113,29

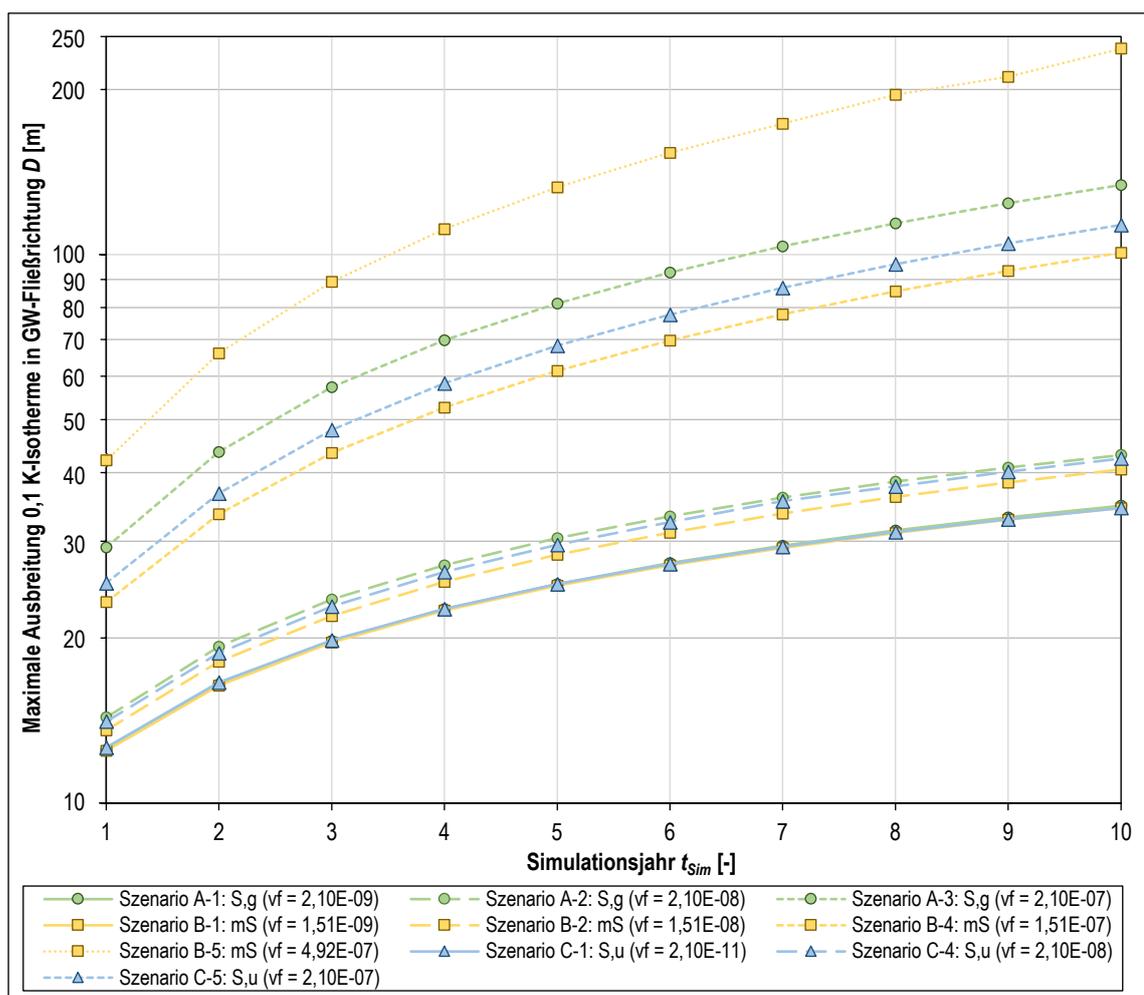


Abb. C-2.10 Szenario- und zeitabhängige Ausbreitung der Kältefahne (0,1 K-Isotherme) in GW-Fließrichtung.

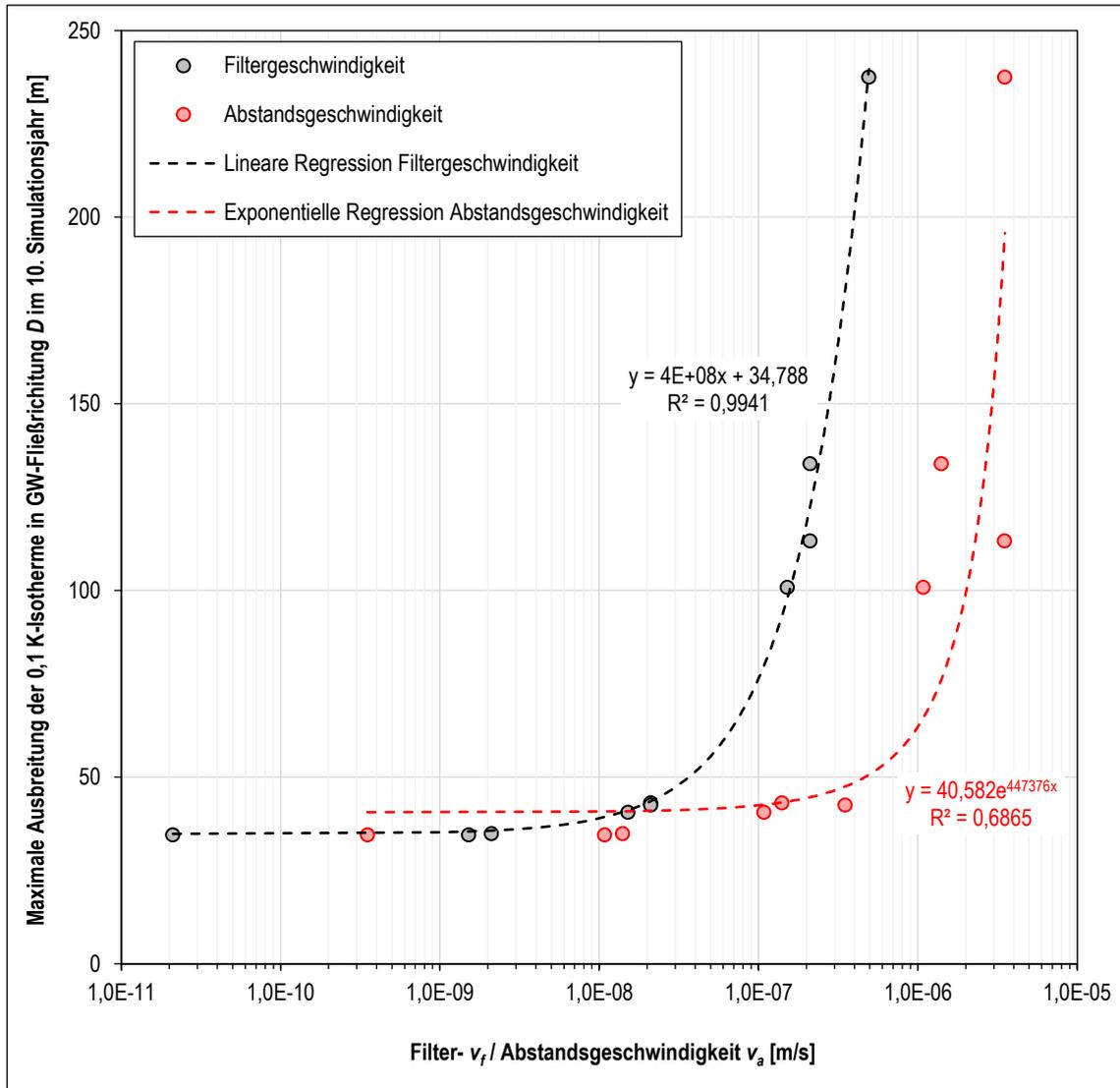


Abb. C-2.11 Zusammenhang zwischen maximaler Kältefahnenausbreitung (0,1 K-Isotherme) und Filter- bzw. Abstandsgeschwindigkeit im 10. Simulationsjahr.

2.3 Simulative Abbildung von Grundwassereinfluss durch gesteigerte (effektive) Gesteinswärmeleitfähigkeiten

2.3.1 Abriss bisheriger Forschungsarbeiten

Neben der spezifischen Sondenentzugsleistung $\dot{q}_{EWS,sp}$ weist ebenso die an installierten Erdwärmesonden mittels TRT in-situ bestimmbare effektive Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{eff} (vgl. Abschnitt 2.1.4) bei Anwesenheit grundwasserbedingter Konvektion gesteigerte Werte auf (WANG et al. 2013). Im Rahmen umfangreicher Labor- und Feldversuche sowie numerischer Modellrechnungen legte HUBER (2013) den Zusammenhang zwischen effektiver Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{eff} und Filtergeschwindigkeit v_f vertiefend dar. Die wesentlichen Ergebnisse der Dissertation sind in Abb. C-2.12 wiedergegeben. Im Hinblick auf eine potenzielle Ergänzung der VDI 4640-1:2010-06 leitet der Autor für wasserdurchströmte Sande die in Tab. C-2.9 aufgeführten Empfehlungen ab. Demnach befürwortet er in Abhängigkeit der Durchströmungsgrade „schwach wasserführend“, „wasserführend“ oder „stark wasserführend“ maximale Steigerungen der Gesteinswärmeleitfähigkeit von 25, 50 bzw. 100 %.

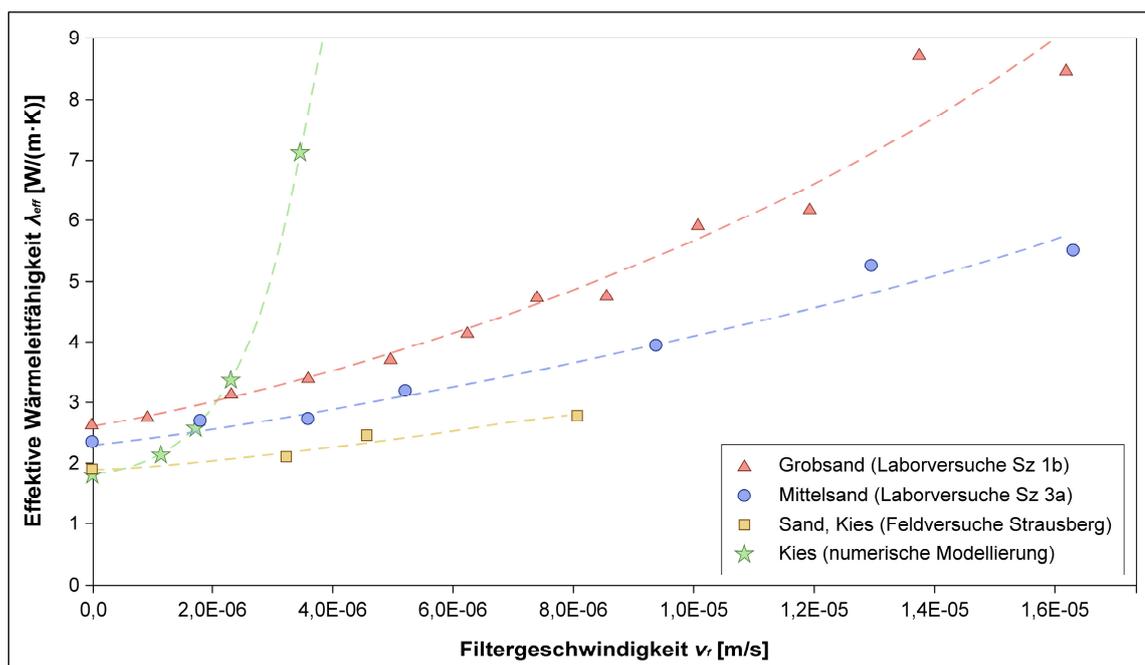


Abb. C-2.12 Gesteinstypabhängiger Zusammenhang zwischen effektiver Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{eff} und Filtergeschwindigkeit v_f (nach HUBER 2013).

Die Verwendung grundwasserbedingt gesteigerter effektiver Wärmeleitfähigkeitswerte trägt gemäß HUBER et al. (2014) zur Optimierung der Anlagendimensionierung bei, da so die Möglichkeit geschaffen wird, Grundwasserströmung auch dann im Dimensionierungsprozess zu berücksichtigen, wenn die zugrunde liegenden Modellrechnungen (vgl. Abschnitt 2.1.5) den geologischen Untergrund zu einem Einphasen-Medium (Feststoff) vereinfachen und somit regulär nicht zur Abbildung von grundwasserbedingter Konvektion befähigt sind.

Tab. C-2.9 Empfehlungen für effektive Gesteinswärmeleitfähigkeiten von wasserführenden Sanden (nach HUBER et al. 2014).

Gesteinstyp (in Analogie zu VDI 4640-1:2010-06)	Filter- geschwindigkeit v_f [m/s]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Gestein}$ [W/(m·K)]		Bemerkung
		Bandbreite	Empfohlener Richtwert	
Sand, trocken	–	0,3 - 0,9	0,4	Gemäß VDI 4640-1:2010-06
Sand, feucht	–	1,0 - 1,9	1,4	Gemäß VDI 4640-1:2010-06
Sand, wassergesättigt	keine Angaben	2,0 - 3,0	2,4	Gemäß VDI 4640-1:2010-06
Sand, schwach wasserführend	$0 - 3,47 \cdot 10^{-6}$	2,0 - 3,75	2,7	Steigerung ⁽¹⁾ : 0 - 25 %
Sand, wasserführend	$3,47 \cdot 10^{-6} - 6,94 \cdot 10^{-6}$	2,5 - 4,5	3,3	Steigerung ⁽¹⁾ : 25 - 50 %
Sand, stark wasserführend	$6,94 \cdot 10^{-6} - 1,16 \cdot 10^{-5}$	3,2 - 6,0	4,2	Steigerung ⁽¹⁾ : 50 - 100 %

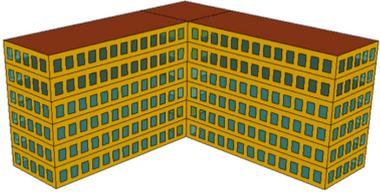
⁽¹⁾ Die Steigerungen beziehen sich auf die in VDI 4640-1:2010-06 angegebenen Wärmeleitfähigkeiten eines wassergesättigten Sandes.

2.3.2 Modellbeschreibung

2.3.2.1 Energetik

Inwieweit der von HUBER et al. (2014) empfohlene Lösungsansatz, konvektiven Grundwassereinfluss modelltechnisch durch Gebrauch gesteigerter (effektiver) Gesteinswärmeleitfähigkeiten zu realisieren, auch für die Dimensionierung größerer Erdwärmesondenanlagen mit kombiniertem Heiz- und Kühlbetrieb anwendbar ist, gilt es im Rahmen vorliegender Arbeit für ein fiktives Anlagenbeispiel mittels numerischer Simulationsrechnungen zu prüfen. Analog zu den vorhergehenden Untersuchungen (vgl. Abschnitt 2.2) fand im Zuge der Modellierung ebenfalls die Finite-Elemente-Software FEFLOW (Version 7.3) von DHI-WASY Anwendung.

Tab. C-2.10 Gebäudetechnische Spezifikation aus im Vorfeld erfolgter Gebäude- und Anlagensimulation mit TRNSYS.

Parameter	Gebäudetechnische Spezifikation	Gebäudeform
Gebäudenutzung	Büro	
Gebäudeform	L-Form	
Stockwerkanzahl	6	
Zonen / Großraumbüros	18	
Grundfläche	5.184 m ² (864 m ² je Stockwerk)	
Heizung	Fußbodenheizung mit erdgekoppelter WP	
Kühlung	Kühldecke mit Passivkühlung	
Jährlicher Heizbedarf	44,62 kWh/m ²	
Maximale Heizlast	239,0 kW	
Jährlicher Kühlbedarf	12,11 kWh/m ²	
Maximale Kühllast	136,5 kW	

Als Untersuchungsgegenstand wurde ein 37 Einzelsonden umfassendes Erdwärmesondenfeld gewählt (Abb. C-2.15), welches der Beheizung und Kühlung eines Bürogebäudes dient. Entsprechende gebäudetechnische Spezifikationen fasst Tab. C-2.10 zusammen. Die den Modellbetrachtungen zugrunde liegenden thermischen Belastungen des Sondenfeldes sind durch ein stündlich aufgelöstes Lastprofil (Abb. C-2.13) definiert, das aus einer im Vorfeld durchgeführten Gebäude- und Anlagensimulation mit der Software TRNSYS (Version 18) hervorgeht. Hieraus resultieren die in Abb. C-2.14 getrennt für Heiz- und Kühlbetrieb dargestellten monatlichen Entzugsenergien.

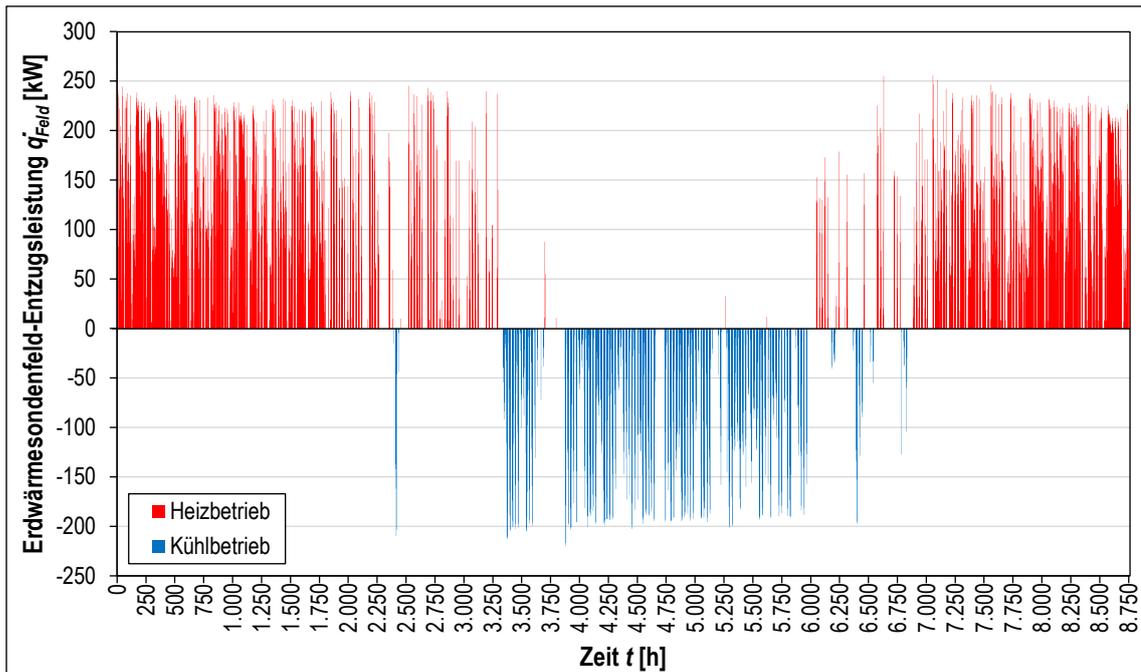


Abb. C-2.13 Thermische Sondenfeldbelastung in Form eines stündlich aufgelösten Lastprofils.

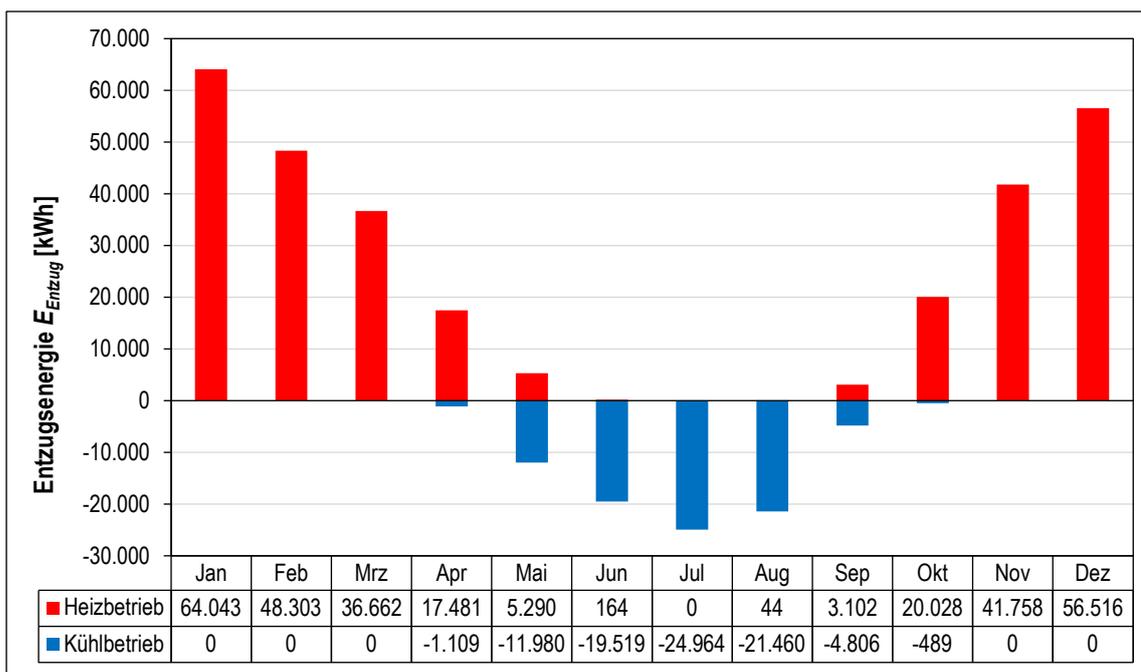


Abb. C-2.14 Monatliche Entzugsenergien, getrennt nach Heiz- und Kühlbetrieb.

Aufgrund der durch das angesetzte Lastprofil absehbar instationären Temperaturentwicklung im Bereich der Erdwärmesondenbohrungen, musste im Hinblick auf die Ergebnisqualität auf einen numerischen und somit rechenintensiven Modellansatz bei der Sondenimplementierung zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 2.3.2.4). Die in Abschnitt 2.3.2.3 beschriebenen Modellbetrachtungen erfolgten daher aus Zeitgründen nur für das erste Betriebsjahr.

