

**Untersuchung des Einflusses ausgewählter Untergrundparameter
auf die nachhaltige thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes
im urbanen Raum**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Sophie Schelenz

Kiel, 2017

Erster Gutachter: Prof. Dr. Sebastian Bauer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Peter Dietrich

Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2017

Zum Druck genehmigt: 18.07.2017

gez. Prof. Dr. Natascha Oppelt, Dekanin

„Energie geht nicht verloren.“

Hermann von Helmholtz

(31. Aug. 1821 - 8. Sept. 1894)

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit, abgesehen von der Beratung durch die Betreuer, nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist und weder ganz noch in Teilen an einer anderen Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt, veröffentlicht oder zu Veröffentlichung eingereicht wurde. Die Arbeit entstand unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Halle (Saale), den 18.04.2017

.....
Unterschrift

Kurzfassung

Der Bedarf an Energie zur Wärme- und Kälteversorgung konzentriert sich im urbanen Raum sowohl auf Industrie- und Gewerbegebiete als auch auf Wohngebiete. Zur Deckung dieses Energiebedarfes hat sich die Nutzung oberflächennaher Geothermie als erneuerbare Energiequelle in den vergangenen Jahren bewährt. Allerdings sind im städtischen Wohnsektor meist kleine, grundstücksbasierte Systeme in nur wenigen Metern Abstand installiert. Diese intensive geothermische Untergrundnutzung charakterisiert zum einen die begrenzte Investitionssumme, sodass statt standortspezifischen Untergrunddaten Literaturwerte für die Planung der Systeme herangezogen werden. Zum anderen verhindert die auf die Grundstücke beschränkte Betrachtungsskala die Berücksichtigung umliegender Untergrundnutzungen in der Planung. Die Konsequenzen dieser vereinfachten grundstücksbasierten Planung geothermischer Systeme, die sich insbesondere für ihre Effizienz und Nachhaltigkeit im urbanen Raum ergeben, wurden in der vorgestellten Arbeit untersucht.

Im ersten Schritt wurden die für die Erdwärmennutzung relevanten Wärmetransportbedingungen identifiziert. Szenariensimulationen belegen, dass die Grundwasserdynamik und die ungesättigte Zone einen entscheidenden Einfluss auf das geothermische Potential eines Standortes haben. Die korrekte Bewertung des geothermischen Potentials ist gerade bei intensiver geothermischer Nutzung die Basis für ein effizientes Systemdesign und die belastbare Prognose der Temperaturänderungen. Je dichter die Erdwärmesonden installiert sind, desto wichtiger ist das Verständnis standortspezifischer Wärmetransportprozesse zur Bewertung des Risikos für Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen. Daher wurde im zweiten Schritt untersucht, wie standortspezifische Untergrundbedingungen dieses Risiko beeinflussen. Die Ergebnisse zeigen, dass Standorte mit einem hohen geothermischen Potential ein vergleichsweise geringes Risiko für thermische Interaktionen kennzeichnet und die Mindestabstände der Genehmigungspraxis nur unter Beachtung der Vor-Ort-Bedingungen sinnvoll anzuwenden sind.

Die Betrachtung der Vor-Ort-Bedingungen wiederum bedarf der Recherche von Literaturwerten oder der Erhebung standortspezifischer Messungen. Letzteres ist mit einem Mehraufwand für die Durchführung von Erkundungsuntersuchungen verbunden. Es wurde geprüft, inwieweit der Mehraufwand der standortspezifischen Untergrunderkundung zu einer Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit der geothermischen Bewirtschaftung beitragen kann. Dafür wurden in einer Fallstudie die Ansätze zur Parametrisierung anhand von Literaturwerten und standortspezifischen Messungen gegenübergestellt und ihr Einfluss auf das Systemdesign und die induzierten Temperaturfahnen untersucht.