Zur Ermittlung der effektiven Gesteinswärmeleitfähigkeiten, die aus den betrachteten geohydraulischen Strömungsszenarien (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) resultieren, erfolgten in separaten Simulationsrechnungen virtuelle Thermal Response Tests an der mittig im Sondenfeld gelegenen Erdwärmesonde. Diese erfuhr hierbei über einen bis zu 10 Tage währenden Zeitraum eine konstante thermische Lastbeaufschlagung von 9,76 kW (≈ 80 W/m) bei einem Durchsatz von 2,2 m³/h.

2.3.2.2 Dreidimensionaler Modellaufbau

Für die erdseitigen Simulationsrechnungen wurde ein 186 x 136 m umfassendes Modellgebiet mit einer 143 m messenden Vertikalausdehnung gewählt (Abb. C-2.15). Das implementierte Erdwärmesondenfeld besteht aus 37 Einzelsonden, die 1 m unter Modelloberkante ansetzen und eine Länge von jeweils 122 m aufweisen. Hinsichtlich der Sondenfeldgeometrie fand eine kompakte hexagonale Sondenanordnung mit einem äquidistanten Sondenabstand von 6 m Anwendung, welche vorausgegangenen Modellbetrachtungen mit der Software TRNSYS entstammt. Die Entfernung des Sondenfeldes zur Nord-, Süd- bzw. Westgrenze des Modellgebiets beträgt jeweils 50 m.

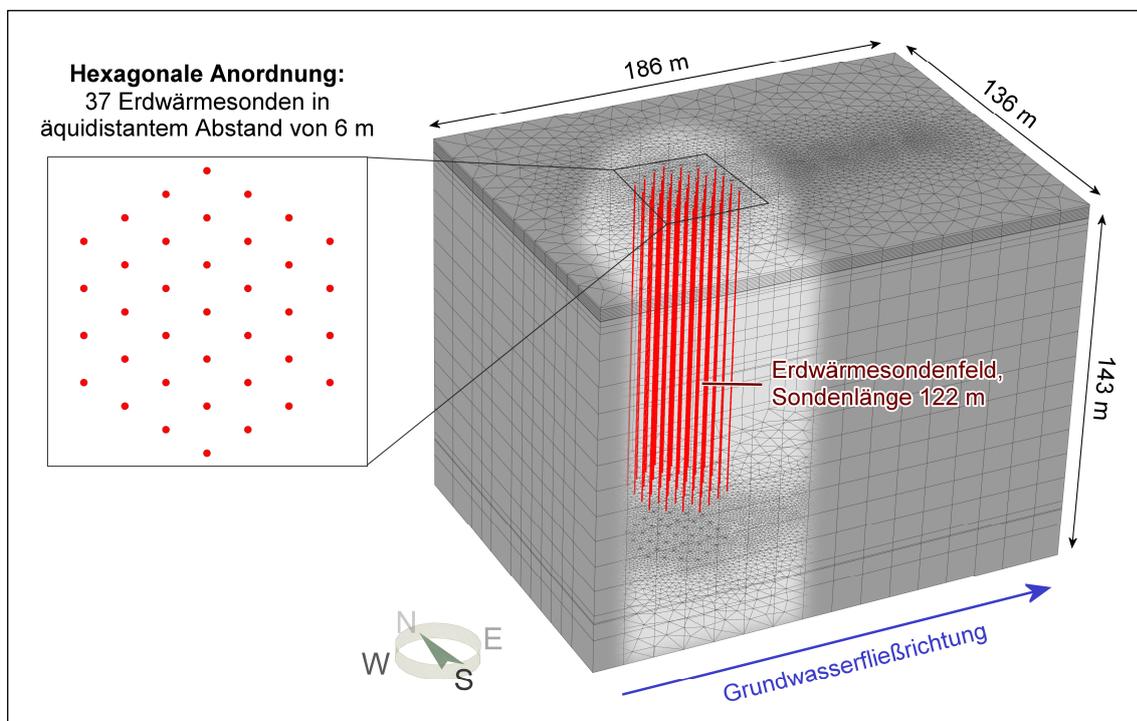


Abb. C-2.15 Dreidimensionaler Aufbau und Diskretisierung des FEFLOW-Modells inkl. Positionierung des implementierten Erdwärmesondenfeldes.

Das Layer-basierte Modell setzt sich aus 223.416 Elementen (dreiseitige Prismen) und 116.520 Rechenknoten zusammen. In den Sondennahbereichen sowie in Gebieten mit einer zu erwartenden Kältefahnenausbreitung erfolgte aus rechentechnischen Gründen eine entsprechend feinere Diskretisierung.

2.3.2.3 Randbedingungen und Untergrundparameter

Im Zuge der Modellrechnungen erfolgte eine Betrachtung unterschiedlicher Szenarien, deren gewählte Parametrierung in Tab. C-2.11 zusammengestellt ist. Die natürliche Untergrundtemperatur beträgt für sämtliche Modellvariationen 11,5 °C (Dirichlet-Randbedingung an Modellober- und -unterkante sowie am Westrand). Zu Vergleichszwecken wurde zunächst ein Referenz-Modell ohne konvektive Beeinflussung (Aquifer) realisiert, welches über die volle Modelltiefe bezüglich der Gesteinseigenschaften einem Grundwassernichtleiter entspricht. Die Erweiterung um einen Grundwasserleiter mit einer Mächtigkeit von 2 bzw. 4 m (1,64 bzw. 3,28 % der Sondenlänge) erfolgte in den Modellszenarien A.1 bzw. A.2. Mit dem für die Untersuchung gewählten hydraulischen Gradienten $i = 2,1 \cdot 10^{-3}$ ergibt sich zusammen mit dem horizontalen k_f -Wert des Aquifergesteins (Tab. C-2.11) im Grundwasserleiter eine Filtergeschwindigkeit von $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Das Fließgefälle wurde hierbei durch entsprechende hydraulische Randbedingungen an der West- und Ostgrenze des Modellgebiets umgesetzt.

Die in den geohydraulischen Szenarien A.1 und A.2 separat mittels virtuellem TRT bestimmten effektiven Wärmeleitfähigkeitswerte (Abschnitt 2.3.3.1) fanden als Modellparameter schließlich in den Szenarien B.1 und B.2 Berücksichtigung, um die modelltechnische Abbildung von grundwasserbedingter Konvektion im Einphasen-Medium ($n_{eff} = 0$) durch gesteigerte (effektive) Gesteinswärmeleitfähigkeiten zu erproben.

Tab. C-2.11 Parametrierung der betrachteten Modellszenarien.

Szenario	Gesteins-schicht	Mächtigkeits-anteil über EWS-Länge		Effektive Porosität n_{eff}	Wärmeleit-fähigkeit ⁽¹⁾ $\lambda_{Gestein}$	Vol. Wärme-kapazität ⁽¹⁾ c_v	Durchlässigkeitsbei-wert k_f [m/s]	
		[m]	[%]				horizontal	vertikal
Referenz	GW-Nichtleiter	122	100,00	0,035	2,10	2,3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
A.1	GW-Leiter	2	1,64	0,151	2,10	2,3	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$
	GW-Nichtleiter	120	98,36	0,035	2,10	2,3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
A.2	GW-Leiter	4	3,28	0,151	2,10	2,3	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$
	GW-Nichtleiter	118	96,72	0,035	2,10	2,3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
B.1	GW-Nichtleiter	122	100,00	0,000	2,39 ⁽²⁾	2,3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
B.2	GW-Nichtleiter	122	100,00	0,000	2,58 ⁽³⁾	2,3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$

⁽¹⁾ Anhand der effektiven Porosität erfolgte eine Aufspaltung der Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätswerte in einen Fluid- und Feststoffanteil. Durch $n_{eff} = 0$ wird die flüssige Phase im Modell ausgeschaltet.

⁽²⁾ Entspricht mittels virtuellem TRT ermittelter eff. Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} im geohydraulischen Szenario A.1 (2 m Aquifer-Mächtigkeit).

⁽³⁾ Entspricht mittels virtuellem TRT ermittelter eff. Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} im geohydraulischen Szenario A.2 (4 m Aquifer-Mächtigkeit).

2.3.2.4 Erdwärmesondenmodell

Die Sondenimplementierung erfolgte innerhalb des FEFLOW-Modells durch eine Erdwärmesondenrandbedingung. Aufgrund der Lastprofil-bedingt absehbar instationären Temperaturentwicklung wurde auf den transienten, numerischen Sondenmodellansatz zurückgegriffen, wie er von BAUER (2011) beschrieben wird (AL-KHOURY et al. 2005; AL-KHOURY & BONNIER 2006). Die Parametrierung des eingebundenen Erdwärmesondenmodells ist in Tab. C-2.12 aufgeschlüsselt.

Tab. C-2.12 Parametrierung des im FEFLOW-Modellkörper implementierten Erdwärmesondenmodells.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Maßstabsgerechte Zeichnung
Bohrlochdurchmesser	$d_{Bohrloch}$	152,4	mm	
Rohrdurchmesser	d_{Rohr}	32	mm	
Rohrwandstärke	s_{Wand}	2,9	mm	
U-Rohr-Mittenabstand waagrecht	a_{hor}	60,1	mm	
U-Rohr-Mittenabstand diagonal	a_{diag}	85,0	mm	
WLF Sondenmaterial	λ_{EWS}	0,4	W/(m·K)	
WLF Bohrlochhinterfüllung	$\lambda_{verf\u00fcllung}$	2,0	W/(m·K)	
WLF Sondenfluid	λ_{Fluid}	0,48	W/(m·K)	
Vol. Wärmekapazität Hinterfüllung	$c_{v,verf\u00fcllung}$	2,3	MJ/(m ³ ·K)	
Vol. Wärmekapazität Sondenfluid	$c_{v,Fluid}$	3,998	MJ/(m ³ ·K)	
Dyn. Viskosität Sondenfluid	η_{Fluid}	$5,2 \cdot 10^{-3}$	kg/(m·s)	
Dichte Sondenfluid	ρ_{Fluid}	1.052	kg/m ³	
Sondendurchsatz	\dot{V}	1,61	m ³ /h	
Sondentyp	Doppel-U			
EWS Berechnungsmodell	instationär, numerisch (AL-KHOURY et al. 2005; AL-KHOURY & BONNIER 2006; BAUER 2011)			

2.3.3 Simulationsergebnisse und Diskussion

2.3.3.1 Mittels TRTs bestimmte effektive Gesteinswärmeleitfähigkeiten

Die Auswertung der für die geohydraulischen Szenarien A.1 und A.2 durchgeführten virtuellen TRTs erfolgte nach Linienquellenmodell gemäß den Vorgaben der VDI 4640-5:2020-07. In den letzten 20 Stunden des Auswertzeitraums schwankte die berechnete effektive Gesteinswärmeleitfähigkeit um maximal 0,18 % (TRT A.1) bzw. 0,16 % (TRT A.2) um den finalen Endwert. Damit ist das Konvergenzkriterium trotz Grundwasserbeeinflussung in beiden Fällen erfüllt (gemäß VDI 4640-5:2020-07 sind Schwankungen bis zu 5 % zulässig).

Die Ergebnisse zeigen, dass im konkreten Fall in Anwesenheit eines 2 m bzw. 4 m mächtigen Grundwasserleiters mit einer Filtergeschwindigkeit von $2,1 \cdot 10^{-6}$ m/s die mittlere effektive Gesteinswärmeleitfähigkeit über die Sondentiefe um 13,81 % (Szenario A.1) bzw. 22,86 % (Szenario A.2) gesteigert wird (Tab. C-2.13).

Tab. C-2.13 TRT-Ergebnisübersicht für die geohydraulischen Szenarien A.1 und A.2.

Szenario	Mächtighkeitsanteil des Aquifers an der Sondenlänge		Mittels TRT gemessene eff. Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} [W/(m·K)]	Steigerung der eff. Wärme- leitfähigkeit gegenüber dem Referenzmodell ohne GW- Einfluss [%]
	[m]	[%]		
A.1	2	1,64	2,39	13,81
A.2	4	3,28	2,58	22,86

2.3.3.2 Einfluss grundwasserbedingter Konvektion und äquivalent gesteigerter Gesteinswärmeleitfähigkeiten auf den Anlagenbetrieb

In welchem Maße sich grundwasserbedingte Konvektion in den Szenarien A.1 und A.2 (Modellansatz A) sowie äquivalent gesteigerte Gesteinswärmeleitfähigkeiten in den Szenarien B.1 und B.2 (Modellansatz B) auf den Anlagenbetrieb auswirken, wurde anhand der betriebsphasenabhängig resultierenden Quellentemperaturen (Fluidtemperaturen des Sondenfeld-Outputs) untersucht. Hierzu erfolgte ein Vergleich der je nach Betriebsphase (Heizen bzw. Kühlen) in den betrachteten Szenarien verfügbaren monatlichen Quellentemperaturen (integrales Monatsmittel).

Wie Abb. C-2.16 zu entnehmen ist, zeigen sich im Heizbetrieb bei den Szenarien A.1 und A.2 aufgrund der gewählten Grundwasserbeeinflussung entsprechend höhere und somit günstigere monatliche Quellentemperaturen im Vergleich zum Referenzmodell ohne Aquifer. Die Szenarien B.1 und B.2, welche den Grundwassereinfluss aus den Szenarien A.1 bzw. A.2 simulativ durch erhöhte Gesteinswärmeleitfähigkeiten abbilden, sollten erwartungsgemäß annähernd identische Quellentemperaturen aufweisen. Dies ist so im Rahmen der Simulationsrechnungen jedoch nicht zu beobachten. Während ein Vergleich der Szenarien A.1 und B.1 bzw. A.2 und B.2 für die ersten drei Simulationsmonate Januar, Februar und März noch eine hohe Ähnlichkeit im Hinblick auf die monatlich resultierenden Quellentemperaturen zeigt, weichen mit dem überlappend einsetzenden Kühlbetrieb ab Monat April die Temperaturprognosen der Szenarien B.1 und B.2 deutlicher von denen der Szenarien A.1 und A.2 ab. Die Darstellung der prozentualen Abweichung gegenüber dem Referenz-Modell in Abb. C-2.17 illustriert dies zusätzlich.

Noch deutlichere Abweichungen zwischen den Modellansätzen A und B sind bei Betrachtung der Kühlbetriebsphase zu beobachten. Die mithilfe gesteigerter Gesteinswärmeleitfähigkeiten realisierte simulative Abbildung von Grundwassereinfluss in den Szenarien B.1 und B.2 führt hier entgegen der Szenarien A.1 und A.2 sogar zu niedrigeren Quellentemperaturen als im Referenzmodell (Abb. C-2.18). Wie Abb. C-2.19 zudem veranschaulicht, machen sich beim Modellansatz B zusätzlich thermische Speichereffekte bemerkbar, die bei vollumfänglicher simulativer Abbildung der grundwasserbedingten Konvektion (Modellansatz A) in der Form nicht auftreten. So ist davon auszugehen, dass die im Modellansatz B zu Beginn der Kühlperiode verstärkt niedriger prognostizierten Quellentemperaturen auf die Auskühlung des geologischen Untergrundes während der Heizperiode zurückzuführen sind. Bei realitätsnaher Berücksichtigung grundwasser-

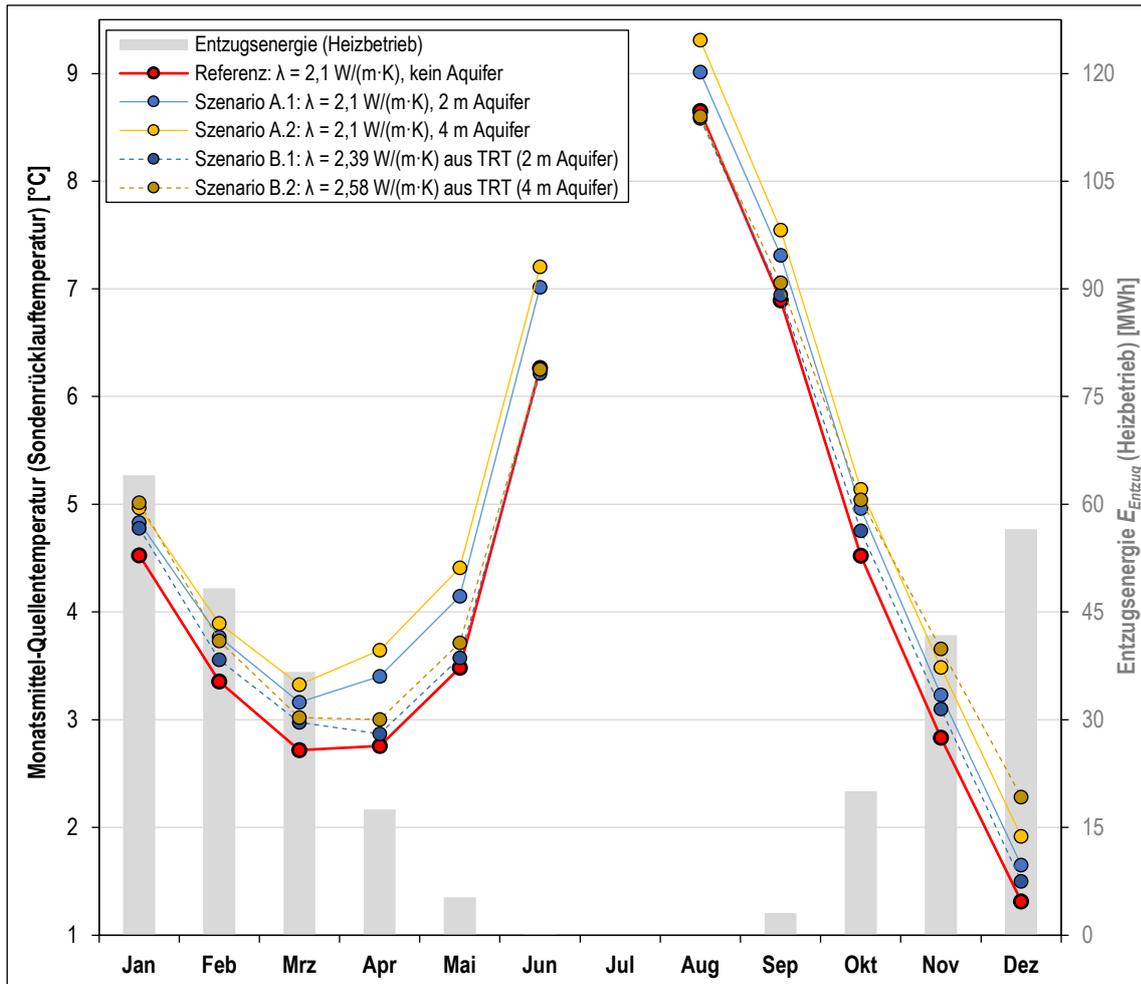


Abb. C-2.16 Szenarioabhängige Monatsmittel-Quellentemperaturen für die Betriebsphase Heizen.

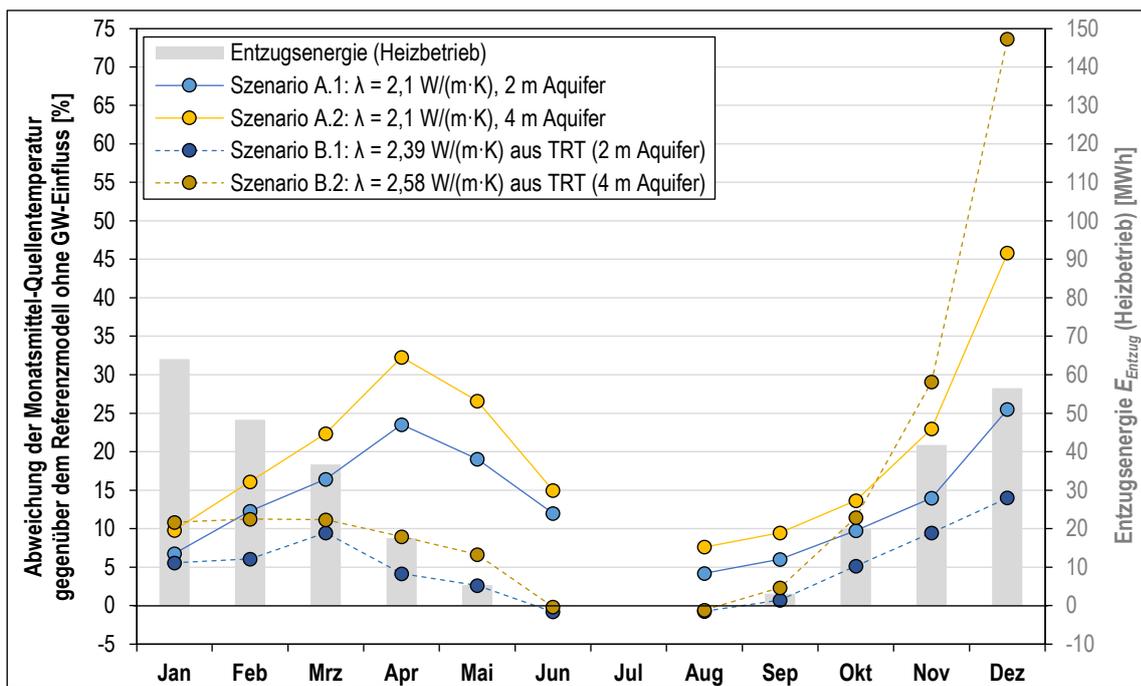


Abb. C-2.17 Szenarioabhängige Abweichungen der Monatsmittel-Quellentemperaturen im Vergleich zum Referenzmodell für die Betriebsphase Heizen.