Die Vorteile, die aus der standortspezifischen Parametrisierung hervorgehen, sind mit vergleichsweise hohen Investitionen zur Durchführung der Erkundungsuntersuchungen verbunden. Um eine effiziente, nachhaltige, aber auch finanzierbare geothermische Bewirtschaftung des Untergrundes zu ermöglichen, bedarf es eines Wechsels der Betrachtungsskala über die Grundstücksgrenzen hinaus. Dafür wurde ein Konzept für eine einheitliche geothermische Erschließung urbaner Wohngebiete betrachtet, das sowohl die Investitionskosten für die einzelnen Wohnhäuser reduziert als auch die Planungssicherheit auf Basis der Standortdaten optimiert. Damit bietet sich eine interessante Option zur Nutzung von Erdwärme im urbanen Raum, die zur Steigerung der Nachhaltigkeit der oberflächennahen Geothermie bei gleichzeitiger Reduzierung ihrer Umweltauswirkungen beiträgt.

Abstract

In urban areas, the energy demand for heating and cooling is concentrated in industrial and commercial areas as well as in residential neighborhoods with high building densities. In recent years, shallow geothermal systems have proven as a renewable option to be able to contribute to cover this energy demand. However, the high number of property-based, geothermal systems in residential neighborhoods that are installed in only a few meters apart from each other result in an intensive geothermal subsurface use. Thereby, the intensive, individual thermal use of the shallow subsurface introduces two disadvantages: Firstly, the narrow financial scope hampers a site-specific investigation of relevant heat transport parameters but rather forces a simplified subsurface parametrization based on literature references; secondly, the restriction of the investigation scale to the property area leads to the underestimation of potential interactions with other subsurface uses. This work investigates the consequences of such simplified, property-based planning for the efficiency and sustainability with special focus to urban areas with intensive geothermal subsurface use.

The first step of the research was to identify relevant heat transport conditions for shallow geothermal heat extraction. Scenario analyses demonstrated the impact of groundwater dynamics and unsaturated zones on the shallow geothermal potential. Thereby, a correct evaluation of the shallow geothermal potential is an important basis for an efficient system design and a reliable prediction of induced temperature changes. The knowledge on site-specific heat transport conditions are particular important to evaluate the risk for thermal interactions between adjacent geothermal systems when a large number of borehole heat exchangers are installed. Thus, the second step of this study was to investigate the most relevant heat transport conditions governing the formation of temperature plumes. Results highlighted the correlation between highest shallow geothermal potential and minimum risk for thermal interaction. Also minimum distances defined in the legal framework of shallow geothermal subsurface uses have to be seen critically with respect to the site-specific subsurface conditions.

Proper consideration of subsurface conditions can be achieved by researching values found in the literature or by site-specific subsurface data. The latter is connected to additional expenditures for the collection of measured data. Thus, the benefit of an enhanced, site-specific subsurface parametrization has to be proven against the hitherto commonly used simplified parameterization based on literature references. To this end, the impact of both parameterization scenarios on the system design and induced temperature anomalies was investigated for an exemplary chosen urban residential neighborhood.