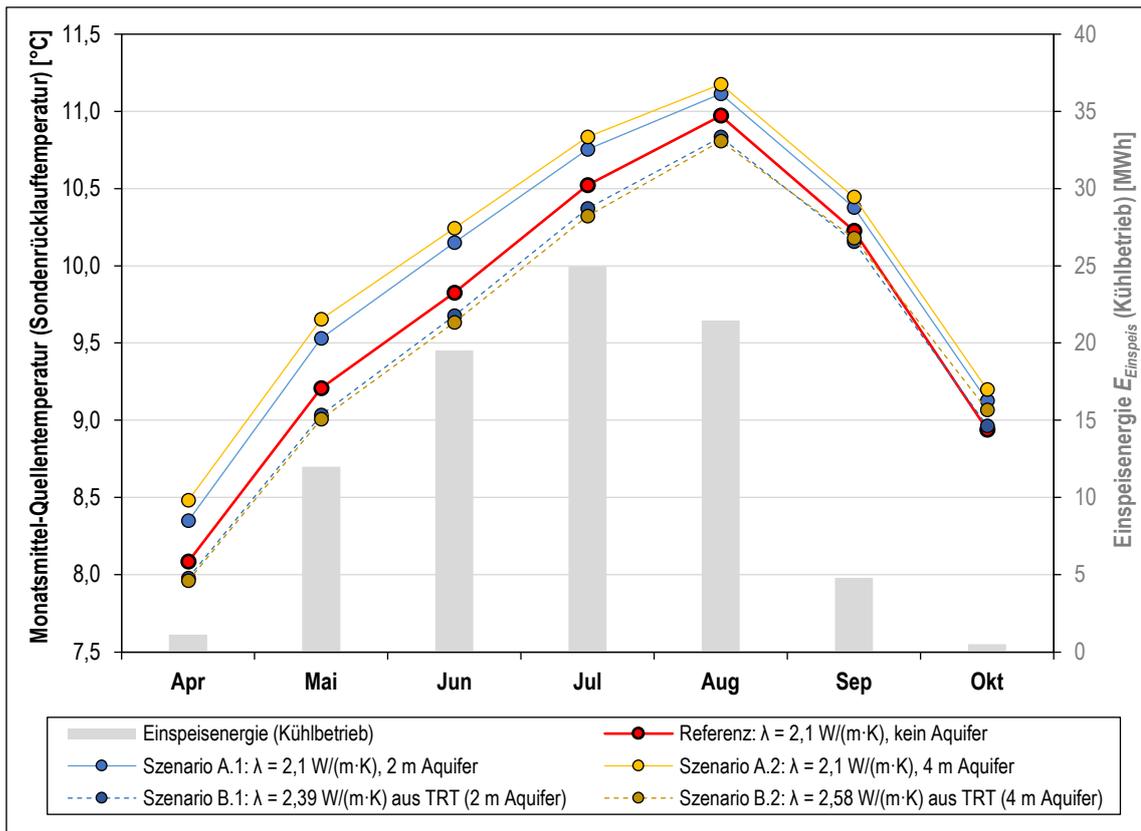


Abb. C-2.18 Szenarioabhängige Monatsmittel-Quellentemperaturen für die Betriebsphase Kühlen.

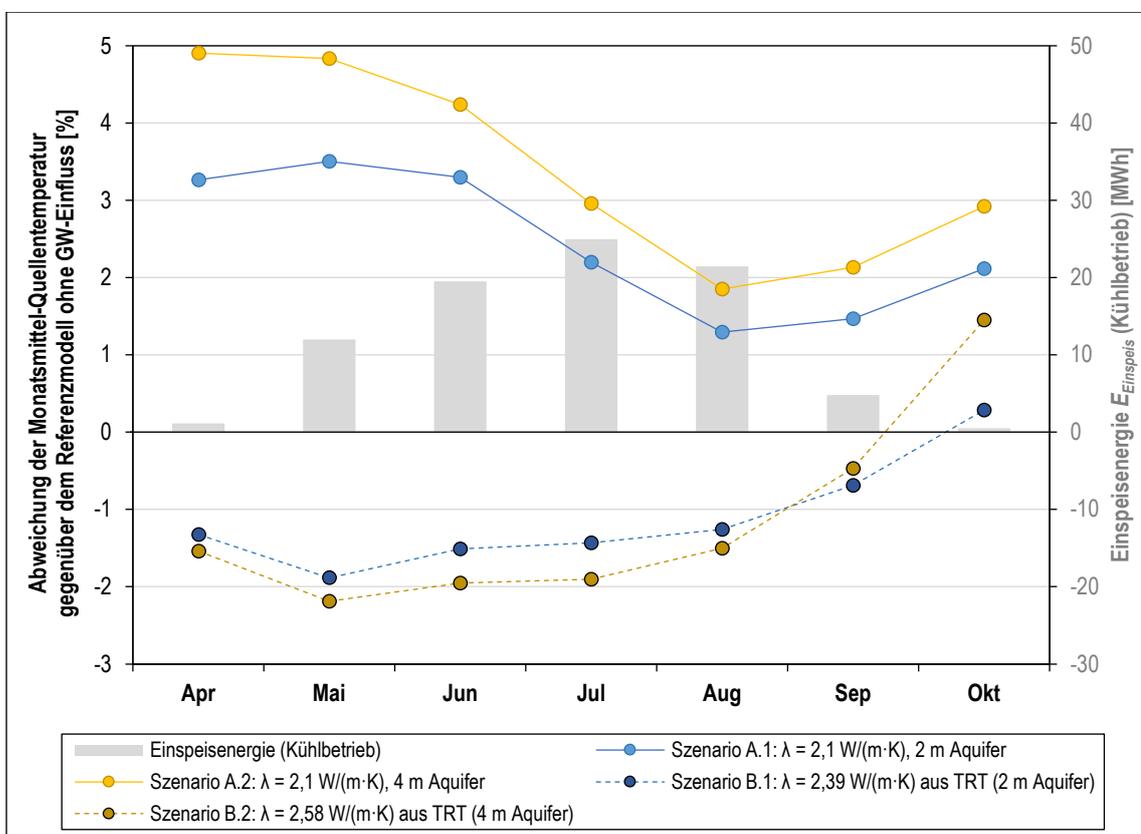


Abb. C-2.19 Szenarioabhängige Abweichungen der Monatsmittel-Quellentemperaturen im Vergleich zum Referenzmodell für die Betriebsphase Kühlen.

bedingter Konvektion (Modellansatz A) kann sich dieses durch den Heizbetrieb hervorgerufene „Kältereservoir“ jedoch aufgrund des effizienter ablaufenden Wärmetransports weniger gut im Einzugsbereich des Erdwärmesondenfeldes halten, was zu entsprechend höheren Quellentemperaturen führt.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass eine simulative Abbildung von grundwasserbedingter Konvektion durch Berücksichtigung gesteigerter (effektiver) Gesteinswärmeleitfähigkeiten beim Auslegungsprozess von Erdwärmesondenanlagen nur bedingt zu realistischen Prognosen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Sondenfluidtemperaturen führt. Exemplarische Modellrechnungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigen, dass hier insbesondere im Fall eines kombinierten Heiz- und Kühlbetriebs mit relevanten Abweichungen bei der Fluidtemperaturprognose zu rechnen ist und somit die Gefahr einer Unterdimensionierung der betreffenden Erdwärmesondenanlage besteht.

3 Kleinräumige (hydro)geologisch-geothermische 3D-Modellierung am Standort Zittau

3.1 Regionalgeologischer Überblick

Das in SW-NE-Erstreckung etwa 20 km messende und bis zu 10 km breite Zittauer Becken befindet sich im Dreiländereck zwischen Deutschland, Polen und der Tschechischen Republik (Abb. C-3.1). Auf dem etwa 53 km² großen deutschen Anteil des Beckens zwischen dem Lausitzer Bergland im Nordwesten und dem Zittauer Gebirge im Südosten ist die SE-sächsische Stadt Zittau als wichtige geographische Landmarke zentral gelegen (VULPIUS 2015).

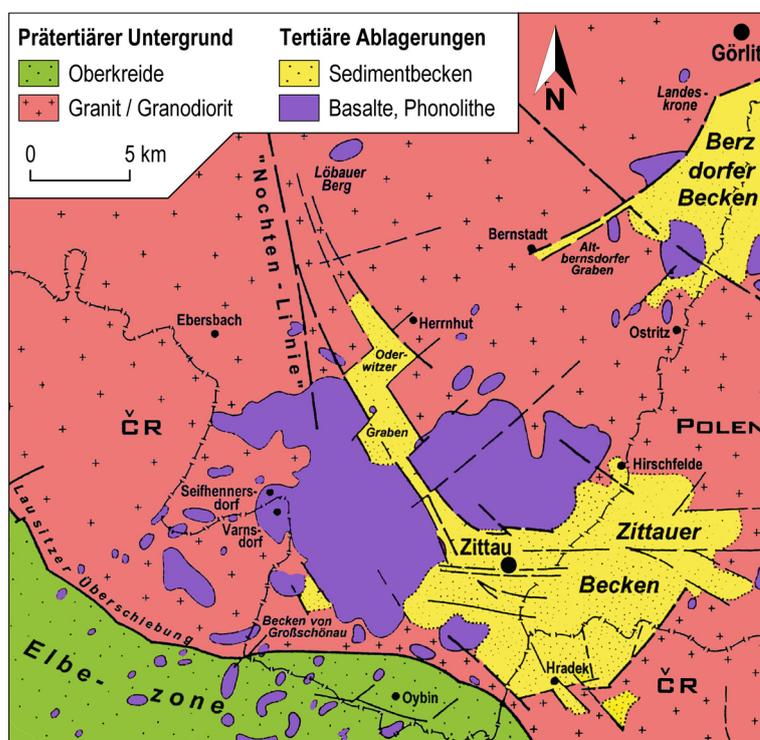


Abb. C-3.1 Regionalgeologische Übersichtskarte der Oberlausitzer Tertiärbecken (nach STEDING et al. 1991).

Strukturgeologisch ist die Entwicklung des Zittauer Beckens durch die Ostverlagerung Europas infolge der Öffnung des Atlantiks und dem Norddrift der afrikanischen Platte ab dem Obereozän/Oligozän initiiert (BRAUSE 1988). Diese Horizontalbewegungen der Kontinentalplatten steigerten nach DITTRICH et al. (1988) den geologischen Stress in der Erdkruste und lösten über Fernwirkungsprozesse zahlreiche tektonische Ereignisse zwischen der Lausitz und Nordböhmen aus. So etablierte sich beispielsweise die südlich des Zittauer Beckens verlaufende Lausitzer Überschiebung (Abb. C-3.2 ①), deren dekompressierende Wirkung isostatische Bewegungen einzelner tektonischer Schollen begünstigte und unterschiedliche Senkungsbereiche entstehen ließ. Zu diesen Einbruchsbecken zählt auch das Zittauer Becken, welches sich im Vergitterungsbereich der tektonischen Hauptstörungen (Abb. C-3.1)

- des NE-SW-streichenden nordböhmisches tertiären Egergrabens (auch Ohře-Rift nach KOPECKY 1975),
- des NW-SE-gerichteten Elbelineaments bzw. der Lausitzer-Überschiebung (BRAUSE 1989 a, b) und
- der altangelegten NNW-SSE-streichenden Labilzone („Nochtenlinie“) zwischen dem Lausitzer Massiv und dem Isergebirgs-/Riesengebirgsmassiv (BRAUSE 1988)

bildete (HIRSCH et al. 1989). Durch Schollenbewegungen wurde eine Scherzone erzeugt, die das prätertiäre Grundgebirge kesselartig aufreißen und bis zu 300 m tief einsinken ließ. In der erschaffenen Beckenmorphologie lagerten sich anschließend tertiäre Gesteine ab, die durch die sich bis in das Obere Miozän fortsetzende tektonische Aktivität in einer mosaikartigen Zerböckung gegeneinander versetzt wurden (DITTRICH et al. 1988). Dieser Prozess lässt sich nach DITTRICH et al. (1988), HOFFMANN et al. (1988) und BRAUSE (1988) in drei tektonische Hauptphasen gliedern (Abb. C-3.2).

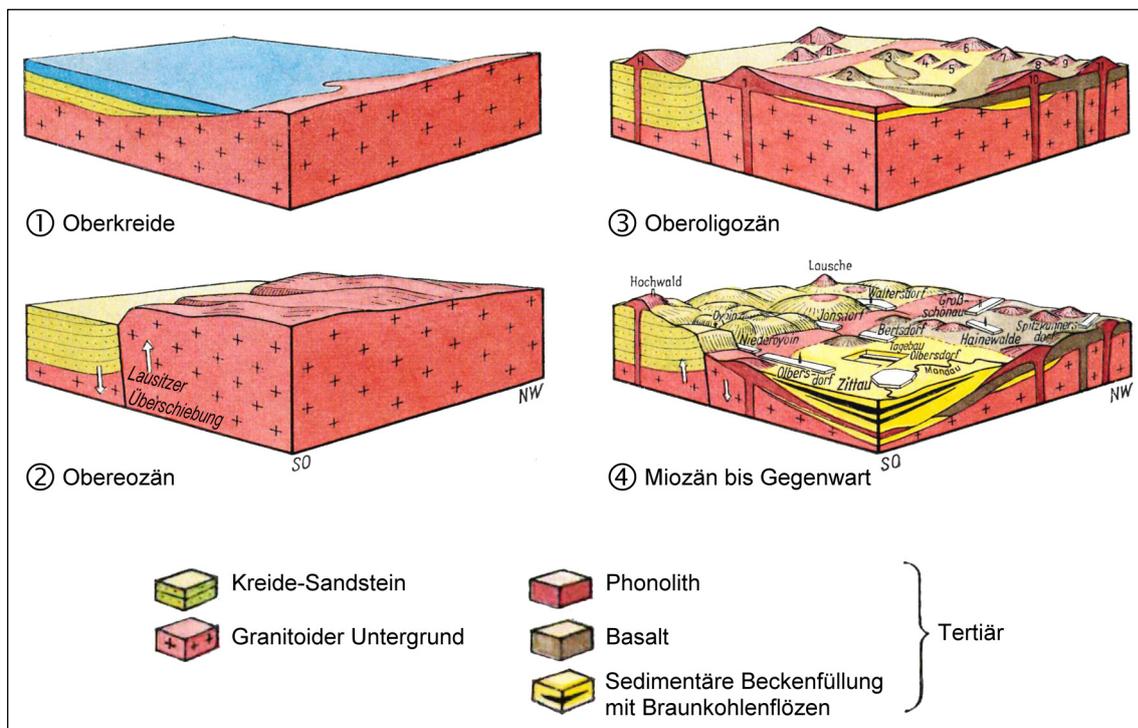


Abb. C-3.2 Schematische Darstellung der Entwicklungsgeschichte des Zittauer Beckens (aus WAGENBRETH & STEINER 1982).

Spätestens ab dem frühen Oligozän – nach SCHULZE (1995) möglicherweise auch bereits ab dem Beginn Oberkreide – wurde zunächst der granitoider Untergrund bestehend aus dem Ostlausitzer Granodiorit (Oberes Riphäikum) und dem Rumburger Granit (Präordovizium) durch die paläoklimatischen Bedingungen tiefgründig (50-70 m) kaolinisiert (Abb. C-3.3).

Während des Oligozäns, in der ersten tektonische Hauptphase, setzte vor ca. 34 Ma die Beckenentwicklung mit der Entstehung von Störungen im Liegenden der Basalfolge (sog. Unterflöz und Zittauer Schichten B) ein. Diese führten zum Aufreißen des prätertiären granitoiden Untergrundes und dessen Absenkung. Die so erzeugten Störungen dienten

nach DITTRICH et al. (1988) als Aufstiegswege für Magmen und verursachten insbesondere im Oberen Oligozän (vor ca. 28 Ma) einen intensiven Basalt- und Phonolith-vulkanismus, der zur Bildung von bis zu 150 m mächtigen Gang-, Schlot- und Deckenbasalten sowie Tuffen und Vulkanoklastiten führte (SUHR 2003; Abb. C-3.2 ③). Diese Basaltkuppen und -decken prägen bis heute an der West- und Nordflanke des Beckens das Landschaftsbild im weiteren Umfeld (z. B. Lausche; WAGENBRETH & STEINER 1982). In dem sich gleichzeitig ausbildenden Graben von Zittau akkumulierten sich die ältesten Tertiärsedimente des Zittauer Beckens (sog. Zittauer Schichten A mit Basalflöz), wodurch diese lokal durch die jungvulkanischen Ablagerungen überdeckt wurden (HIRSCH et al. 1989).

In der zweiten tektonischen Hauptphase zwischen dem Oberoligozän bis Untermiozän (vor 28 Ma bis 23 Ma) erweiterten sich die bereits vorhandenen Gräben, während neu angelegte bzw. reaktivierte Störungselemente eine Absenkung zusätzlicher Grundgebirgsschollen verursachten (Dittrich et al. 1988). Infolgedessen entwickelte sich ein stark zerblockter Untergrund mit zahlreichen Teilschollen. Getrennt durch den sich auch in späteren Phasen weniger absenkenden Zittauer Rücken ist dieser in zwei Teilbecken (Zittauer Nord- und Zittauer Südbecken; Abb. C-3.3) gliederbar. Die in dieser Zeit abgelagerten Zittauer Schichten B bzw. der bis zu 30 m mächtige Unterflözkomplex als Ergebnis der ersten Vermoorungen im Zittauer Raum sind daher verhältnismäßig stark tektonisch geprägt (SCHULZE 1995).

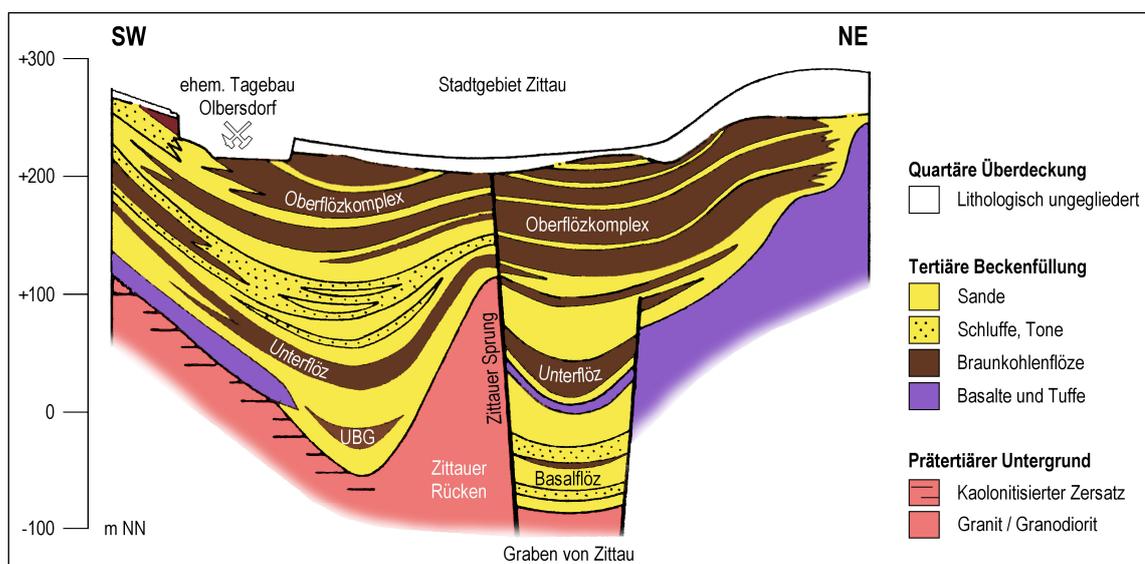


Abb. C-3.3 Schematischer Schnitt durch das Zittauer Becken (nach HIRSCH et al. 1989 und VULPIUS 2015).

Durch die Aktivierung von randparallelen tektonischen Großelementen außerhalb des Beckenbereiches zwischen dem Unteren und Mittleren Miozän (vor 23 bis 12 Ma) und dadurch verursachte größere Schollenbewegungen sowie der fortschreitenden tektonischen Aktivität oben genannter Störungssysteme, kam es während der dritten Hauptphase nach DITTRICH et al. (1988) zur Aufweitung und weiteren Subsidenz des Zittauer Beckens (Abb. C-3.2 ④). Die dadurch zunehmend unruhige Beckenmorphologie glich der erhebliche Sedimenteintrag von heterogenem Schuttfächermaterial (sog. Zittauer Schichten C) aus. Das verbleibende Beckenvolumen bot den umfangreichen kohlenbildenden Prozessen

des Zittauer Oberflözkomplexes sowie den eingeschalteten Ablagerungen Raum. Dabei entstanden während tektonischer Ruhephasen Vermoorungsgebiete, aus denen die insgesamt 14 Braunkohlenflözbänke hervorgingen (Abb. C-3.3). Bei stärkeren Absenkungsraten hingegen wurden die versumpften Gebiete überflutet und es gelangten schlecht klassierte Tone, Schluffe oder Sande zur Ablagerung (SCHULZE 1995). Die unterschiedlichen Mächtigkeiten der organogenen Flöze und mineralischen Zwischenmittel geben dabei Aufschluss zu den zeitlichen Abständen zwischen den Absenkungsphasen sowie deren Intensität.

Nachfolgende Verwitterungsprozesse ab dem Oberen Miozän bis zum Mittleren Pleistozän (vor ca. 12 Ma bis 400.000 a) griffen teilweise bis in den Oberflözkomplex ein und verringerten dessen Mächtigkeit (Abb. C-3.3). Über einem stratigraphischen Hiatus folgen schließlich pleistozäne Ablagerungen von zwei elsterzeitlichen Eisvorstößen, saalezeitliche Flussschotterablagerungen sowie weichselzeitlichen Periglazialsedimenten als Abschluss der känozoischen Sedimentation im Zittauer Becken (HOFFMANN et al. 1988). Hinweise auf endogen-tektonische Bewegungen innerhalb der quartären Ablagerungen sind bislang nicht nachgewiesen, jedoch entstanden glazigene Störungen innerhalb des Quartärs und der oberen tertiären Kohlschichten.

3.2 Datenbasis der Modellierung

3.2.1 Recherche hydro-/geologischer Fachdaten für das gewählte Modellgebiet

Die Realisierung eines detaillierten 3D-Modells der geologischen Untergrundverhältnisse in einem etwa 55 m messenden Umkreis um die HSZG-Erdwärmesondenversuchsanlage („Modellgebiet“; Abb. C-3.4) erforderte im Hinblick auf die heterogene Sedimentwechsellagerung im Zittauer Becken (Abschnitt 3.1) eine qualitativ hochwertige und tiefreichende Datengrundlage.