Benefits of the enhanced subsurface parameterization can only be realized through increased investigation costs. Hence the investigation scale has to shift from individual, property-based geothermal systems towards property-independent geothermal applications to ensure an adequate financing of subsurface investigations and also expand geothermal subsurface uses. This key point was implemented in a geothermal management concept for urban residential neighborhoods that provides all houses with geothermal energy. Overall, such management concept enables the economic application of property-independent subsurface explorations that further enhances the efficiency of shallow geothermal systems by minimizing their environmental impacts.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Motivation und Zielstellung	3
3 Grundlagen	6
3.1 Thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes	6
3.1.1 Geothermische Systeme	7
3.1.2 Umweltauswirkungen und Risiken	9
3.1.3 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen	10
3.1.4 Planung und Dimensionierung.....	13
3.2 Strömung und Wärmetransport im Untergrund	16
3.2.1 Grundwasser gesättigter Untergrund	16
3.2.2 Ungesättigter Untergrund.....	18
3.3 Strömung und Wärmetransport in Erdwärmesonden	21
3.3.1 Analytische Lösungsansätze	22
3.3.2 Numerische Lösungsansätze.....	24
4 Einfluss der Advektion auf die thermischen Entzugsleistungen für einen nachhaltigen Erdwärmesonden-Betrieb	28
4.1 Einleitung.....	28
4.2 Durchführung.....	31
4.3 Ergebnisse und Diskussion.....	33
4.4 Schlussfolgerung und Ausblick.....	49
5 Thermische Auswirkungen einer intensiven geothermischen Nutzung unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen	51
5.1 Einleitung.....	51
5.2 Untersuchungsgebiet.....	53
5.3 Durchführung.....	56
5.4 Ergebnisse und Diskussion.....	59
5.4.1 Einfluss der Wassersättigung	59
5.4.2 Einfluss der Grundwasserströmung	62
5.4.3 Thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen	67
5.5 Schlussfolgerung und Ausblick.....	71

6 Die Bedeutung einer standortspezifischen Untergrunderkundung für die optimierte thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes – eine Fallstudie.....	74
6.1 Einleitung.....	74
6.2 Untersuchungsgebiet.....	76
6.3 Parametrisierung des Untergrundes	77
6.3.1 Vereinfachte Parametrisierung	78
6.3.2 Standortspezifische Parametrisierung.....	78
6.4 Ergebnisse	84
6.4.1 Vereinfachte Parametrisierung	84
6.4.2 Standortspezifische Parametrisierung.....	86
6.5 Bewertung der standortspezifischen Parametrisierung	92
6.5.1 Einfluss auf das Design von Erdwärmesonden	92
6.5.2 Bewertung der Vorhersage induzierter Temperaturanomalien	96
6.6 Diskussion	102
6.7 Übertragbarkeit der Ergebnisse am Beispiel Köln Junkersdorf	104
6.8 Schlussfolgerung und Ausblick	108
7 Ein Konzept zur nachhaltigen thermischen Erschließung urbaner Wohngebiete	111
7.1 Einleitung.....	111
7.2 Konzept der geothermischen Wohngebieterserschließung	112
7.3 Finanzierung.....	119
7.4 Übertragbarkeit auf Wohngebiete im Bestand.....	123
7.5 Schlussfolgerung und Ausblick	124
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	126
Referenzen	130
Anhang	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema zur Ableitung eines konzeptionellen Ansatzes für eine nachhaltige thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes im urbanen Raum.	5
Abbildung 3-1: Natürliche und anthropogene Wärmequellen im urbanen Untergrund (verändert nach Florides und Kalogirou, 2007; Menberg et al., 2013; Umweltbundesamt, 2015; VDI 4640-1, 2010).	6
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung oberflächennaher geothermischer Systeme: a) Offenes System mit Entnahme- und Schluckbrunnen, b) Geschlossenes System mit einer Einfach-U-Erdwärmesonde, c) Detailausschnitt einer Einfach-U-Erdwärmesonde (ohne Maßstab, verändert nach Sanner et al., 2003 und Zheng et al., 2015).....	7
Abbildung 3-3: Horizontaler Querschnitt durch eine Einfach-U-Erdwärmesonde: a) Darstellung der thermischen Widerstände zwischen den Komponenten einer Erdwärmesonde und b) Erweiterung des Widerstandsmodells zum Widerstandskapazitätsmodell (verändert nach Bauer, 2011).	26
Abbildung 4-1: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die minimalen, maximalen und mittleren jährlichen Untergrundtemperaturen nach zehn Jahren saisonalem Wärmeentzug im Mittelsand im Grundwasserabstrom im Abstand von 1,5 m zur Erdwärmesonde.	34
Abbildung 4-2: Vergleich der induzierten Temperaturänderungen im Mittelsand in 5 und 10 m Entfernung im Abstrom der Erdwärmesonde bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM1), $1\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM3) und 1 md^{-1} (Szenario SM5).	35
Abbildung 4-3: Vergleich der Temperaturisolinie bei einer Temperaturänderung von 0,5 K für Fließgeschwindigkeiten von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM1), $1\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM2) und $1\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM3) nach zehn Jahren der saisonalen Heizzyklen. Für Szenario SM4 und SM5 (Fließgeschwindigkeiten $\geq 0,1 \text{ md}^{-1}$) sind keine Temperaturisolinien abgebildet, da die Änderungen der Temperatur geringer als 0,5 K sind.	36
Abbildung 4-4: Vergleich der drei untersuchten Sedimente in Bezug auf 1) die saisonalen Temperaturänderungen im Untergrund im Nahbereich der Erdwärmesonde bei a) maximalem und b) minimalem hydraulischen Gradienten sowie 2) die vertikalen Temperaturprofile im Inneren der Erdwärmesonde bei a) maximalem und b) minimalem hydraulischen Gradienten nach zehn Jahren saisonalem Heizen (In Abbildung 4-4: 1 überdeckt der Graph des kiesigen Sandes den Graph des Mittelsandes).	37
Abbildung 4-5: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die thermische Entzugsleistung nach dem Ansatz von Panteleit und Reichling (2006, Gültigkeitsbereich für untersuchte Szenarien: $1,0\text{E-}4$ bis $5,5\text{E-}1 \text{ md}^{-1}$) und als Ergebnis der Szenariensimulationen für verschiedene Sande unter Ableitung eines vereinfachten Berechnungsansatzes zur Abschätzung der standortspezifischen thermischen Entzugsleistungen.	39

Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der thermischen Entzugsleistungen nach Panteleit und Reichling (2006) und Panteleit (2016) mit den simulierten Ergebnissen bei minimaler (GWF = 0) und maximaler Grundwasserströmung (GWF = 1).	40
Abbildung 4-7: Einfluss der Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf die thermische Entzugsleistung des Mittelsandes und die Bohrkosten am Beispiel eines Einfamilienhauses mit einem Wärmebedarf von 8 kW und Bohrkosten von 50 €m ⁻¹ bei minimaler (Szenario SM1) und maximaler untersuchter Grundwasserfließgeschwindigkeit (Szenario SM5).	43
Abbildung 4-8: Einfluss der Randbedingungen a) initiale Untergrundtemperatur, b) Dauer der Heizperiode und c) Fließrate des Wärmeträgermediums im Inneren der Erdwärmesonde auf die thermische Entzugsleistung nach fünf Jahren saisonalem Heizbetrieb für Mittelsand mit einer Fließgeschwindigkeit von 1E-4 md ⁻¹ (Szenario SM1).	44
Abbildung 4-9: Klassifizierung des Einflusses der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie anhand der berechneten Péclet-Zahl für die untersuchten Szenarien.	47
Abbildung 4-10: Einfluss der Mächtigkeit und der Péclet-Zahl des Grundwasserleiters auf die mittlere Péclet-Zahl des geothermisch erschlossenen Untergrundes.	49
Abbildung 5-1: Ausschnitte aus der Karte der mittleren Grundwasserflurabstände in Sachsen am Beispiel der Städte a) Taucha und b) Dresden (verändert nach GeoSN, 2015).	52
Abbildung 5-2: Untersuchungsgebiet Köln Junkersdorf: a) Lage des Untersuchungsgebietes westlich des Vorfluters Rhein (geändert nach Google Maps, 2016a); b) Geologisches Profil, das bei der Installation von Erdwärmesonden aufgenommen wurde (Stadt Köln, Umwelt- und Verbraucherschutzamt, 2013; Vienken et al., 2015); c) Vertikales Profil der Grundwassersättigung aus Modellsimulationen.....	55
Abbildung 5-3: Übersicht über die analysierten Szenarien mit Variation der Grundwasserfließgeschwindigkeiten von v ₁ bis v ₈	58
Abbildung 5-4: Vergleich der Temperaturanomalien im vertikalen Schnitt durch den Untergrund im Bereich der installierten Erdwärmesonden am Höhepunkt der fünften Heizperiode (1.825 d bzw. 5 a) bei Grundwasser teilgesättigten Bedingungen a) mit und b) ohne Temperatur-Randbedingung an der Erdoberfläche sowie c) bei vollständiger Grundwassersättigung.....	61
Abbildung 5-5: Vertikales Profil der Temperatur in a) dem Erdwärmesondenfluid und b) dem Verfüllmaterial der Erdwärmesonde unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen am Höhepunkt der fünften Heizperiode (1825 d bzw. 5 a).	62
Abbildung 5-6: Vergleich der Temperaturanomalien im vertikalen Schnitt durch den Untergrund im Bereich der installierten Erdwärmesonden und entlang der Grundwasserfließrichtung bei 1) Grundwasser teilgesättigten und 2) vollständig gesättigten Bedingungen am Höhepunkt der fünften Heizperiode (1.825 d bzw. 5 a) bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von a) 5E-3 md ⁻¹ , b) 3,1E-2 md ⁻¹ und c) 13,6E-2 md ⁻¹	64

Abbildung 5-7: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die mittlere Temperatur des Erdwärmesondenfluides unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen.	65
Abbildung 5-8: Vertikale Profile der Temperatur des Erdwärmesondenfluides im Inneren der Sonde bei Voll- und Teilsättigung des Untergrundes und Grundwasserfließgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter von $5E-3 \text{ md}^{-1}$ sowie $13,6E-2 \text{ md}^{-1}$	66
Abbildung 5-9: Zusammenhang zwischen der minimalen Untergrundtemperatur und der Grundwasserfließgeschwindigkeit am Ende der fünften Heizperiode bei der Nutzung von einem und zwei oberflächennahen geothermischen Systemen aus jeweils fünf Erdwärmesonden bei variierender Grundwasserfließgeschwindigkeit.	69
Abbildung 5-10: Vergleich der Temperaturanomalien im vertikalen Schnitt durch den Untergrund im Bereich von zwei installierten Erdwärmesondensystemen mit je fünf Erdwärmesonden in a) 10 m Abstand und b) 20 m Abstand entlang der Grundwasserfließrichtung bei 1) Grundwasser teilgesättigten und 2) vollständig Grundwasser gesättigten Bedingungen am Ende der zehnten Heizperiode (3.390 d bzw. 9,3 a) bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von $0,031 \text{ md}^{-1}$	70
Abbildung 6-1: Untersuchungsgebiet: 1a) Lage des Wohngebietes in der Stadt Taucha und Lage der Bohrpunkte B1 bis B5 der Bohrdatenbank des LfULG (2014), 1b) Detailansicht mit Lage der Ansatzpunkte der Direct Push Sondierungen, geoelektrischen Profile und des geologischen Schnittes aus Abbildung 6-3 (geändert nach Google Maps, 2016b); 2) Geologisches Profil abgeleitet aus den Ergebnissen der standortspezifischen Messungen und den Einträgen der Bohrdatenbank des LfULG (2014).	77
Abbildung 6-2: Vergleich der Messergebnisse: a) und b) 2D-Profile der elektrischen Widerstandstomographie und c) Vertikalprofil der elektrischen Leitfähigkeit (mit dem Direct Push Electrical Conductivity Log am Punkt P2 gemessen).	87
Abbildung 6-3: Geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet (Lage des Schnittes zeigt Abbildung 6-1:1b).	87
Abbildung 6-4: Ergebnisse der Direct Push Charakterisierung: a) Direct Push Bodenprofil aus Bodenansprache (mit dem Direct Push Soil Sampling Tool an Punkt P3 bestimmt), b) hochaufgelöstes Vertikalprofil der elektrischen Leitfähigkeit (mit dem Direct Push Electrical Conductivity Log an Punkt P1 gemessen) und c) hochaufgelöstes Vertikalprofil der relativen hydraulischen Leitfähigkeit und tiefenorientierte Verteilung der absoluten hydraulischen Leitfähigkeiten (mit dem Direct Push Injection Log und dem Direct Push Slug Test an Punkt P2 gemessen).....	89
Abbildung 6-5: Ergebnis der Interpolation der Grundwasserhöhen zur Darstellung a) der Grundwasserisohypsen und Fließvektoren der Stichtagsmessung vom 05.08.2013 und b) der Fließvektoren ausgewählter Stichtagsmessungen zur Veranschaulichung der maximalen Abweichung der messtechnisch ermittelten Grundwasserfließrichtung.	90
Abbildung 6-6: Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und a) der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes sowie b) der benötigten Installationslänge der Erdwärmesonden (berechnet nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016).	96