Hinsichtlich des stratigraphischen und lithologischen Detailaufbaus des geologischen Untergrundes erwies sich dabei die schwerpunktmäßig in den 1970er und 1980er Jahren erfolgte systematische Braunkohlenerkundung im Zittauer Raum als vorteilhaft. Im Rahmen der damaligen Untersuchungskampagnen wurden tiefe Erkundungsbohrungen (teils bis zu 400 m Teufe) in einem engen Raster niedergebracht. Darauf aufbauend entwarfen DITTRICH et al. (1988) neben einem stratigraphischen Normalprofil anhand geologischer Schnittdarstellungen auch ein regionalgeologisches Modell für den Großraum Zittau. Dieser Erkundungsbericht ist somit fundamentale Basis für vorliegende Betrachtungen. Hierfür stellte das LfULG dankenswerterweise sowohl den Bericht als auch ein umfangreiches Konvolut der damals erkundungsrelevanten Bohrungen sowie zusätzlicher Schichtenverzeichnisse jüngerer Datums zur Verfügung. Die Vielzahl von insgesamt 137 bereitgestellten Bohrungen war jedoch für einen bestmöglich generalisierten Modellaufbau mit geologisch hinreichender Genauigkeit zunächst ausdünnen. Die Auswahl der in die Modellierung einfließenden Bohrungen erfolgte dabei im Wesentlichen nach den drei Kriterien Bohrteufe, -plausibilität und Dokumentationsqualität. Vor allem die tiefen

und hinsichtlich der Gesteinsansprache detailliert aufgenommenen Bohrungen der Braunkohlenerkundung fanden bevorzugt Eingang. Dem gegenüber blieben sehr flache Bohrungen (< 5 m Teufe), wie z. B. engständige Baugrunduntersuchungen, aufgrund ihres geringen geologischen Erkenntniszugewinns unberücksichtigt. Darüber hinaus wurden auch entsprechend des geologischen Normalprofils von DITTRICH et al. (1988) unschlussige oder unzureichend beschriebene Bohrprofile vernachlässigt. Auf diese Weise wurden 30 geologisch aussagekräftige und repräsentative Bohrungen aus dem LfULG-Bestand (Abb. C-3.4 / Tab. C-3.1) für die Erstellung des geologischen Strukturmodells (vgl. Abschnitt 3.3.1) nach neuestem Kenntnisstand ausgewählt. Zusätzlich fanden die bei der Errichtung der Versuchsanlage abgeteufte Bohrprofile und zugehörigen bohrlochgeophysikalischen Messkurven sowie weitere am Teststand erhobene Parameter (vgl. Abschnitt 3.2.2) Einzug in die Modellerstellung.

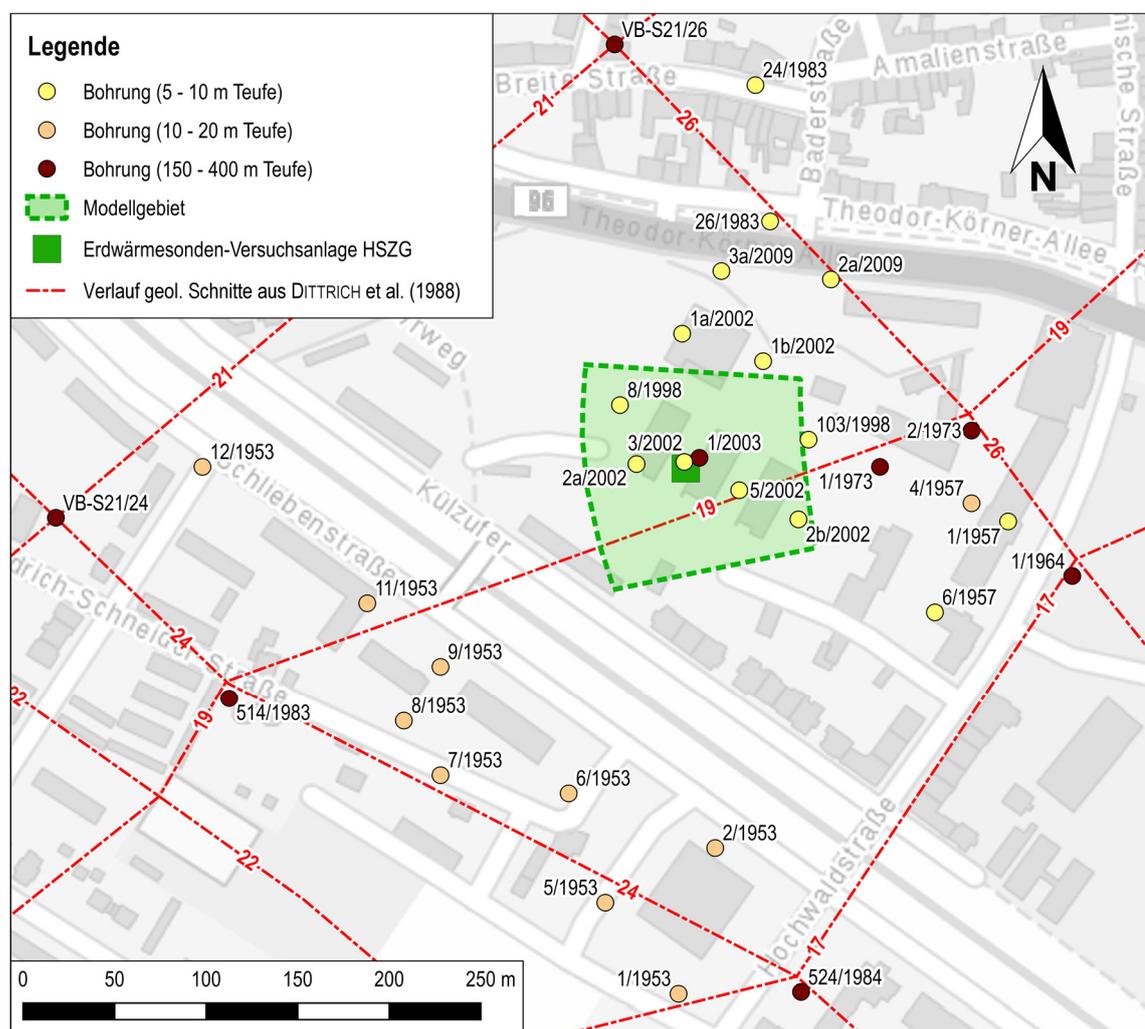


Abb. C-3.4 Eingangsdaten für das geologische Strukturmodell: Genutzte Bohrdaten und geologische Schnittverläufe in Relation zur Lage des gewählten Modellgebiets mit der Erdwärmesonden-Versuchsanlage der HSZG.

Tab. C-3.1 Übersicht der für das geologische Strukturmodell ausgewählten Bohrungen.

Bohrung	AKBEZ (LfULG)	Rechtswert	Hochwert	Endteufe [m u. GOK]	Ansatzhöhe [m NN]
1/1953	B...1....1953	5486360,0	5639420,0	16,3	233,8
1/1957	B...1....1957	5486540,0	5639680,0	10,0	232,8
1/1964	B...1....1964	5486575,0	5639650,0	5,4	232,8
1/1973	B...1....1973	5486470,0	5639710,0	12,0	238,8
1a/2002	B...1....2002	5486362,0	5639783,3	6,1	234,0
1b/2002	B...1....2002	5486406,2	5639768,2	8,5	234,1
1/2003	B...1....2003	5486371,4	5639715,0	172,0	233,0
2/1953	B...2....1953	5486380,0	5639500,0	17,0	233,2
2/1973	B...2....1973	5486520,0	5639730,0	12,0	237,8
2a/2002	B...2....2002	5486337,0	5639711,6	6,1	234,0
2b/2002	B...2....2002	5486425,5	5639681,1	8,0	233,4
2a/2009	B...2a...2009	5486443,2	5639813,1	8,0	234,3
3/2002	B...3....2002	5486363,1	5639712,7	6,1	234,0
3a/2009	B...3a...2009	5486383,4	5639817,7	8,0	234,4
4/1957	B...4....1957	5486520,0	5639690,0	15,0	232,8
5/1953	B...5....1953	5486320,0	5639470,0	10,4	233,8
5/2002	B...5....2002	5486393,1	5639697,2	6,1	234,0
6/1953	B...6....1953	5486300,0	5639530,0	15,2	233,9
6/1957	B...6....1957	5486500,0	5639630,0	10,0	232,4
7/1953	B...7....1953	5486230,0	5639540,0	15,4	234,7
8/1953	B...8....1953	5486210,0	5639570,0	15,6	234,8
8/1998	B.8_0_1...1998	5486328,0	5639744,0	5,5	232,7
9/1953	B...9....1953	5486230,0	5639600,0	15,4	233,9
11/1953	B...11....1953	5486190,0	5639635,0	15,1	233,3
12/1953	B...12....1953	5486100,0	5639710,0	15,2	233,7
24/1983	B...24....1983	5486402,0	5639920,0	7,0	234,7
26/1983	B...26....1983	5486410,0	5639845,0	10,0	234,7
103/1998	B.103_0...1998	5486431,0	5639725,0	6,5	233,2
514/1983	B..514....1983	5486114,6	5639582,4	160,0	234,7
524/1984	B..524....1984	5486426,9	5639421,0	169,9	234,8
VB-S21/24 ⁽¹⁾	-	5486020,0	5639682,0	200,0	233,0
VB-S21/26 ⁽¹⁾	-	5486325,1	5639942,4	200,0	234,8

⁽¹⁾ Virtuelle Bohrungen, generiert als Digitalisat der geologischen Schnittpunkte der Schnittlinien 21/24 bzw. 21/26 (vgl. Abb. C-3.4) aus DITTRICH et al. (1988).

Darüber hinaus ist in Kenntnis der lokalen geologischen Gegebenheiten anhand des vom LfULG bereitgestellten vereinfachten Normalprofils der Grundwasserstockwerke im Großraum Zittau (Tab. C-3.2) davon auszugehen, dass im ausgewählten Modellgebiet nur die beiden Aquifere G1 (saaleglaziale Fluvialbildungen) und ZiC (miozäne Zittauer Schichten C) von Bedeutung sind. Um diese im Modell abzubilden, wurden digitale Geodaten von der interaktiven Karte zur Grundwasserdynamik vom LfULG genutzt. So standen für den quartären Grundwasserleiter (G1) ein Hydroisophypsenplan sowie ergänzend etwa zeitgleich durchgeführte Stichtagsmessungen von insgesamt sechs GW-Messstellen im näheren Umfeld der Versuchsanlage zur Verfügung. Für den tieferliegenden tertiären Aquifer (ZiC) hingegen waren lediglich Stichtagsmessungen von sieben GW-Messstellen in unmittelbarer Nachbarschaft zum Modellgebiet verfügbar (Tab. C-3.3).

Tab. C-3.2 Vereinfachtes Normalprofil der Grundwasserstockwerke im Zittauer Becken (nach LfULG).

Stratigraphie	Grundwasserstockwerk	Messnetz Zittau (Randbereiche)	Messnetz Olbersdorf	Messnetz Zittau (Zentrum / Graben von Zittau)	Messnetz Turow
Quartär	G1e nur Sandlinsen	Weichselzeitlicher Gehängelehm mit Sandlinsen			
	G1	Elsterzeitlicher Geschiebe- mergel/-lehm mit Sandlinsen		Auelehm	
Tertiär	OO	Zittauer Oberflöz, Oberbank			
	HM	Hauptmittel			
	OU	Zittauer Oberflöz, Unterbank			
	ZiC	Zittauer Schichten C			
	ZU	Zittauer Unterflöz			
	ZiB, VBa-Z, VPh-Z	Zittauer Schichten B (Tuffite, Basalt-, Phonolithersatz)			
	ZiA			Zittauer Schichten A	
Kambrium	PGD-Z	Granodioritzersatz			
	PGD	Granodiorit			

Tab. C-3.3 Übersicht verwendeter GW-Messstellen und Stichtagsmessungen.

GW-Stockwerk	Messstellen-ID	Bezeichnung	Rechtswert	Hochwert	Stichtagsmessung	
					Datum	GW-Druckhöhe [m NN]
G1	51549724_1	Olbersdorf, P 8d/97 o, GWM 724	5484850,3	5639906,2	20.04.2016	234,87
	51549728_1	Olbersdorf, P 10a/97 o, GWM 727	5485152,1	5639708,6	20.04.2016	234,57
	51547468	Zittau, 798z/84	5487980,6	5639708,5	20.04.2016	227,76
	51547476	Zittau, 802z/84	5486224,0	5640325,1	26.04.2016	232,03
	51549721	Olbersdorf, P 5/97	5484096,2	5640150,3	20.04.2016	237,79
	5155P00020_1	Turow, Pz-49/46 IV	5489028,9	5640300,4	21.04.2016	225,27
ZiC	51547467	Zittau, 797A2/84	5487233,5	5640233,9	21.04.2016	185,40
	51547478	Zittau, 802/84, unten	5486222,4	5640323,2	21.04.2016	199,75
	51547593	Zittau, 576/85	5486433,0	5638767,2	21.04.2016	233,36
	51547712	Zittau, P 19z/94	5487392,3	5639256,9	21.04.2016	183,01
	51549384	Olbersdorf, 512A2/83	5485274,8	5639447,3	20.04.2016	237,51
	51549541_2	Olbersdorf, P8/86, GWM 542	5485161,5	5639587,9	20.04.2016	234,48
	51549739	Olbersdorf, GP 10/99	5484861,1	5639943,7	20.04.2016	236,41

3.2.2 Datenerhebung modellrelevanter Parameter an der Erdwärmesondenversuchsanlage der HSZG

3.2.2.1 Kurzbeschreibung der Erdwärmesondenversuchsanlage

Zentrales Element des ausgewählten Modellgebiets ist das Erdwärmesondentestfeld der Hochschule Zittau/Görlitz, gelegen zwischen den Häusern Z IVa und Z IVb an der Theodor-Körner-Allee in Zittau. Die Anlage entstammt zwei vorangegangenen Forschungsprojekten (HAIN et al. 2014; KAHNT et al. 2009) und umfasst drei in einem gleichseitigen Dreieck angeordnete Sonden vom Typ PE-Xa 32 x 2,9 mm Doppel-U (EWS 1 bis 3), zwei Temperatur-Kontrollsonden (K-Sonde, TB3-K) sowie eine teiltrückgebaute Direktverdampfer-sonde (TB2). Die Sondenpositionierung illustriert Abb. C-3.5.

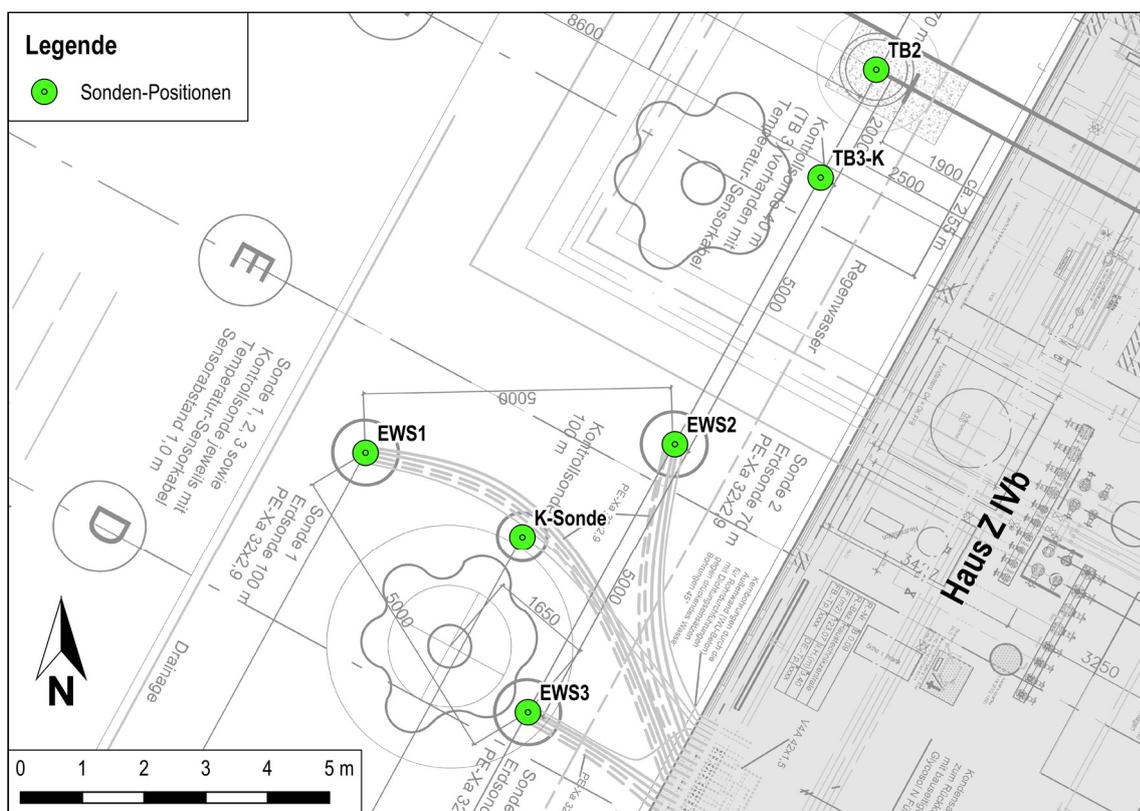


Abb. C-3.5 Positionierung der mit Temperatursensoren ausgestatteten Sondenbohrungen am Versuchsstand der HSZG.

Die Testfeldsonden sind über ihre volle Länge in Abständen von einem Meter mit Temperatursensoren ausgestattet. Im Fall der drei Doppel-U-Sonden (EWS 1 bis 3) sind die verbauten Sensoren innerhalb der Bohrlochhinterfüllung direkt an der Rohr-Außenseite des Sondenrücklaufs angebracht. Die Temperatursensorik erschließt die vertikale Sondenstreckung sowie in Teilen die horizontalen Anbindungsbereiche (Verlegetiefe: 0,6 bis 1,0 m unter GOK). Eine Übersicht zu Sondentiefen und Umfang der jeweils verbauten Messensorik gibt Tab. C-3.4.

Zur Lastbeaufschlagung der Testfeldsonden EWS 1 bis 3 verfügt das Versuchslabor im Haus Z IVb (Abb. C- 3.6) über einen Wärmeerzeuger (Gasbrennwertkessel, max. 132 kW), eine Kompressionskältemaschine (max. 45 kW), einen thermischen Pufferspeicher (750 l) sowie eine Umwälzpumpe (max. 12,6 m³/h). Sämtliche Komponenten sind über ein hydraulisches System miteinander verbunden. Das Anlagendesign ermöglicht die computer-gesteuerte Beaufschlagung einzelner oder auch mehrerer Sonden mit definierten Wärme- oder Kälteleistungen bei individuell regelbaren Betriebsparametern. Die realisierbaren Fluidtemperaturen reichen hierbei von -10 bis +90 °C, um auch betriebstechnische Randbereiche erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen zuverlässig abbilden zu können.

Tab. C-3.4 Übersicht erdseitiger Temperatursensorik der Versuchsanlage.

Bezeichnung	Erläuterung	Sondentiefe [m u. GOK]	Anzahl nutzbarer Temperatursensoren		
			Vertikal	Horizontal	Gesamt
TB3-K	Kontrollsonde DV-Anlage	38	38	10	48
TB2	Teilrückgebaute DV-Sonde	170	169	5	174
EWS 1	Versuchsstand	97	96	12	108
EWS 2	Versuchsstand	68	67	10	77
EWS 3	Versuchsstand	38	37	9	46
Kontrollsonde	Versuchsstand	98	97	9	106
Summe:					559



Abb. C- 3.6 Gebäudeseitige Hauptkomponenten der Versuchsanlage. **Links:** Gasbrennwertkessel. **Mitte:** Kompressionskältemaschine. **Rechts:** Thermischer Pufferspeicher. **Recht unten:** Umwälzpumpe.

3.2.2.2 Messung und Interpretation des natürlichen Temperaturregimes im geologischen Untergrund

Das natürliche Temperaturregime im geologischen Untergrund stellt einen wichtigen Eingangsparameter für die vorliegende Modellierung dar. Um für den Nahbereich der Versuchsanlage diesbezüglich repräsentative Daten zu erheben, galt es, die hierfür notwendigen Temperaturprofilmessungen mithilfe der anlagenseitig verbauten Messsensorik (Abschnitt 3.2.2.1) so zu terminieren, dass künstliche Temperaturbeeinflussungen durch vorangegangene Versuchsdurchführungen auszuschließen waren. Die bereits 2012 erfolgte Außerbetriebsetzung der benachbarten Direktverdampferanlage, die von November 2014 bis Dezember 2017 in standsetzungsbedingt andauernde Inaktivität des Erdwärmesondenversuchsstandes sowie bis September 2019 nur sporadisch durchgeführte Versuche erwiesen sich dabei als günstig.

So wurden unter anderem 2017 mehrere ungestörte Temperaturprofile zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommen (Abb. C-3.7). Anhand dieser zeigt sich, dass die saisonale Temperaturzone am Standort mit ca. 8 m durch eine eher geringe Mächtigkeit charakterisiert ist. Nach der sich anschließenden neutralen Temperaturzone kommt bereits ab einer Teufe von etwa 22 m ein überdurchschnittlicher geothermischer Gradient von im Mittel 12,1 K/100 m zum Tragen. Dieser schwächt sich ab 46 m Teufe durchschnittlich auf 6,1 K/100 m ab. Verglichen mit dem mittleren Temperaturgradienten in Zentraleuropa (ca. 3 K/100 m) weist der Standort Zittau somit eine geothermische Wärmeanomalie auf (GERSCHEL 2018).

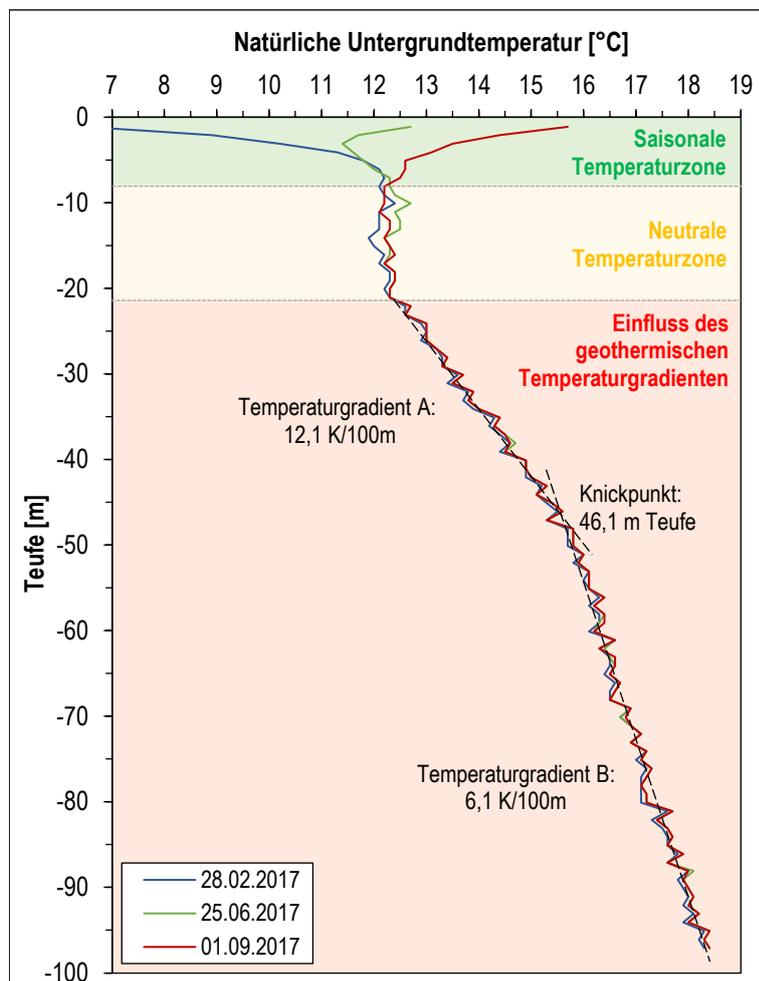


Abb. C-3.7
Natürliches Temperaturregime des geologischen Untergrundes für den Bereich der Erdwärmesondenversuchsanlage (GERSCHEL 2018).

Die möglichen Ursachen hierfür sind vielfältig. So blickt der Standort einerseits auf eine tektono-vulkanogen geprägte Vergangenheit zurück (Abschnitt 3.1). Andererseits ist aufgrund der vorherrschenden großen Gesamtmächtigkeit schlecht wärmeleitender Kohlenflöze lokal von einer Stauung des terrestrischen Wärmestroms auszugehen (Abschnitt 2.1.2). Darüber hinaus könnten auch, wie bereits von DITTRICH et al. (1988) vermutet, aus größeren Tiefen über Kluftsysteme aufsteigende Thermalwässer zum erhöhten Temperaturniveau im Zittauer Untergrund beitragen.

Aufgrund der dargelegten Zusammenhänge erscheinen die geologischen Verhältnisse am Standort generell wenig aussichtsreich für eine saisonale Kältespeicherung. Inwieweit allerdings der erhöhte geothermische Gradient die Gebäudewärmeversorgung mittels Erdwärmesonden begünstigt bzw. ob hier aufgrund des hohen Temperaturniveaus womöglich ab Bohrtiefen von 300 bis 400 m bereits gänzlich auf eine Wärmepumpe verzichtet werden kann, sollte durch weiterführende Arbeiten näher untersucht werden.

3.2.2.3 Messtechnische Präzisierung der Stoffeigenschaften des Wärmeträgerfluids

Die Beaufschlagung der Testfeldsonden (EWS 1 bis 3) mit definierten thermischen Lasten \dot{Q} wird am Versuchsstand der HSZG durch die Regelung von Sondendurchsatz \dot{V} und Sondenvorlauftemperatur T_{in} realisiert. Die computergestützte Leistungssteuerung erfolgt hierbei anhand des in Gleichung C.23 beschriebenen Zusammenhangs.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho_{Fluid,T} \cdot \bar{c}_{p,Fluid} \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (C.23)$$

Neben der permanenten sensorischen Überwachung von Vor- und Rücklauftemperatur sowie Sondendurchsatz erfordert dies auch die Kenntnis nachstehender temperaturabhängiger Stoffwerte des Wärmeträgerfluids:

- Fluidichte $\rho_{Fluid,T}$ am Volumenstromsensor und
- mittlere spez. Wärmekapazität $\bar{c}_{p,Fluid}$ (integrales Mittel für T_{in} und T_{out}).

Für die Parametrierung der im Rahmen der geologischen Modellierung implementierten Erdwärmesondenmodelle werden zusätzlich folgende Stoffeigenschaften benötigt:

- Wärmeleitfähigkeit λ_{Fluid} und
- dynamische Viskosität η_{Fluid} .

Allerdings bestand nach mehreren partiellen Wiederbefüllungen der Versuchsanlage im Zuge von Instandsetzungsarbeiten Ungewissheit bezüglich des Wasser-Ethylenglykol-Mischungsverhältnisses und somit auch hinsichtlich der genannten Stoffeigenschaften. Zur Optimierung der Leistungssteuerung des Versuchsstandes sowie zur korrekten Modellparametrierung waren daher zunächst die Fluideigenschaften messtechnisch zu präzisieren.

Methodisch wurde dies mithilfe von Dichte-Messungen an einer Zapfprobe des Sondenfluids bei variierenden Fluidtemperaturen umgesetzt. Da das hierfür genutzte Aräometer der Firma Amarell auf eine Oberflächenspannung von 75 Nm/m bei 20 °C justiert und somit nicht vollumfänglich für den vermessenen Temperaturbereich geeignet ist, galt es,

die Messwerte nach DIN 12791-3:1983-06 bestmöglich zu korrigieren (Meniskus-, Temperatur- und Oberflächenspannungskorrektur). Die hierfür benötigte temperaturabhängige Oberflächenspannung des Wasser-Ethylenglykol-Gemisches konnte aus HOKE & CHEN (1991) und AMOOEY & FAZLOLLAHNEJAD (2014) abgeleitet werden. Durch Überlagerung der korrigierten Messkurve mit Wasser-Ethylenglykol-Dichtekurven aus der Stoffdatenbank LibSecRef (KRETZSCHMAR et al. 2018) konnte schließlich iterativ auf das tatsächliche Mischungsverhältnis des Wärmeträgerfluids geschlossen werden (Abb. C-3.8). Demnach handelt es sich um ein Gemisch mit einem Ethylenglykolanteil von 41,5 Gew.-% (= 38,95 Vol.-% bei 20 °C). Basierend auf dieser Grundlage konnten dem Sondenfluid weitere relevante temperaturabhängige Materialparameter (spez. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, dynamische Viskosität) aus der Stoffdatenbank LibSecRef (KRETZSCHMAR et al. 2018) zugeordnet werden (Abb. C-3.9).

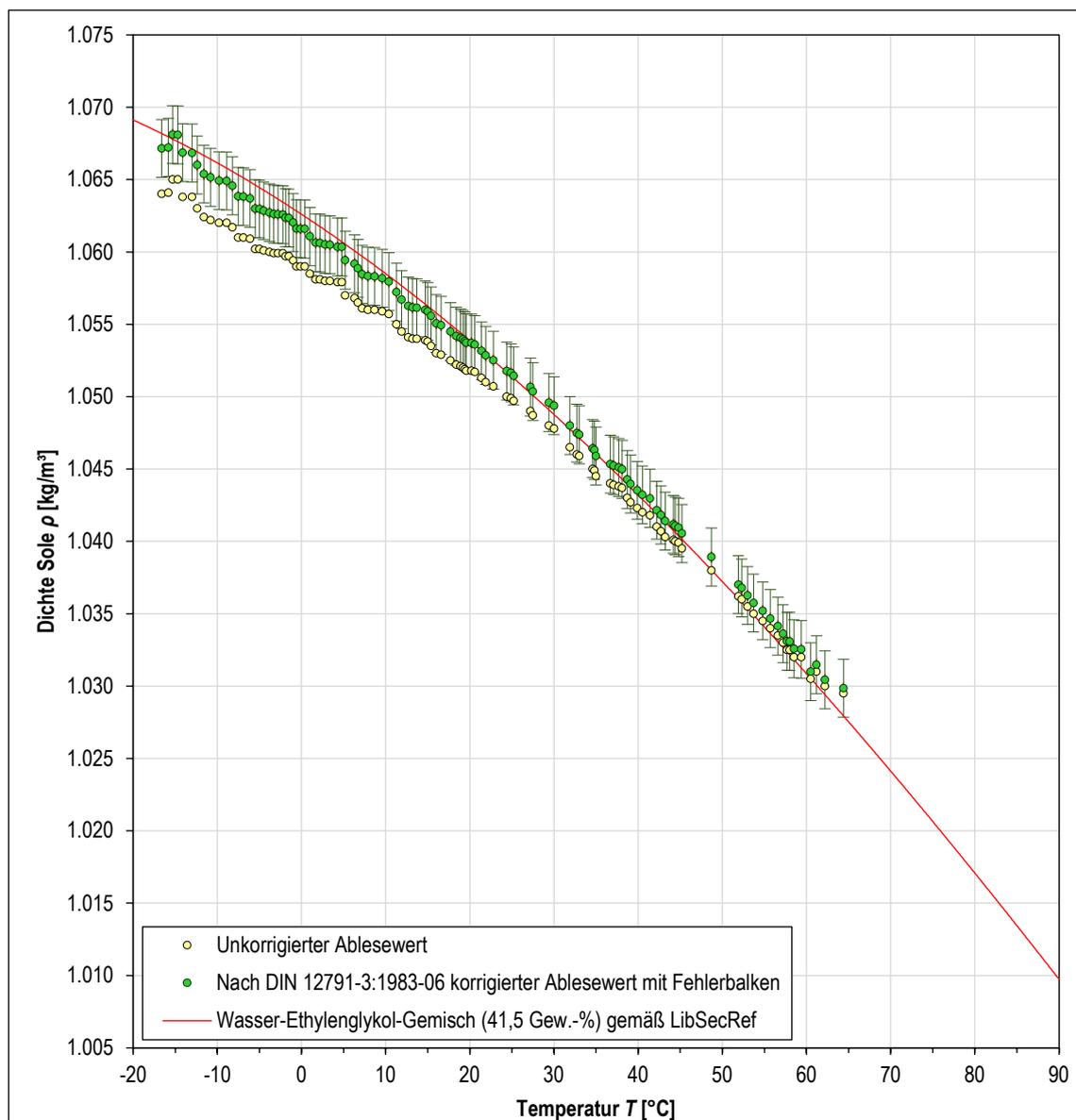


Abb. C-3.8 Gemessene und nach DIN 12791-3:1983-06 korrigierte temperaturabhängige Dichte-Werte des in der Versuchsanlage genutzten Wärmeträgerfluids sowie zugeordnete Stoffwert-Kennlinie aus LibSecRef (KRETZSCHMER et al. 2018).

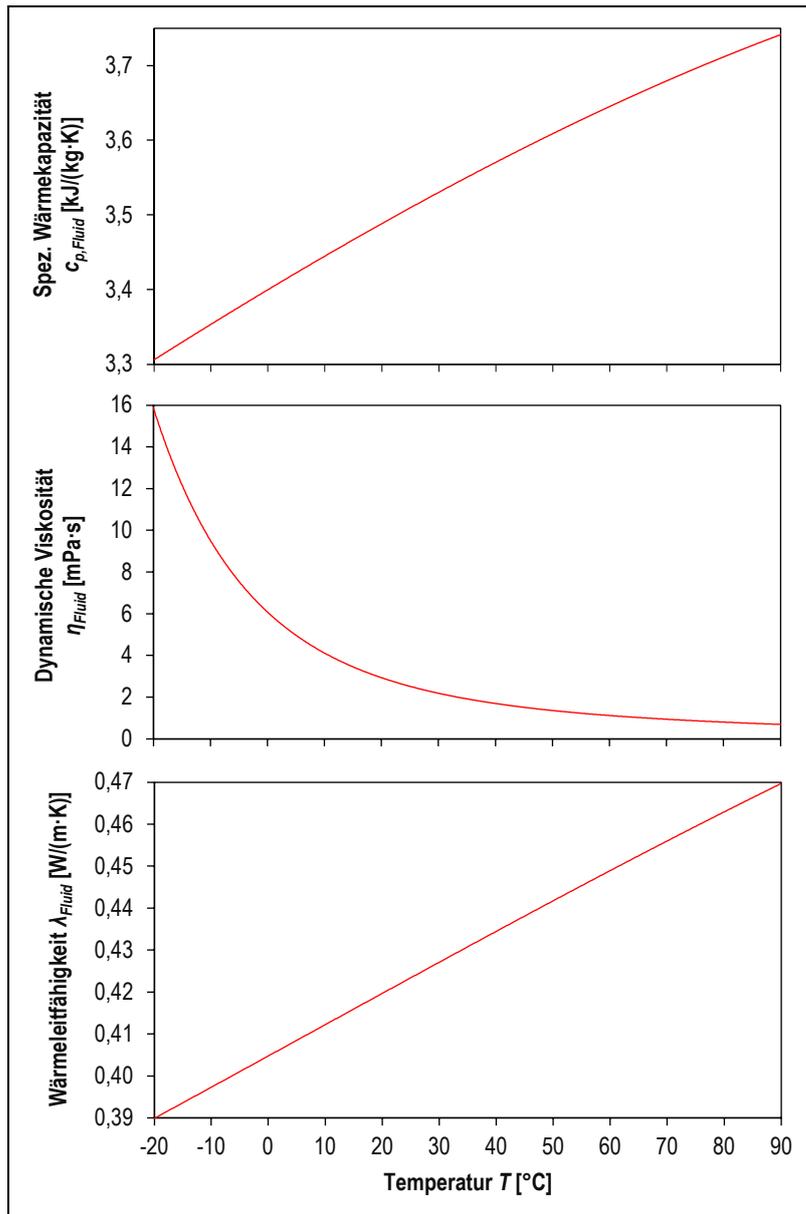


Abb. C-3.9
Temperaturabhängige Stoffwert-Kennlinien der spezifischen Wärmekapazität, dynamischen Viskosität und Wärmeleitfähigkeit für ein 41,5 Gew.-%iges Wasser-Ethylenglykol-Gemisch, wie es in der Versuchsanlage genutzt wird
(Datenbasis: LibSecRef, KRETZSCHMER et al. 2018).

3.2.2.4 Ergebnisse durchgeführter Thermal Response Tests

Die Durchführung von Thermal Response Tests an den Erdwärmesonden der HSZG-Versuchsanlage verfolgte mehrere Zielstellungen. So galt es in erster Linie, das zu erstellende geologische Untergrundmodell mithilfe der TRT-Ergebnisse hinsichtlich wärmeleitungsrelevanter Gesteinseigenschaften zu präzisieren. Gleichzeitig war mit den aufgezeichneten TRT-Aufheizkurven (Abb. C-3.10) eine Grundlage zur Modellkalibrierung zu schaffen. Des Weiteren diente die Analyse thermisch angeregter Temperaturprofile, welche direkt nach TRT-Abschluss geloggt wurden, der Tiefenlokation geologischer Schichtgrenzen sowie der Detektion von Grundwasserleitern (vgl. Abschnitt 3.2.2.5).

Darüber hinaus war durch wiederholte Versuchsdurchführung zu prüfen, inwieweit TRT-Ergebnisse im Hinblick auf natürliche Temperaturschwankungen in der saisonalen Zone

zu unterschiedlichen Jahreszeiten reproduzierbar sind. Die diesbezüglichen Auswertungsergebnisse fasst Tab. C-3.5 zusammen. Es ist festzustellen, dass die sondenspezifisch gemessenen effektiven Gesteinswärmeleitfähigkeiten λ_{eff} im Rahmen wiederholter TRT-Durchführungen an den Sonden EWS 1 und EWS 2 nur unwesentliche, innerhalb der Messfehlertoleranz befindliche Unterschiede (0,2 % bzw. 1,8 %) aufweisen. Hinweise auf ein saisonales Abhängigkeitsverhalten sind somit nicht zu erkennen.

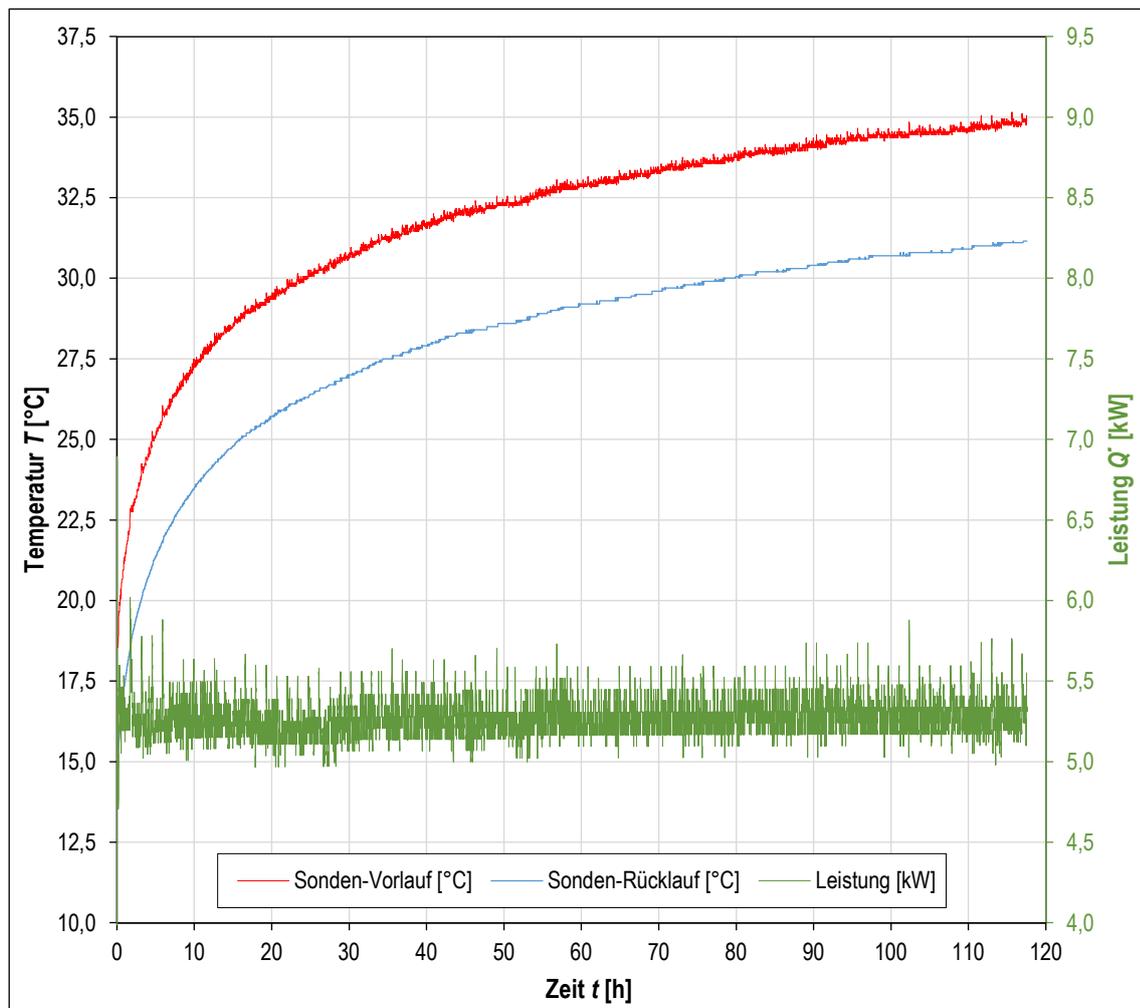


Abb. C-3.10 Exemplarische Aufheizkurve für den TRT an der Testfeldsonde EWS 1 (17.-22.03.2020).

Anders stellt sich dies bei den ermittelten thermischen Bohrlochwiderständen R_b dar. Hier sind Abweichungen von 9,3 % (EWS 1) bzw. 16,8 % (EWS 2) zu verzeichnen. Gemäß Formel C.11 ist es plausibel, dass dies auf saisonal bedingte Unterschiede der natürlichen Untergrundtemperatur zurückzuführen ist. Dass sich aber bereits geringe Temperaturvariationen um 0,2 K (EWS 1) bzw. 0,6 K (EWS 2) derart deutlich auswirken, war nicht zu erwarten und sollte – auch im Hinblick auf die Auslegungspraxis – durch weiterführende Untersuchungen näher betrachtet werden.

Aus genannten Gründen fanden die mittels TRT ermittelten thermischen Bohrlochwiderstände in vorliegender Modellierung keine Berücksichtigung. Stattdessen wurden diese anhand der gesetzten Modellparameter softwaregestützt berechnet.

Tab. C-3.5 Ergebnisse der durchgeführten TRTs an den Testfeldsonden EWS 1 und EWS 2.

Parameter	Symbol	Einheit	TRTs an EWS 1		TRTs an EWS 2	
			23.-27.09.2019	17.-22.03.2020	04.-08.02.2020	21.-25.09.2020
Sondenlänge	H	[m]	96,3	96,3	67,3	67,3
Ungest. Untergrundtemperatur ⁽¹⁾	T_b	[°C]	15,3	15,1	14,0	14,6
Versuchsdauer	t	[h]	99,17	117,56	100,00	102,03
Mittlere Heizleistung während Versuchsdurchführung	\dot{Q}	[W]	5.348,5	5.274,1	6.291,8	6.324,1
Eff. Gesteinswärmeleitfähigkeit ⁽¹⁾	λ_{eff}	[W/(m·K)]	1,452	1,449 (-0,21 %)	1,698	1,667 (-1,83 %)
Therm. Bohrlochwiderstand ⁽¹⁾	R_b	[K/(W/m)]	0,097	0,088 (-9,28 %)	0,113	0,094 (-16,81 %)

⁽¹⁾ Mittel über die Sondentiefe.