Abbildung 6-7: Induzierte Temperaturanomalien im Umfeld eines geothermischen Systems nach einer Betriebsdauer von 20 Jahren (saisonales Heizen) bei Annahme von maximalen und minimalen Wärmeleitfähigkeiten im a) ungesättigten Geschiebemergel (ca. 4 m Tiefe unter GOK) und b) Rhyolith (ca. 13 m Tiefe unter GOK).....	99
Abbildung 6-8: Vergleich der Temperaturfahnen im Grundwasserleiter (in ca. 16 m Tiefe unter GOK) für a) die standortspezifische Parameterisierung (Referenz Case) sowie die vereinfachte Parameterisierung des Untergrundes mit b) dem Best Case und c) dem Worst Case (* Schnittbene des in Abbildung 6-9 dargestellten Querschnittes).	101
Abbildung 6-9: Vertikaler Querschnitt durch den Untergrund für das Worst Case Szenario mit den in der Literatur vorgegebenen minimalen hydraulischen Leitfähigkeiten und minimalen Wärmeleitfähigkeiten (in Anlehnung an die vereinfachte Untergrundparameterisierung): a) Vertikalschnitt im Anstrom mit 1 m Abstand zu den Erdwärmesonden, b) Vertikalschnitt im Abstrom mit 10 m Abstand zu den Erdwärmesonden, die Lage des Querschnittsprofils ist in Abbildung 6-8: c) markiert.....	102
Abbildung 6-10: Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und a) der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes sowie b) der benötigten Installationslänge der Erdwärmesonden (berechnet nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016).....	106
Abbildung 6-11: Induzierte Temperaturanomalien im Bereich der Erdwärmesonden nach einer Betriebsdauer von zehn Jahren und mit einer initialen Untergrundtemperatur von 11,3 °C: Vergleich der Worst Case (1) und Best Case Szenarien (2) mit minimalen bzw. maximalen Wärmeleitfähigkeiten und hydraulischen Leitfähigkeiten im Geschiebemergel (a), ungesättigten sandigen Kies (b) und gesättigten sandigen Kies (c).....	108
Abbildung 7-1: Dreidimensionales Schema des intensiv geothermisch genutzten Wohngebietes in Köln Junkersdorf (verändert nach Vienken et al., 2015).	112
Abbildung 7-2: Konzeptioneller Ansatz für eine geothermische Erschließung urbaner Wohngebiete (verändert nach Vienken et al., 2015).	113
Abbildung 7-3: Beispiel der dreidimensionalen Visualisierung: Wohngebiet in Taucha mit weiß gekennzeichneten Grundstücksgrenzen und rot dargestellten Ansatzpunkten für die potentielle Installation von Erdwärmesonden sowie den Ergebnissen der standortspezifischen Untergrunderkundung.....	118
Abbildung 7-4: Abhängigkeit der Investitionskosten pro Haus von der Zahl der Wohnhäuser und der Gesamtinvestitionssumme für eine standortspezifische Untergrundparameterisierung am Beispiel der Untersuchungsgebiete Köln Junkersdorf und Taucha.	121
Abbildung 7-5: a) Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl von der Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur der Erdwärmesonde; b) Korrelation zwischen Jahresarbeitszahl und jährlichem Stromverbrauch einer Wärmepumpe bei einem Wärmebedarf von 11 kW und einer jährlichen Betriebsdauer von 2.400 h.	123