3.2.2.5 Thermisch angeregte Temperaturprofile und bohrlochgeophysikalischer Messungen

Die Durchsicht der Bohrdokumentation des Erdwärmesondenversuchsstandes sowie der mittlerweile stillgelegten Direktverdampferanlage (KAHNT et al. 2009) belegte deutliche, geologisch im Hinblick auf die direkte Nähe nicht begründbare Diskrepanzen zwischen den aufgenommenen Schichtprofilen. Diese waren zudem kaum mit dem fundierten regional-geologischen Modell von DITTRICH et al. (1988) bzw. früheren hochauflösenden Bohrungen in diesem Gebiet vereinbar. Um jedoch bei der hier thematisierten 3D-Modellierung im Nahbereich der Versuchsanlage auf eine möglichst realitätsnahe Lithostratigraphie zurückgreifen zu können, war zunächst eine Überarbeitung der vorliegenden Schichtenverzeichnisse erforderlich. Zu diesem Zweck wurden die Profilaufnahmen der Bohrunternehmen anhand vorliegender Bohrlochgeophysik-Messdaten sowie thermisch angeregter Temperaturprofile hinsichtlich ihrer Gesteinsabfolge plausibilisiert und die Tiefenlage einzelner geologischer Schichtgrenzen präzisiert.

Die dazu herangezogenen bohrlochgeophysikalischen Messdaten von KLINK (2014) dienten ursprünglich zur Überprüfung des Zustandes der damals bereits stillgelegten bzw. funktionsuntüchtigen Direktverdampfersonde TB2 (Abb. C-3.5). Die eigentlichen Messfahrten erfolgten dabei nach dem Teilrückbau der DV-Sonde innerhalb ihres äußeren, undichten Stahlrohrs bzw. der teilweise lückenhaften Hinterfüllung. Dieser verbleibende Bohrlochausbau beeinflusste und verzerrte dabei naturgemäß auch die geophysikalischen Messergebnisse (Abb. C-3.11), wodurch Aussagen zu den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im umgebenden Untergrund nur in begrenztem Maße möglich sind.

Zur Präzisierung von Gesteinsansprache und Tiefenlokation geologischer Schichtgrenzen wurden daher zusätzlich fünf tiefenaufgelöste Temperaturabklingprofile hinzugezogen. Diese konnten in den ersten acht Stunden nach Abschluss eines TRTs an der Testfeldsonde EWS1 im September 2019 aufgezeichnet werden (Abb. C-3.11).

3.3 Modellaufbau mittels Finite-Elemente-Software FEFLOW

3.3.1 Geologisches Strukturmodell

Im Wissen um die regionalgeologischen Verhältnisse des Zittauer Beckens bzw. der hierzu vorhandenen geologischen Fachdaten (vgl. Abschnitte 3.1/3.2.1) lässt sich in Anlehnung an DITTRICH et al. (1988) für das Areal des Modellgebiets (Abb. C-3.4) das in Tab. C-3.6 generalisierte Normalprofil ableiten.

Demnach bildet der kambrische Rumburger Granit inkl. seines Zersatzhorizontes die älteste geologische Einheit (γR) an der Modellbasis. Nach einem stratigraphischen Hiatus – welcher im Modellgebiet (außerhalb des Zittauer Grabens gelegen) auch das Basalfloz sowie die Zittauer Schichten A umfasst – folgen direkt die untermiozänen Zittauer Schichten B (ZiB), bestehend aus Tonen und Schluffen mit sandig-kiesigen Einlagerungen, sowie das Zittauer Unterfloz (ZU), welches durch jeweils einen initialen bzw. terminalen Tonhorizont abgegrenzt ist. Im Hangenden schließt sich der mächtige Sedimentkomplex der Zittauer Schichten C an (ZiC), welcher wechsellagernd Tone und Schluffe mit geringmächtigen Braunkohlenlagen sowie Sand- und Kieslinsen umfasst. Die auflagernden Einheiten des Zittauer Oberflozes (ZO) – ebenfalls mit einem Liegendton einleitend – bilden erneut eine wechselhafte Abfolge. Im Modellgebiet lässt sie sich in insgesamt neun Flözbankgruppen sowie entsprechende tonig-schluffige Zwischenmittel gliedern, wobei die unteren vier Braunkohlenflöze und ihre Begleitschichten zur Unterbank bzw. die oberen fünf Flöze als Oberbank zusammengefasst werden. Das sie trennende stratigraphische „Hauptmittel“ (ZM4) ist im Modellgebiet nur in geringer Mächtigkeit ausgebildet. Nach einer erneuten Schichtlücke bilden saaleglaziale Fluvialbildungen (fHo-fS 3 / fw-fS 3), holozäne Ablagerungen des Auelehms (lfHo) und anthropogene Aufschüttungen (Aufschgtg.) sowie rezente Bodenbildung (MB) den quartären Abschluss der Sedimentfolge im Modellgebiet. Tektonische Störungen oder Versätze hingegen sind für das, aus rechentechnischen Gründen relativ klein gewählte, Modellgebiet nicht nachweisbar.

Die für den dreidimensionalen Modellaufbau unverzichtbare Tiefenlokation lithologischer Schichtgrenzen erfolgte für die Außenbereiche des Modellgebietes mit hinreichender Genauigkeit anhand der verifizierten Bohrprofile des LfULGs sowie der geologischen Schnittdarstellungen aus DITTRICH et al. (1988) (Abb. C-3.4). Dem gegenüber erforderten die für den Nahbereich der Versuchsanlage in Abschnitt 3.2.2.5 beschriebenen Unsicherheiten zum geologischen Kenntnisstand zunächst eine Präzisierung der lokalen Teufenlage der ausgehaltenen Horizonte. Hierbei ermöglichte erst die Gesamtschau von bohrlochgeophysikalischen Messkurven und tiefen aufgelösten Temperaturabklingprofilen unter Berücksichtigung des modellspezifischen Normalprofils (Tab. C-3.6) sowie von Schichtenverzeichnissen benachbarter Bohrungen die Ableitung des in Abb. C-3.11 dargestellten, teufenkorrigierten geologischen Profils.

Tab. C-3.6 Lithostratigraphisches Normalprofil für das gewählte Modellgebiet.

Chronostratigraphie		Geol. Symbol	Lithostratigraphische Einheit	GWL / Flöz	Lithologie / Petrographie	Modellkörper	
Quartär	Holozän	MB	„Mutterboden“	-	Meist anthropogen verändert (u. a. Ackerboden, Wurzelboden)	1	
		Aufschtg.	Aufschüttung	-	Mittelsand, grobsandig, schwach feinkiesig, Ziegelreste	2	
		lfHo	Fluviatile Bildungen	-	Schluff, sandig, tonig, schwachkiesig (Auelehm)	3	
	Pleistozän Saale-glazial	fw-fS 3	Fluviatile Bildungen	1312	Kiese & Sande, z. T. schluffig (nicht trennbarer Fluviatilkomplex)	4	
		fHo-fS 3		1311			
Tertiär	Unteres Miozän	ZiOF	Flözbankgruppe 9	ZO9	Das Zittauer Oberflöz (ZiOF) stellt eine Wechsellagerung von Ton/Schluff- und Braunkohlenlagen dar. Innerhalb des Modellgebiets ist es mit neun Flözbankgruppen vertreten, welche wie folgt unterteilt sind: ZiOF: Oberbank (ZO5 bis ZO9)	5	
			Zwischenmittel 8	ZM8		6	
			Flözbankgruppe 8	ZO8		7	
			Zwischenmittel 7	ZM7		8	
			Flözbankgruppe 7	ZO7		9	
			Zwischenmittel 6	ZM6		10	
			Flözbankgruppe 6	ZO6		11	
			Zwischenmittel 5	ZM5		12	
			Flözbankgruppe 5	ZO5		13	
			Zwischenmittel 4	ZM4 (=HM)		ZiOF: Das Hauptmittel (ZM4) ist geprägt durch zahlreiche Sand- und Kies-Linsen	14
			Flözbankgruppe 4	ZO4		ZiOF: Unterbank (ZO1 bis ZO4)	15
			Zwischenmittel 3	ZM3			16
			Flözbankgruppe 3	ZO3			17
			Zwischenmittel 2	ZM2	18		
			Flözbankgruppe 2	ZO2	19		
			Zwischenmittel 1	ZM1	20		
			Flözbankgruppe 1	ZO1	21		
			Liegendton ZiOF	Lgd. T	Ton / Schluff mit kohligem Anteil		22
			ZiC	Zittauer Schichten C	-		Ton / Schluff
					Zy1,3,4	Geringmächtige Braunkohlenlagen in Ton und Schluff mit Sandanteil	
					-	Sand- / Kies-Linsen	
			ZiUF	Hangendton ZiUF	Hgd. T	Kohliger Ton bzw. Schluff	25
				Zittauer Unterflöz	ZU	Schwach bis ungeschichtete Kohle	26
Liegendton ZiUF	Lgd. T	Kohliger Ton / Schluff		27			
ZiB	Zittauer Schichten B	-	Tone / Schluffe mit Sand / Kies-Einlagerungen	28			
Kambrium	γR	Granitzersatz	-	Kaolinisierter, zersetzter Granit	29		
		Rumburger Granit	-	Unverwitterter Granit			

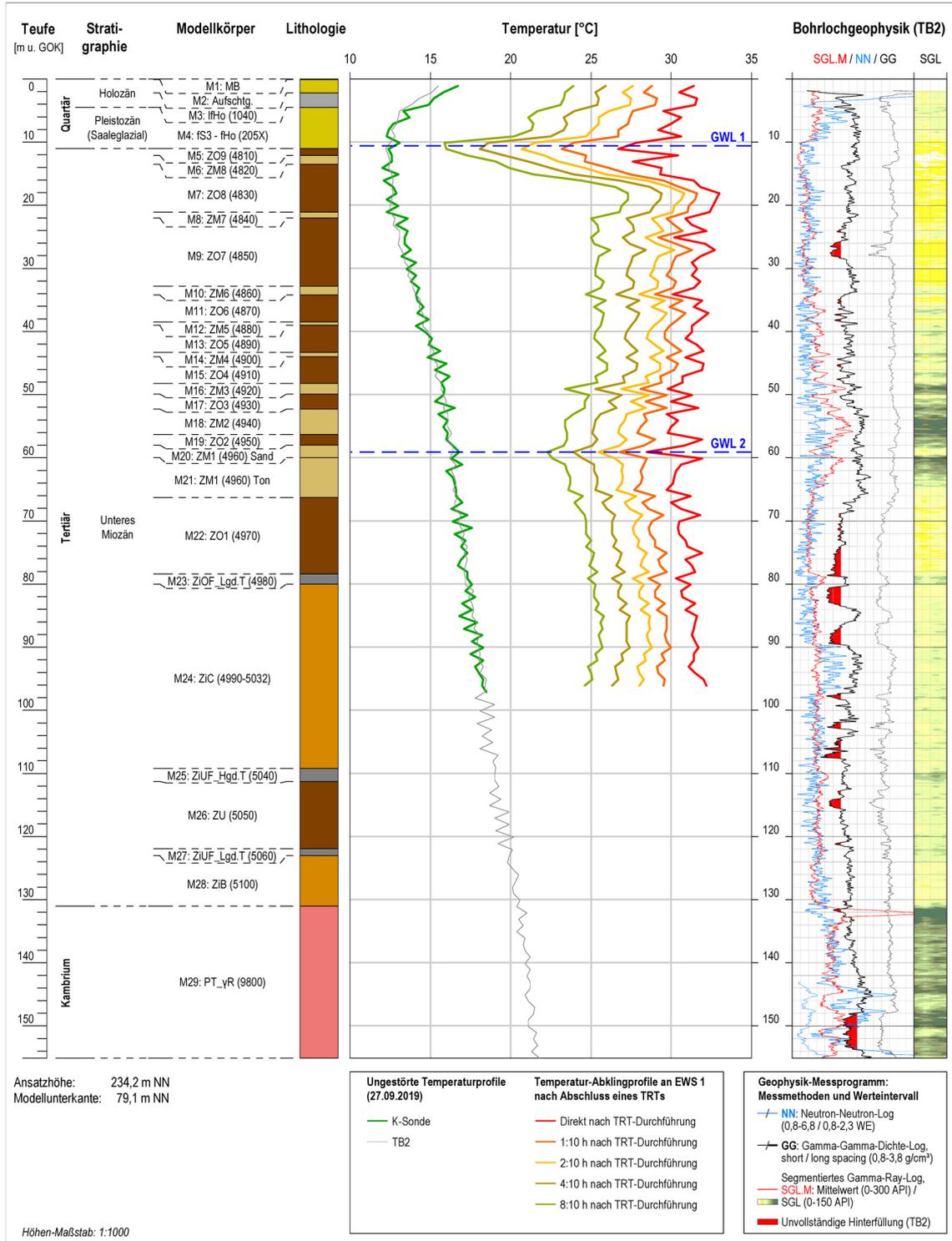


Abb. C-3.11 Teufenkorrigiertes geologisches Profil für den Nahbereich des Versuchsstandes, gegenübergestellt mit den tiefen aufgelösten Temperaturabklingprofilen und Bohrlochgeophysikmessungen.

Das auf Basis der zusammengetragenen Fachdaten final erstellte 3D-Modell (Abb. C-3.12) umfasst ein Gebiet von 12.880 m² bei einer Vertikalerstreckung von etwa 155 m. Das zentral gelegene Erdwärmesondentestfeld hat dabei einen Abstand von etwa 55 m zur Nord-, Süd- und Westgrenze sowie 64 m zur Ostgrenze des Modellgebiets.

Der betrachtete Ausschnitt des geologischen Untergrundes gliedert sich in Anlehnung an das lokale Normalprofil in insgesamt 29 Modellkörper (Tab. C-3.6), die aus rechen-technischen Gründen in mehrere Layer unterteilt sind. Lithologisch nicht eindeutig voneinander trennbare Schichtkomplexe, wie beispielsweise die Zittauer Schichten B und C, wurden hierbei jeweils zu einem Modellkörper zusammengefasst. Der dreidimensionale Verlauf lithologischer Grenzen konnte im Rahmen des Modellierungsprozesses durch Kriging-Interpolation positionsspezifischer Schichtgrenzen der herangezogenen geologischen Profile und Schnitte realisiert werden. Die resultierenden Lagerungsverhältnisse zeigen eine überwiegend parallele Schichtenlagerung mit geringem Einfallswinkel. Die Einfallsrichtung ist hierbei chronostratigraphisch beeinflusst (Quartär: W; Tertiär: S-SEE; Kambrium: E). Der Höhenverlauf der Modelloberkante konnte realitätsnah mittels dankenswerterweise vom LfULG zur Verfügung gestellten DGM2 (Digitales Geländemodell, Auflösung: 2 m) umgesetzt werden. Insgesamt setzt sich das geologische Modell aus 247.042 Rechenknoten und 479.224 Elementen (dreiseitige Prismen) zusammen. Im Hinblick auf die Ergebnisqualität erfolgte im Sondennahbereich eine entsprechend feinere Modelldiskretisierung (Abb. C-3.12).

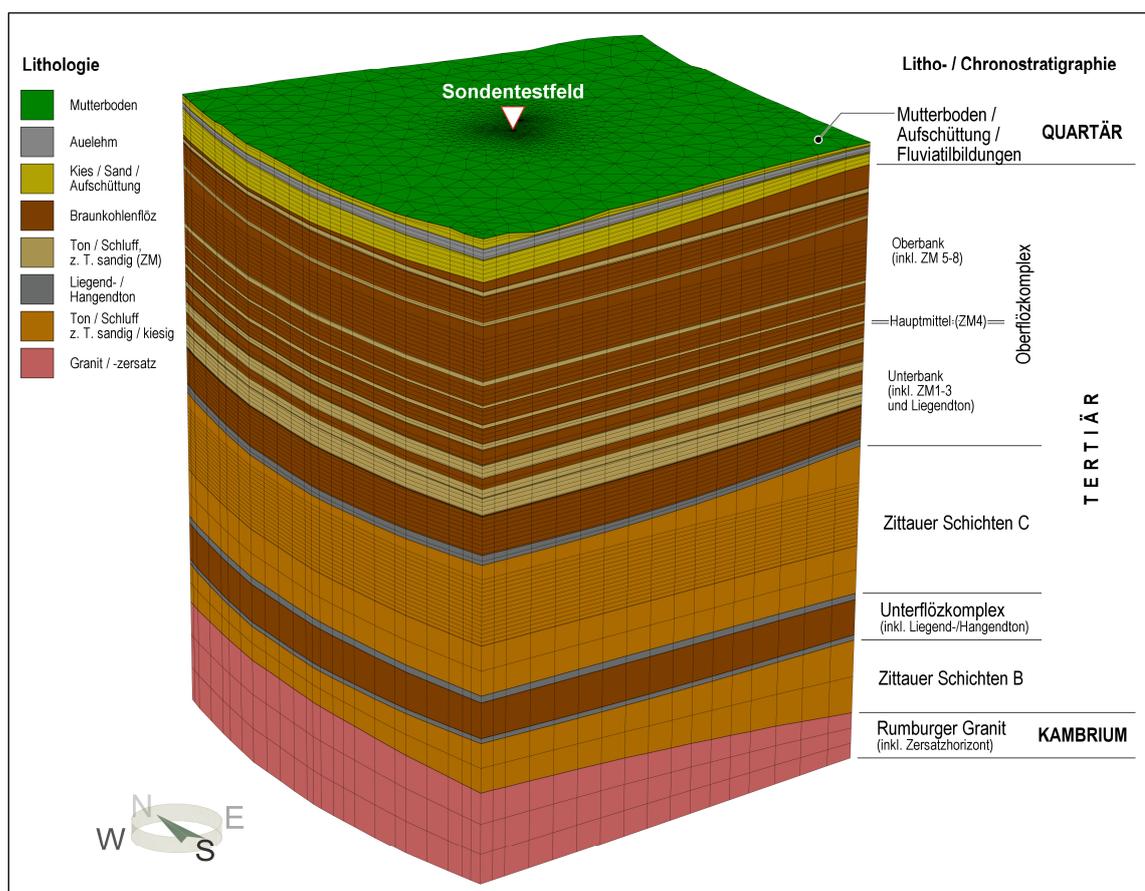


Abb. C-3.12 Dreidimensionaler Aufbau und Diskretisierung des FEFLOW-Modells inkl. Positionierung des implementierten Versuchsstandes.

3.3.2 Grundwasserströmungsmodell

Die im Modellgebiet für den Tiefenbereich der Testfeldsonden relevanten Grundwasserlevel beschränken sich auf die Stockwerke G1 und ZiC (vgl. Tab. C-3.2). Das überdies ortsabhängig ebenfalls als Aquifer fungierende Hauptmittel (HM) ist im betrachteten Gebiet nur sehr geringmächtig ausgebildet und daher hinsichtlich seiner grundwasserleitenden Funktion vernachlässigbar. Auf eine detaillierte Berücksichtigung unter Sondenfuß von EWS 1 (längste Testfeldsonde) befindlicher Grundwasserstockwerke (z. B. ZiB) wurde im Hinblick auf den Modellzweck gleichermaßen verzichtet.

Da der für G1 verfügbare Grundwassergleichenplan von 2016, trotz weiterreichender Datengrundlage (Messstellennetz), etwa 35 m westlich des Modellgebietes mit der 230 m NN Isohyse endet, wurde dieser auf Grundlage der in Abschnitt 3.2.1 aufgeführten Datenbasis in Ostrichtung – und damit flächendeckend für das Modellgebiet – erweitert. In Ermangelung eines Gleichenplans für das tiefergelegene Grundwasserstockwerk ZiC war dieser allein auf Basis von Stichtagsmessungen (Tab. C-3.3) an den sieben in direkter Nähe zum Modellgebiet befindlichen ZiC-Pegeln zu erstellen.

Eine überlagerte Illustration der im Bereich des Modellgebiets resultierenden Hydroisohypsen für die Grundwasserstockwerke G1 und ZiC ist Abb. C-3.13 zu entnehmen. Diese zeigt für G1 eine ostwärtige Fließrichtung mit geringem hydraulischem Gradienten ($9,48 \cdot 10^{-5} < i < 1,23 \cdot 10^{-4}$). Die Grundwassergleichen des ZiC-Stockwerkes hingegen weisen bei einer NE-Strömungsrichtung mit $i \approx 1,2 \cdot 10^{-2}$ ein im Vergleich deutlich größeres Fließgefälle auf.

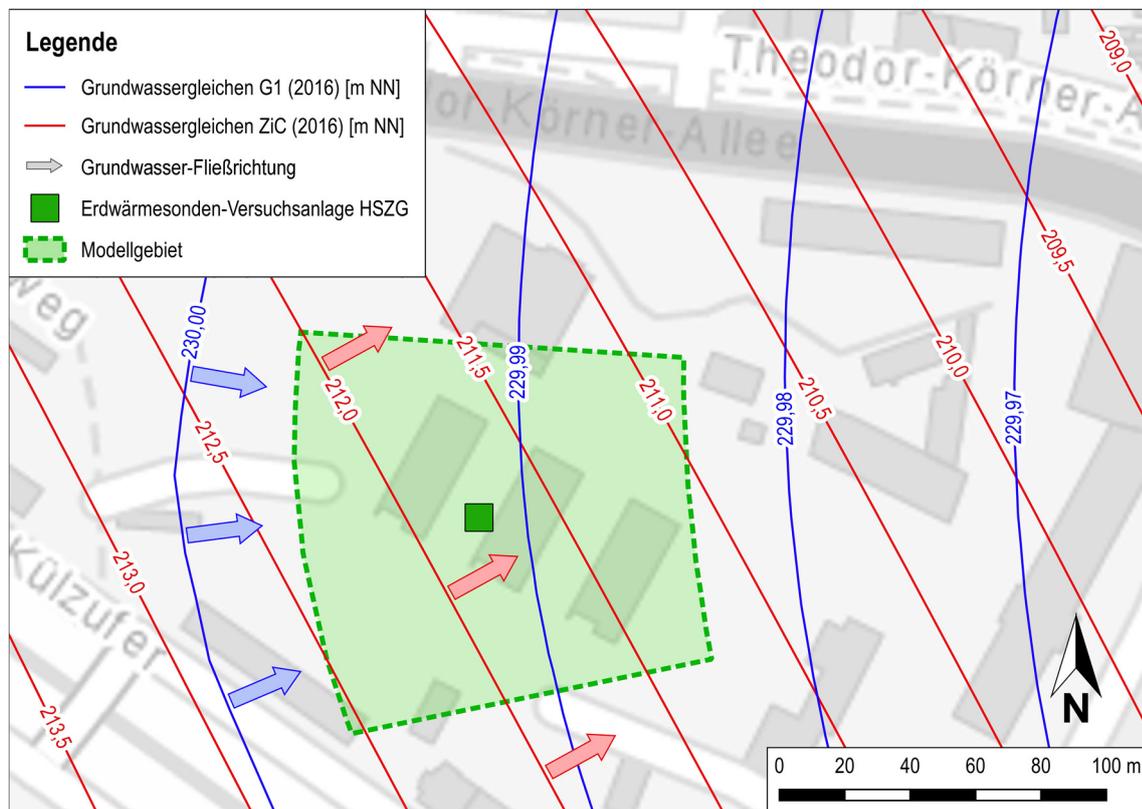


Abb. C-3.13 Überlagerung der Hydroisohypsen für die Grundwasserstockwerke G1 sowie ZiC mit lokal resultierenden Fließrichtungen als Pfeildarstellung (Datenbasis: LfULG, vgl. Abschnitt 3.2.1).