Abbildung A-1: Ausgewählte geologische Profile der Bohrdatenbank des LfULG (2014) mit Tiefen von 76 bis 80 m unter Geländeoberkante.	147
Abbildung A-2: Ausgewählte geologische Profile der Bohrdatenbank des LfULG (2014) mit Tiefen von 17 bis 21,1 m unter Geländeoberkante.	148
Abbildung A-3: Konzeptionelles Modell der Untersuchungen zum Einfluss der Advektion auf die thermische Untergrundnutzung.	149
Abbildung A-4: Konzeptionelles Modell des Untersuchungsgebietes in Köln Junkersdorf.	149
Abbildung A-5: Konzeptionelles Modell des Untersuchungsgebietes in Taucha.	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Vorgegebene Mindestabstände zwischen Erdwärmesonden eines Systems und zwischen benachbarten Systemen (Auszug aus Hähnlein et al., 2011).....	12
Tabelle 4-1: Parametrisierung der drei untersuchten Sedimente des Grundwasserleiters und des Grundwasserstauers.	31
Tabelle 4-2: Übersicht der untersuchten Szenarien mit konstantem hydraulischen Gradienten. Auf Grund der unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten der Sedimente des Grundwasserleiters ergeben sich abweichende Grundwasserfließgeschwindigkeiten für jedes Sediment....	32
Tabelle 4-3: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit und Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf die mittleren simulierten und berechneten thermischen Entzugsleistungen (Q_{sim} und Q_{calc}), benötigten Installationslängen (L_{BHE}) bei dem Wärmebedarf von 8 kW (beispielhaft für die Szenarien SM1 und SM5 für Mittelsand mit Fließgeschwindigkeiten von $1E-4$ bzw. 1 md^{-1})....	42
Tabelle 4-4: Charakterisierung der drei Klassen des Einflusses der Grundwasserströmung.	47
Tabelle 5-1: Parametrisierung des Untergrundes im Untersuchungsgebiet in Köln Junkersdorf.	57
Tabelle 5-2: Simulierte minimale Untergrundtemperaturen T_{min} im sandigen Schluff (Schicht 1) und im sandigen Kies (Schicht 2) unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen sowie Differenzen der minimalen Untergrundtemperaturen der Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen ΔT_{gz-uz} bei verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten am Höhepunkt der fünften Heizperiode.	63
Tabelle 5-3: Simulierte minimale Untergrundtemperaturen T_{min} im Grundwasserleiter nach fünf Jahren saisonalem Heizen bei verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten (v) und unter Nutzung von einem oder zwei geothermischen Systemen in 10 bzw. 20 m Abstand.	68
Tabelle 6-1: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten für bindige (1) und nicht-bindige (2 und 3) Bodenproben mit maximaler und minimaler Verdichtung und variierendem Wassergehalt. Die Beprobungspunkte sind in dem geologischen Profil in Abbildung 6-4: a dargestellt.	91
Tabelle 6-2: Daten der vereinfachten Parametrisierung (Literaturwerte) und der standortspezifischen Parametrisierung (Referenzwerte) für die Schicht 1 (Geschiebemergel), Schicht 2 (Mittel- bis Grobsand) und Schicht 3 (Rhyolith).	91
Tabelle 6-3: Vergleich der berechneten Entzugsleistungen, Installationslängen der Erdwärmesonden und Bohrkosten für die standortspezifische und vereinfachte Parametrisierung zur Wärmebereitstellung durch das untersuchte geothermische System (nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016 berechnet).	96
Tabelle 6-4: Parametrisierung des Untergrundes für das Worst und Best Case Szenario am Standort Köln Junkersdorf für die Schicht 1 (Geschiebemergel) und Schicht 2 (sandiger Kies).	105
Tabelle 6-5: Vergleich der berechneten Entzugsleistungen, Installationslängen der Erdwärmesonden und Bohrkosten für die Parametrisierung anhand gemessener Werte (Referenz) und minimaler	