Aufgrund von potenziell tektonisch (z. B. geringdimensionale Kluftsysteme) oder stratigraphisch (z. B. Auftreten grobkörniger Linsenstrukturen) angelegten vertikalen Wasserwegsamkeiten, ist davon auszugehen, dass sich der hydraulische Einfluss von ZiC im Areal der Versuchsanlage bei einer GW-Druckhöhe von etwa 211,75 m NN (22,45 m u. GOK; Abb. C-3.13) bis auf das Niveau der Flözbankgruppe 7 erstreckt (ZO7; Modellkörper 9; Abb. C-3.11; Tab. C-3.6). Infolge dieser in höherliegende Gesteinsschichten durchschlagenden Druckhöhe von ZiC fungiert zudem der sandige Abschnitt des Zwischenmittels ZM1 als zusätzlicher Grundwasserleiter („GWL 2“ in Abb. C-3.11). Die hier – ebenso wie im darüberliegenden quartären G1 („GWL 1“ in Abb. C-3.11) – durch GW-Strömung verursachte Konvektion führt dabei zu einer deutlich verbesserten thermischen Regeneration nach der TRT-bedingten Aufheizung des Untergrundes. Die in Abb. C-3.11 dargestellten tiefenaufgelösten Temperaturabklingprofile bilden diese Effekte deutlich ab. Dem gegenüber zeugt der markante Rückgang der thermischen Regenerationsfähigkeit in der Tiefenlage zwischen 12 und 22 m u. GOK von einer geringeren Wassersättigung des Gesteins oberhalb des Druckspiegels von ZiC. Durch die hydraulische Isolierung dieser geologischen Einheiten auch gegen das Hangende durch das als wasserundurchlässig anzusehende Zwischenmittel ZM8, kann gleichzeitig auch der obere quartäre Aquifer G1 diesen Teufenbereich nicht speisen. Der folglich ungesättigte Gebirgszustand in diesem Bohrungsabschnitt begründet somit dessen beobachtbare verminderte Wärmeleiteigenschaften.

3.4 Modellkalibrierung

3.4.1 Modellvorkalibrierung mittels tiefenaufgelöster

Profilmessungen der natürlichen Untergrundtemperatur

Für Tiefenbereiche, deren ungestörtes Temperaturregime maßgeblich vom geothermischen Gradienten G geprägt ist (ca. 84 % der Modellmächtigkeit; Abb. C-3.14), erfolgte die Gebirgskalibrierung – d. h. eine Kalibrierung der einzelnen Modellkörper hinsichtlich wärmetransportrelevanter Gesteinseigenschaften – unter Zuhilfenahme tiefenaufgelöster Profilmessungen der natürlichen Untergrundtemperatur. Hierbei fand der durch Formel C.1 (Abschnitt 2.1.2) beschriebene Zusammenhang Anwendung. Demnach wird der geothermische Tiefengradient neben der lokal vorherrschenden Wärmestromdichte \dot{q} ebenso von der Gesteinswärmeleitfähigkeit λ_{Gestein} bestimmt. Wie die in Abb. C-3.14 dargestellten Temperaturprofile verdeutlichen, führt dies am Standort Zittau aufgrund der geologischen Lagerungsverhältnisse und der damit verbundenen Abfolge teilweise sehr unterschiedlicher Gesteinswärmeleitfähigkeiten zu charakteristischen tiefen- bzw. schichtabhängigen Schwankungen des geothermischen Gradienten.

Ziel der Modellvorkalibrierung war es, diesen natürlichen Temperaturverlauf im Ergebnis stationärer Modellrechnungen möglichst realitätsnah abzubilden. Als Referenz dafür dienten mehrere zu unterschiedlichen Zeitpunkten an Testfeldsonden aufgenommene Tiefenprofile der ungestörten Untergrundtemperatur (Abb. C-3.14). Um die volle vertikale Modellerstreckung abdecken zu können, wurden dabei auch Profilmessungen der teilerückgebauten Direktverdampfer-sonde TB2 herangezogen (Abb. C-3.5).

Im stationären Modell erfolgte zunächst die temporäre Festlegung der natürlichen Untergrundtemperatur an der Modellunterkante (ca. 155 m u. GOK) sowie in der saisonalen und neutralen Temperaturzone (0 bis ca. 25 m u. GOK) mittels Dirichlet-Randbedingungen. So konnte auf die Vorgabe der Wärmestromdichte in Form einer Neumann-Randbedingung verzichtet werden. Nach der Implementierung des Grundwasserströmungsmodells (Abschnitt 3.3.2) durch geeignete Materialparameter und Hydraulikrandbedingungen war es in einem iterativen Kalibrierungsprozess möglich, die modellkörperspezifischen Gesteinswärmeleitfähigkeiten sukzessive vom Liegenden zum Hangenden innerhalb plausibler Grenzen (Literaturwerte sowie Datenabfrage LfULG) so anzupassen, dass die berechnete Modelltemperatur nach erfolgreicher Vorkalibrierung im Bereich von 25 bis 155 m u. GOK in der avisierten Profilkurve resultiert (Abb. C-3.14).

Der Austausch der Temperaturrandbedingung 1. Art an der Unterkante des fertig vorkalibrierten Modells durch eine Neumann-Randbedingung ergab überdies, dass in diesem Tiefenbereich (ca. 155 m u. GOK) eine Wärmestromdichte von 93,8 mW/m² erforderlich ist, um ein identisches Modellergebnis zu erzielen. Dieser am Standort Zittau gegenüber der durchschnittlichen kontinentalen Wärmestromdichte (65 mW/m² nach STÖBER & BUCHER 2020) um ca. 44 % gesteigerte Wert ist gemeinsam mit dem erhöhten geothermischen Gradienten durch die in Abschnitt 3.2.2.2 beschriebenen möglichen Ursachen erklärbar.

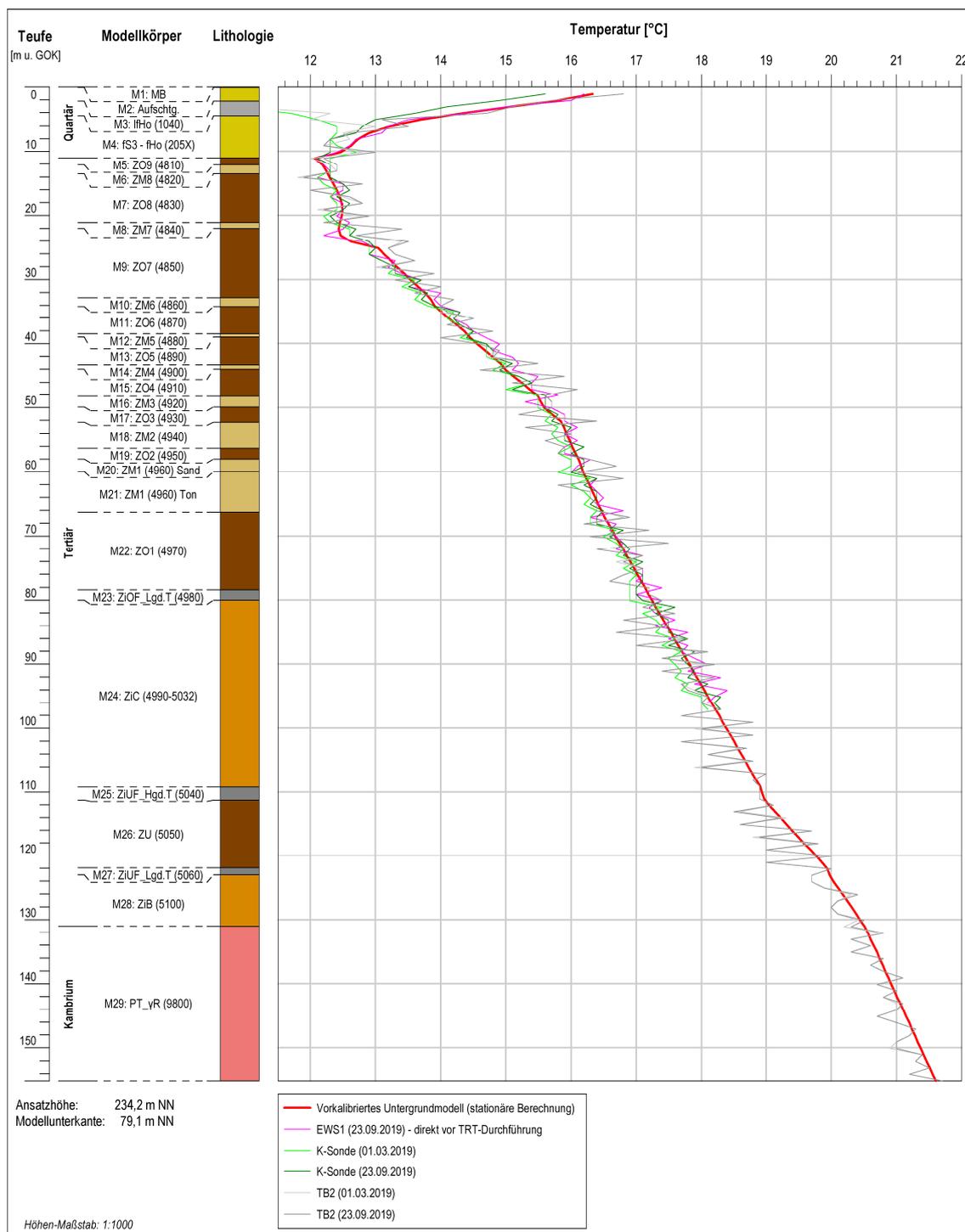


Abb. C-3.14 Natürliches Temperaturregime im Untergrund des Sondentestfeldes (Profilmessungen an unterschiedlichen Sonden) sowie Veranschaulichung von schichtabhängigen Schwankungen des geothermischen Gradienten ab 25 m Tiefe gegenübergestellt mit dem ungestörten Temperaturverlauf des vorkalibrierten FEFLOW-Modells.

3.4.2 Bohrloch- und Gebirgskalibrierung anhand von TRT-Messdaten

An der Versuchsanlage (Abschnitt 3.2.2.1) aufgezeichnete TRT-Messdaten bilden die Grundlage für die zweite Phase der Modellkalibrierung. Zielstellung war es, nach Abschluss des iterativen Parametrierungs- bzw. Kalibrierungsprozesses, die zeitliche Temperaturentwicklung des Sondenvor- und -rücklaufes während einer TRT-Durchführung am Versuchsstand im Rahmen instationärer Modellrechnungen reproduzieren zu können. Zu diesem Zweck erfolgte zunächst die Implementierung der Testfeldsonden in das bestehende Untergrundmodell mittels Erdwärmesondenrandbedingung. Hierbei fand der transiente, numerische Sondenmodellansatz nach BAUER (2011) Verwendung. Die für eine TRT-Simulation notwendige Vorgabe der beaufschlagten Sondenleistung in Verbindung mit dem Sondendurchsatz wurde im Modell durch Zeitreihen der real gemessenen Versuchsparameter umgesetzt. Anlagenbedingt aufgetretene periodische Leistungsschwankungen während der TRT-Durchführung mussten für die Modellrechnung allerdings unter Einhaltung der Energiebilanz geglättet werden, um unnötige Rechenzeiten zu vermeiden (Abb. C-3.15; Abb. C-3.16).

Die für eine Modellkalibrierung beste Eignung weisen die aufgezeichneten Aufheizkurven des im September 2019 an Sonde EWS1 durchgeführten Thermal Response Tests auf (Abb. C-3.16). Zu begründen ist dies einerseits mit der größeren vertikalen Modellabdeckung von EWS1 im Vergleich zu EWS2 oder EWS3, andererseits war besagtem TRT zudem auch eine längere Inaktivität des Sondentestfeldes vorausgegangen, womit unmittelbar vor Testbeginn von vollkommen ungestörten Untergrundtemperaturverhältnissen auszugehen war. Dieses natürliche Temperaturregime vom 23.09.2019 (Abb. C-3.14) wurde dem Modell bereits im Zuge der Vorkalibrierung durch geeignete Temperaturrandbedingungen aufgeprägt (Abschnitt 3.4.1). Es diente somit in der zweiten Kalibrierungsphase als Modellstarttemperatur. Allerdings erforderten die instationären Modellrechnungen dieser Kalibrierungsphase eine Entfernung der Temperaturrandbedingungen im oberen Teil des Modells (saisonale und neutrale Tiefenzone), um auch hier eine durch den Sondenbetrieb beeinflusste Wärme- oder Kälteentwicklung im geologischen Untergrund realitätsnah abbilden zu können. Die Temperaturrandbedingung an der Modellunterkante war hiervon nicht betroffen, weil diese selbst zum Fuß der tiefsten Testfeldsonde (EWS1) einen ausreichend großen Abstand aufweist.

Da sich im Verlauf eines TRTs neben der Beschaffenheit des durchteuften Gebirges auch der Bohrlochausbau (Materialeigenschaften, Geometrie) der betreffenden Erdwärmesonde in nicht vernachlässigbarem Maße auf die zeitliche Entwicklung der Sondenfluidtemperaturen auswirkt, war vor der finalen Gebirgskalibrierung zunächst eine separate Bohrlochkalibrierung vorzunehmen. Diese umfasste eine iterative Bestimmung unbekannter Bohrlochgrößen. Im Wesentlichen handelte es sich hierbei um die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Hinterfüllmaterials sowie den U-Rohr-Abstand. Während letzterer die Temperaturspreizung zwischen Sondenvor- und -rücklauf beeinflusst, sind Anstieg und Krümmung der Aufheizkurve zu Beginn eines TRTs stark von den erstgenannten thermischen Eigenschaften der Bohrlochhinterfüllung abhängig. Der Umstand, dass die Fluidtemperaturentwicklung bei einem TRT in den ersten Minuten bis Stunden (fallabhängig) noch nicht durch die Gesteinseigenschaften des umliegenden Gebirges, sondern

primär durch den Bohrlochausbau geprägt ist, gewährleistet hierbei die angestrebte Trennung zwischen Bohrloch- und Gebirgskalibrierung bei Nutzung der identischen Kalibrierungsgrundlage.

Eine Gegenüberstellung der real gemessenen sowie nach erfolgter Bohrlochkalibrierung simulierten Temperaturentwicklung von Sondenvor- und -rücklauf für den im September 2019 an EWS1 durchgeführten TRT ist in Abb. C-3.15 dargestellt. Der ohne Gebirgeinfluss für die Kalibrierung nutzbare Zeitraum umfasste bei Sonde EWS1 unter den gewählten Versuchsbedingungen ca. 150 min ab Start der Testdurchführung. Sämtliche im Vorfeld bekannte sowie im Rahmen der Bohrlochkalibrierung ermittelte Bohrlochparameter der Sonde EWS1 sind in Tab. C-3.7 zusammengefasst. Die Parametrierung lässt sich ohne relevanten Änderungsbedarf auch auf EWS2 anwenden. Einzig für EWS3 konnte mangels ausreichender TRT-Datengrundlage keine Bohrlochkalibrierung vorgenommen werden, sodass die pauschale Übernahme der aufgeführten Parametrierung bei dieser Testfeldsonde mit einer gewissen Unsicherheit einhergeht.

Die iterativ bestimmte Wärmeleitfähigkeit ($0,84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) und Wärmekapazität ($3,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$) der Bohrlochhinterfüllung (EWS1 und EWS2) zeugt von einem hohen Bentonitanteil mit geringer oder fehlender Quarzmehlbeimischung. Entgegen der vorliegenden Bohrdokumentation handelt es sich bei dem verbauten Verfüllbaustoff demnach – zumindest größtenteils – um ein klassisches Verpressmaterial ohne thermisch verbesserte Eigenschaften. Der iterativ bestimmte U-Rohr-Mittenabstand a_{hor} liegt mit 40 mm unter dem mittels Abstandshaltern angestrebten Wert von 60,1 mm. Es ist anzunehmen, dass die vorgesehenen Abstandshalter durch Reibung beim Sondereinbau im Bohrloch zusammengeschoben worden und so ihrer Funktion nicht gerecht werden konnten.

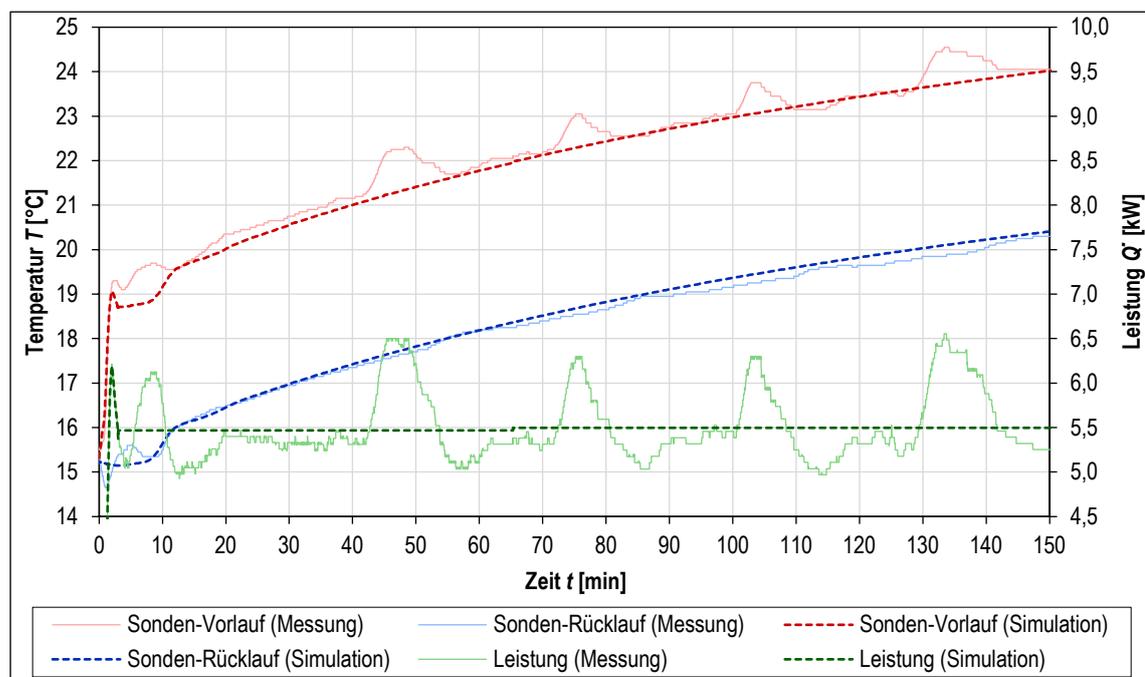


Abb. C-3.15 Gegenüberstellung der real gemessenen Aufheizkurven von Sondenvor- und -rücklauf mit den Simulationsergebnissen nach erfolgter Bohrlochkalibrierung für die ersten 150 min des am 23.09.2019 durchgeführten TRTs an EWS1 sowie Darstellung des gemessenen und für die Modellrechnung geglätteten Verlauf der aufgeprägten Sondenleistung.

Tab. C-3.7 Parametrierung der im Modell implementierten Testfeldsonden.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Maßstabsgerechte Zeichnung
Bohrlochdurchmesser	$d_{Bohrloch}$	152	mm	
Rohrdurchmesser	d_{Rohr}	32	mm	
Rohrwandstärke	s_{Wand}	2,9	mm	
U-Rohr-Mittenabstand waagrecht ⁽¹⁾	a_{hor}	40,0	mm	
U-Rohr-Mittenabstand diagonal ⁽¹⁾	a_{diag}	56,6	mm	
WLF Sondenmaterial	λ_{EWS}	0,36	W/(m·K)	
WLF Bohrlochhinterfüllung ⁽¹⁾	$\lambda_{Verf\u00fcllung}$	0,84	W/(m·K)	
WLF Sondenfluid ⁽²⁾	λ_{Fluid}	0,426	W/(m·K)	
Vol. Wärmekapazität Hinterfüllung ⁽¹⁾	$c_{v,Verf\u00fcllung}$	3,2	MJ/(m ³ ·K)	
Vol. Wärmekapazität Sondenfluid ⁽²⁾	$c_{v,Fluid}$	3,7	MJ/(m ³ ·K)	
Dyn. Viskosität Sondenfluid ⁽²⁾	η_{Fluid}	$2,25 \cdot 10^{-3}$	kg/(m·s)	
Dichte Sondenfluid ⁽²⁾	ρ_{Fluid}	1.049	kg/m ³	
Sondentyp	Doppel-U			
EWS Berechnungsmodell	instationär, numerisch (AL-KHOURY et al. 2005; AL-KHOURY & BONNIER 2006; BAUER 2011)			

¹⁾ im Zuge der Bohrlochkalibrierung bestimmte Parameter

²⁾ Festlegung der Fluideigenschaften gemäß Abschnitt 3.2.2.3 sowie unter Berücksichtigung des Temperaturbereichs während der TRT-Durchführung

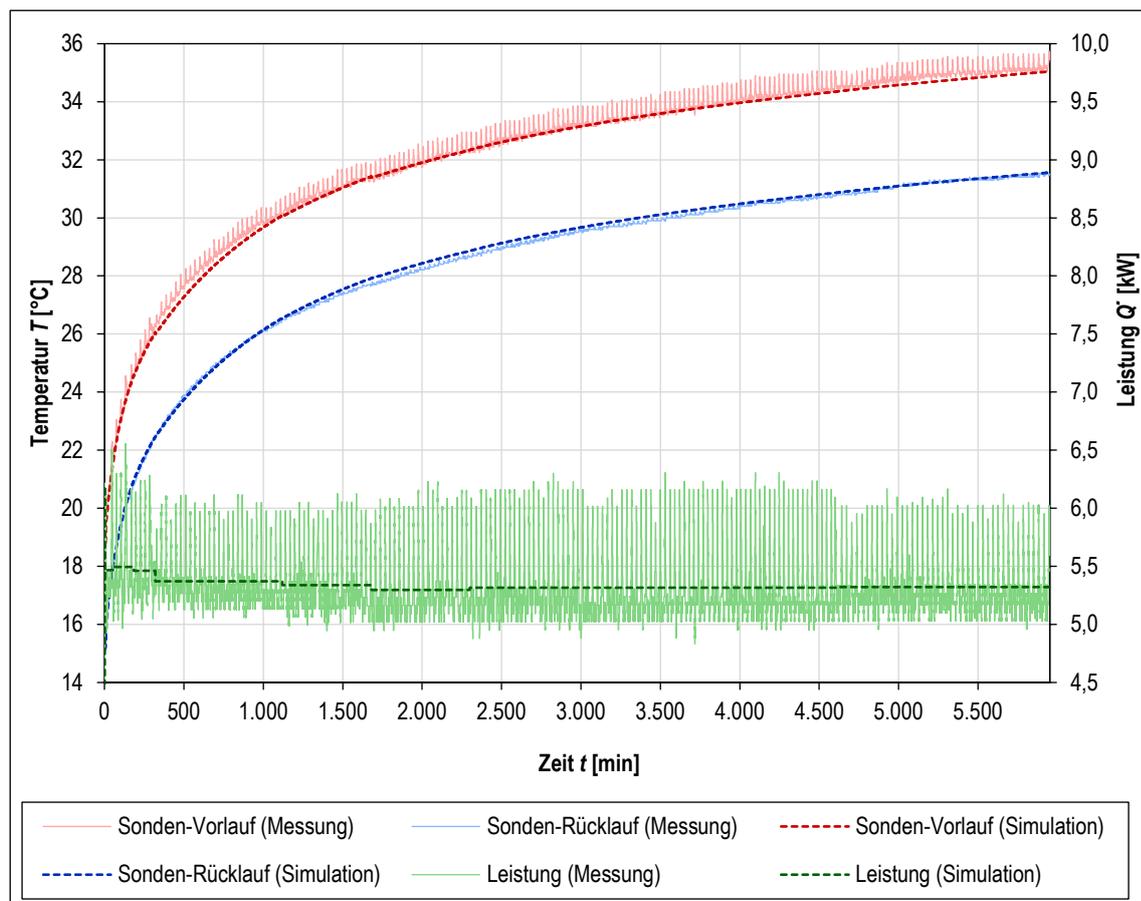


Abb. C-3.16 Gegenüberstellung der real gemessenen Aufheizkurven von Sondenvor- und -rücklauf mit den Simulationsergebnissen nach erfolgreicher Gebirgskalibrierung für den am 23.09.2019 durchgeführten TRT an EWS1 sowie Darstellung des gemessenen und für die Modellrechnung geglätteten Verlauf der aufgeprägten Sondenleistung.

Der Bohrlochkalibrierung folgte eine abschließende Gebirgskalibrierung, welche unter anderem die noch ausstehende Zuordnung geeigneter Gesteinswärmeleitfähigkeiten für Modellkörper der saisonalen und neutralen Tiefenzone beinhaltete. Des Weiteren erfolgte eine Feinjustierung der Wärmekapazität sämtlicher Modellkörper, auch wenn dieser Gebirgsparameter im Vergleich zur Gesteinswärmeleitfähigkeit nur einen sehr geringen Einfluss auf das Modellergebnis (TRT-Aufheizkurve) ausübt und somit durch eine gewisse Unschärfe charakterisiert ist. Darüber hinaus ermöglichte die letzte Phase der Modellkalibrierung ebenso leichte Anpassungen hydraulisch wirksamer Gesteinseigenschaften, insbesondere im Tiefenbereich der beiden Grundwasserleiter.

Eine Gegenüberstellung der an EWS1 gemessenen und im vollständig kalibrierten Modell berechneten TRT-Aufheizkurven ist in Abb. C-3.16 dargestellt. Die dem geologischen Modell im Ergebnis des Kalibrierungsprozesses final zugrundeliegende Parametrierung ist überdies nachstehender Tab. C-3.8 zu entnehmen.

Tab. C-3.8 Parametrierung des geologischen Modells im Ergebnis des Kalibrierungsprozesses (Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätswerte wurden anhand der jeweiligen effektiven Porosität rechnerisch in einen Fluid- und einen Feststoffanteil aufgesplittet).

Modellkörper	Geol. Symbol	Wärmeleitfähigkeit λ_{Gestein} [W/(m·K)]	Vol. Wärmekapazität c_v [MJ/(m ³ ·K)]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]		Effektive Porosität n_{eff} [-]
				horizontal	vertikal	
1	MB	0,4	2,000	1,0E-05	2,0E-06	0,10
2	Aufschtg.	1,0	2,000	5,0E-04	1,7E-04	0,20
3	IfHo (1040)	1,8	2,000	1,0E-06	1,0E-07	0,05
4	fS3 - fHo (205X)	2,0	2,200	5,0E-04	1,7E-04	0,20
5	ZO9 (4810)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
6	ZM8 (4820)	2,0	2,800	5,0E-08	5,6E-09	0,08
7	ZO8 (4830)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
8	ZM7 (4840)	1,8	2,400	4,0E-04	6,7E-05	0,13
9	ZO7 (4850)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
10	ZM6 (4860)	1,5	2,400	7,2E-04	1,2E-04	0,10
11	ZO6 (4870)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
12	ZM5 (4880)	1,8	2,400	5,0E-08	5,6E-09	0,08
13	ZO5 (4890)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
14	ZM4 (4900)	2,0	2,400	4,0E-04	4,4E-05	0,08
15	ZO4 (4910)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
16	ZM3 (4920)	2,0	2,400	5,0E-06	6,3E-07	0,10
17	ZO3 (4930)	0,6	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
18	ZM2 (4940)	2,0	2,400	5,0E-06	6,3E-07	0,08
19	ZO2 (4950)	1,5	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
20	ZM1 (4960)	2,0	2,400	2,5E-05	8,3E-06	0,15
21		2,0	2,500	5,0E-08	5,6E-09	0,08
22	ZO1 (4970)	1,5	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
23	ZiOF_Lgd.T (4980)	1,8	2,500	5,0E-09	5,0E-10	0,08
24	ZiC (4990-5032)	1,6	2,300	1,0E-07	1,3E-08	0,08
25	ZiUF_Hgd.T (5040)	3,1	2,500	5,0E-09	5,0E-10	0,08
26	ZU (5050)	0,9	3,475	5,0E-06	6,3E-07	0,13
27	ZiUF_Lgd.T (5060)	3,0	2,500	5,0E-09	5,0E-10	0,10
28	ZiB (5100)	1,4	2,100	5,0E-08	6,3E-09	0,08
29	PT_γR (9800)	2,1	2,600	1,0E-08	1,0E-09	0,05

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte anhand thermo-hydraulischer Modellrechnungen der analytische Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und realisierbarer spezifischer Entzugsleistung für kleine Erdwärmesondenanlagen (Ein-Sonden-Szenario) präzisiert und somit der ursprüngliche Ansatz von SCHELENZ (2017) weiter qualifiziert werden. Im Ergebnis zeigt sich überdies, dass Konvektion innerhalb grundwasserführender Gesteinsschichten bei Filtergeschwindigkeiten über $2 \cdot 10^{-7}$ m/s den dominanten Wärmetransportmechanismus darstellt. Ab diesem Durchströmungsgrad ist die spezifische Sondenentzugsleistung demnach nur noch in äußerst geringem Maße von der konduktionsrelevanten Gesteinswärmeleitfähigkeit abhängig. Eine Sensitivitätsanalyse ergab darüber hinaus, dass nicht nur die ungestörte Untergrundtemperatur, sondern auch Bohrlochparameter, wie Sondendurchsatz, U-Rohr-Abstand und Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochhinterfüllung mit zunehmender Filtergeschwindigkeit einen wachsenden Einfluss auf die spezifische Sondenentzugsleistung ausüben und somit bei der Untersuchung und Formulierung analytischer Zusammenhänge stets Berücksichtigung finden sollten. Die dargelegten Erkenntnisse bilden des Weiteren die Grundlage für ein anknüpfendes Forschungsprojekt mit der Zielstellung, bestehende händische Verfahren (z. B. VDI 4640-2:2019-06) zur Auslegung kleiner Erdwärmesondenanlagen (max. fünf Sonden, Wärmepumpenheizleistung ≤ 30 kW) dahingehend zu ergänzen, dass bei vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand auch für diese am häufigsten vertretene Anlagengröße eine Berücksichtigung grundwasserbedingter Konvektion erfolgen kann. Die sich daraus potenziell ergebende Möglichkeit, das erdseitige Wärmetauschersystem bei vorhandener Grundwasserströmung entsprechend kleiner zu dimensionieren, würde dazu beitragen, Amortisationszeiten von Erdwärmesondenanlagen zu verkürzen und so ihre Konkurrenzfähigkeit gegenüber primärenergetisch ineffektiveren Systemen wie Luftwärmepumpen zu steigern.

Gemäß HUBER et al. (2014) kann eine Berücksichtigung grundwasserbedingter Konvektion in praxisüblichen Modellen zur Sondenfeldauslegung, die den geologischen Untergrund zu einem Einphasen-Medium (Feststoff) vereinfachen (z. B. Earth Energy Designer), alternativ auch durch den Gebrauch entsprechend gesteigerter (effektiver) Gesteinswärmeleitfähigkeiten erfolgen. Inwieweit dieser Lösungsansatz allerdings auch für größere Erdwärmesondenanlagen mit kombiniertem Heiz- und Kühlbetrieb anwendbar ist, wurde im Zuge numerischer Modellrechnungen für eine fiktive Referenzanlage geprüft. Hierbei zeigt sich, dass die betrachteten Szenarien im Einphasen-Modell mit gesteigerter Gesteinswärmeleitfähigkeit bei reinem Heizbetrieb in den ersten Betriebsmonaten hinsichtlich der prognostizierten Quellentemperaturentwicklung hohe Ähnlichkeit zu den äquivalenten Szenarien des Zweiphasen-Modells mit vollumfänglicher Grundwasserströmungssimulation aufweisen. Mit einsetzendem Kühlbetrieb weichen die Temperaturprognosen der gegenübergestellten Modellansätze jedoch bereits im ersten Betriebsjahr deutlich voneinander ab. Ursächlich hierfür sind thermische Speichereffekte im Einphasen-Modell, die so im Tiefenbereich eines Grundwasserleiters real nicht auftreten würden. Die simulative Abbildung grundwasserbedingter Konvektion durch gesteigerte (effektive) Gesteinswärmeleitfähigkeiten ist demnach bei der Auslegung von Erdwärmesondenanlagen nur bedingt zur Prognose der Sondenfluidtemperaturen geeignet. Insbesondere für größere Anlagen

mit kombiniertem Heiz- und Kühlbetrieb besteht im Hinblick auf die festgestellten Abweichungen die Gefahr einer Unterdimensionierung.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt bestand im Aufbau eines detaillierten thermo-hydraulischen 3D-Modells des geologischen Untergrundes im Nahbereich der Erdwärmesondenversuchsanlage der HSZG am Standort Zittau. Durch das so geschaffene Simulationswerkzeug besteht für künftige Forschungsarbeiten am Sondenteststand die Möglichkeit, geplante Testläufe vorab virtuell durchzuführen, um geeignete Versuchsparameter zu spezifizieren oder erforderliche thermische Regenerationszeiten zu bemessen. Im Zuge der für den Modellierungsprozess erforderlichen Datenerhebung konnte zudem messtechnisch belegt werden, dass der Standort Zittau eine geothermische Wärmeanomalie aufweist. Diese erschwert einerseits Kältespeicherung im geologischen Untergrund, birgt andererseits aber auch erhöhtes Potenzial für Heizanwendungen. So sollten weiterführende Arbeiten prüfen, inwieweit im Stadtgebiet von Zittau bereits ab Bohrtiefen von 300 bis 400 m (mitteltiefe Geothermie) im Hinblick auf die zu erwartenden Quellentemperaturen gänzlich auf den Einsatz erdgekoppelter Wärmepumpen bei der Gebäudetemperierung verzichtet und somit ein Beitrag zur energiepolitisch angestrebten Primärenergie-Einsparung geleistet werden könnte.

Literaturverzeichnis

- AL-KHUORY, R. & BONNIER, P. G. (2006): Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: Transient. – *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **67**: 725-745.
- AL-KHUORY, R.; BONNIER, P. G. & BRINGREVE, R. B. J. (2005): Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. – *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **63**: 988-1013.
- AMOOEY, A. A. & FAZLOLLAHNEJAD, M. (2014): Study on Surface Tension of Binary Mixtures of Poly (Ethylene Glycol) in Water and Poly (Propylene Glycol) in Ethanol and its Modeling Using Neural Network. – *Iran. J. Chem. Eng.*, **11** (1): 19-29.
- BAUER, D. (2011): Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern. – veröff. Diss.: 121 S.; Universität Stuttgart.
- BMWi, BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. – Schöne Drucksachen GmbH: 86 S.; Berlin.
- BRAUSE, H. (1988): Beiträge zur Geodynamik des Saxothuringikums. – *Geoprofil*, **2**: 88S.; Freiberg.
- BRAUSE, H. (1989a): Bewegungsschritte bei der Bildung des Berzdorfer Beckens. – *Freib. Forsch.-H.*, **C 343**: 26-35.
- BRAUSE, H. (1989b): Miozäne tektonische Bewegungen in der SE-Lausitz. – *Wiss.-Techn.-Inf.d. (WTI)*, **30**: 31-34.
- DIN 4023:2006-02, Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen.
- DIN 4049-1:1954-03, Gewässerkunde, Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen – Teil 1: Quantitativ.
- DIN 12791-3:1983-06, Laborgeräte aus Glas – Dichte Aräometer – Teil 3: Gebrauch und Prüfung.
- DIN 18130-1:1998-05, Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche.
- DIERSCH, H.-J. G. (2014): FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. – Springer-Verlag: 996 S.; Berlin, Heidelberg.
- DITTRICH, P.; STEDING, D.; RAITHEL, E.; HOFFMANN, R.; MARKMANN, N.; HORTENBACH, R. et al. (1988): Vorratsberechnung: Braunkohlenerkundung Zittau 1988.– unveröff. Ber., VEB GFE Freiberg.
- ESKILSON, P. & CLAESON, J. (1988): Simulation model for thermally interacting heat ex
- GERSCHEL, A. (2012): Systemvergleich ausgewählter analytischer Simulationsprogramme für Erdwärmesonden - Earth Energy Designer (EED) und EWS. – unveröff. Bachelorarbeit: 70 S.; TU Bergakademie Freiberg.

- GERSCHEL, A. (2015): Effizienzvergleich hinsichtlich des Wärmeübergangs verschiedener Erdwärmesondentypen mittels Thermal Response Test und Simulationssoftware EWS. – unveröff. Masterarbeit: 103 S.; TU Bergakademie Freiberg.
- GERSCHEL, A. (2017): Gegenüberstellende Berechnungen von Erdwärmesondenanlagen mit verschiedener Simulationssoftware und Vergleich mit realen Betriebsdaten. – in: GRIMM, R.; GERSCHHEL, A.; LUMM, C.; GIETZEL, J. & GABRIEL, P. (2017): Langzeitverhalten geothermischer Anlagen in Sachsen. – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.), Schriftenreihe, Heft 7/2017: 13-93; Freiberg.
- GERSCHEL, A. (2018): Kleinräumige geologisch-geothermische 3D-Modellierung im Zittauer Becken. – Poster, 28. Zittauer Energieseminar, 26.-27.11.2018; Görlitz.
- HAIN, A.; HAACK, M.; LUCKE, F.; EBERHARD, P.; REWERK, A. & FLANDERKA, O. (2014): Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden. – Tagungsband, HSZG (Hrsg.), Abschluss-Symp., 04.12.2014: 106 S.; Zittau.
- HIRSCH, D.; RASCHER, J. & SCHULZE, H. (1989): Die Braunkohlenlagerstätten der Oberlausitz (Tertiärbecken von Berzdorf und Zittau). – Wiss.-Techn.-Inf.d. (WTI), A, **30** (1): 10-19.
- HOFFMANN, R.; BONDZIO, E.; MARSKI, M.; TSCHERNIKL, J.; FREUND, M. & MEUTZNER, G. (1988): Vorratsberechnung Braunkohleerkundung Zittau. Berichtsteil III. – unveröff. Ber., VEB GFE Freiberg.
- HOKE, JR., B. C. & CHEN, J. C. (1991): Binary Aqueous-Organic Surface Tension Temperature Dependence. – J. Chem. Eng. Data, **36**: 322-326.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2019): Hydrogeology. – Springer Spektrum: 357 S.; Berlin, Heidelberg.
- HUBER, H. (2013): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Wärmetransportverhalten oberflächennaher, durchströmter Böden. – veröff. Diss., Mitt. Inst. Werkst. & Mech. Bauw. TU Universität Darmstadt, **40**: 151 S.; Darmstadt.
- HUBER, H.; ARSLAN, U. & SASS, I. (2014): Zum Einfluss der Filtergeschwindigkeit des Grundwassers auf die effektive Wärmeleitfähigkeit. – Grundwasser, **19**:173-179.
- KAHNT, L.; SCHIFFNER, P. & KRIMMLING, J. (2009): Optimierung und wissenschaftliche Betreuung der Wärmepumpenanlage Campus. – unveröff. Ber., Hochschule Zittau/Görlitz i. A. Sächsisches Immobilien- und Baumanagement: 89 S.; Zittau.
- KLINK, W. (2014): Bericht zu den geophysikalischen Untersuchungen in der Erdwärmesonde Zittau TB 2/2003. – unveröff. Ber., Bohrlochmessung Storkow GmbH i. A. HSZG: 11 S.; Storkow.
- KOENIGSDORFF, R. (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. – Fraunhofer IRB Verlag: 332 S.; Stuttgart.
- KOPECKY, L. (1975): Exkursionsführer in das Böhmisches Mittelgebirge. – in: PFEIFFER, L. (Hrsg.): Junge Vulkanite im Grenzgebiet der DDR und CSSR. – Exk.-f. zur Tagung, 24.-26. April 1975 in Dresden, 66: 24-40; Berlin.

- KRETZSCHMAR, H.-J.; HERRMANN, S.; KUNICK, M.; GÖPFERT, T. & SÜNDER, M. (2018): Property Library for Liquid Secondary Refrigerants Calculated from the IIR Formulation 2010. FluidEXL Graphics with LibSecRef for Excel ®. – veröff. eBook, KCE & Co. KG (Hrsg.): 69 S.; Dresden.
- MAROTZ, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. – Schriftenreihe des KWK, 18: 228 S.; Hamburg (Wasser u. Boden).
- MARTIN, C.; DREWS, I.; EIBLMAIER, M. & PRETSCH, H. et al. (2000): Lexikon der Geowissenschaften. – Spektrum Akademischer Verlag, 6 Bd.; Heidelberg, Berlin.
- PANTELEIT, B. & REICHLING, J. (2006): Automatisierte Attributierung von Bohrungsdaten mit Parametern zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen. Eine Methode zur standardisierten Datenbankauswertung. – Grundwasser, 1: 19-26.
- SCHLENZ, S. (2017): Untersuchung des Einflusses ausgewählter Untergrundparameter auf die nachhaltige thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes im urbanen Raum. – veröff. Diss.: 154 S.; Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- SCHULZE, H. (1995): Tertiärbecken der südöstlichen Oberlausitz. – Ber. Naturforsch. Ges. Oberlausitz, 4: 11-15; Kamenz.
- STEDING, D.; HIRSCH, D.; SCHULZE, H. & BARTUSCH, K. (1991): Das Deckgebirge im Tagebau Berzdorf/OL. – Tagungsband, 38. Jahrestagung GGW: 140-147; Berlin.
- STEPHAN, P.; KABELAC, S.; KIND, M.; MEWES, D.; SCHABER, K. & WETZEL, T. (2019): VDI-Wärmeatlas. – Springer-Verlag, 12. Aufl.: 2082 S.; Berlin.
- STOBER, I. & BUCHER, K. (2020): Geothermie. – Springer-Verlag, 3. Aufl.: 386 S.; Berlin, Heidelberg.
- SUHR, P. (2003): The Bohemian Massif as a Catchment Area for the NW European Tertiary Basin. – GeoLines, 15: 147-159.
- THOLEN, M. & WALKER-HERTKORN, S. (2008): Arbeitshilfen Geothermie. Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. – wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 1. Aufl.: 228 S.; Bonn.
- VDI 4640-1:2010-06, Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte (inkl. Berichtigung:2011-12).
- VDI 4640-2:2019-06, Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.
- VDI 4640-5:2020-07, Thermische Nutzung des Untergrundes – Thermal Response Test (TRT).
- VULPIUS, R. (2015): Die Braunkohlenlagerstätten Berzdorf und Zittau. – in: VULPIUS, R. (2015): Die Braunkohlenlagerstätten Deutschlands, ein Überblick. – GDMB-Verlag: 303-312; Clausthal-Zellerfeld.
- WAGENBRETH, O. & STEINER, W. (1982): Das Zittauer Becken und das Zittauer Gebirge. – in: WAGENBRETH, O. & STEINER, W. (1982): Geologische Streifzüge, Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. – VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1. Aufl.: 174-177; Leipzig.

-
- WANG, H.; QI, C.; DU, H. & GU, J. (2009): Thermal performance of borehole heat exchanger under groundwater flow: A case study from Baoding. – *Energy and Buildings* **41**: 1368-1373.
- WANG, H.; YANG, B.; XIE, J. & QI, C. (2013): Thermal performance of borehole heat exchangers in different aquifers: a case study from Shouguang. – *Int. J. Low-Carbon Tech.*, **8**: 253-259.