und maximaler Literaturangaben (berechnet nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016).	106
Tabelle 6-6: Minimale Temperaturen der jeweiligen Schnittebenen des Untergrundes am Ende der zehnten Heizperiode für die Worst Case und Best Case Szenarien bei einer ungestörten Untergrundtemperatur von 11,3 °C.	107
Tabelle A-1: Zusammenfassung der Eigenschaften einer Erdwärmesonde in Anlehnung an die in Feflow implementierte Datenbank (Dataset #1) vorgegebenen Werte (DHI-WASY, 1979 - 2016; DHI-WASY, 2010).	148
Tabelle A-2: Überblick über ausgewählte Methoden zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes.	150

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBergG	Bundesberggesetz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
COP	Leistungszahl der Wärmepumpe (Coefficient of Performance)
DGG	Deutsche Geologische Gesellschaft
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
DP EC	Direct Push Electrical Conductivity Logging
DP IL	Direct Push Injection Logging
DP ST	Direct Push Slug Test
DTS	Faseroptische Temperaturmessung (Distributed Temperature Sensing)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWD	Deutscher Wetterdienst
EED	Earth Energy Designer
ERT	Elektrische Widerstandstomographie (Electrical Resistivity Tomography)
GOK	Geländeoberkante
LagerstG	Lagerstättengesetz
LAWA	Bund- und Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
MOSAIC	Model-Driven Site Assessment, Information and Control
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG

Symbolverzeichnis

Lateinisches Symbol	Bedeutung
A	Fläche [m ²]
C	Spezifische Wärmekapazität [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
c_a	Wärmekapazität von Luft [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
C_m	Volumetrische Wärmekapazität des porösen Mediums [Jm ⁻³ K ⁻¹]
c_s	Wärmekapazität der Festphasen [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
C_w	Volumetrische Wärmekapazität von Wasser [Jm ⁻³ K ⁻¹]
C_v	Volumetrische Wärmekapazität des Wärmeträgerfluides [Jm ⁻³ K ⁻¹]
d	Innendurchmesser der Erdwärmesonde [m]
D_t	Tensor der thermischen Diffusion [m ² s ⁻¹]
E	Euler'sche Zahle [-]
Ei	Integralexponentialfunktion [-]
f_a	Volumenanteil der Luftphase [-]
f_s	Volumenanteil der Festphase [-]
f_w	Volumenanteil der Wasserphase [-]
GWF	Grundwasserfaktor [-]
H	Tiefe der Erdwärmesonde [m]
H	Betriebsstunden des Erdwärmesondensystems [h]
∇h	Potentialgradient [mm ⁻¹]
i	Hydraulischer Gradient [-]
J_a	Kurzwellige Atmosphärenstrahlung [Wm ⁻²]
K	Durchlässigkeitstensor [ms ⁻¹]
k_a	Faktor zur Beschreibung der Geometrie der Bodenmatrix [-]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [ms ⁻¹]
K_0	Modifizierte Bessel-Funktion [-]
k_s	Faktor zur Beschreibung der Geometrie der Bodenmatrix [-]
$K(\psi)$	Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit [ms ⁻¹]
K_w	Empirischer Parameter [-]
L_c	Charakteristische Länge [m]
L_{BHE}	Installationslänge der Erdwärmesonden [m]
m_v	Van Genuchten-Parameter [-]
N	Porosität [-]
n_{eff}	Effektive Porosität [-]
n_v	Van Genuchten-Parameter [-]
P_{ext}	Thermische Entzugsleistung [Wm ⁻¹]
P_e	Péclet-Zahl [-]

Lateinisches Symbol	Bedeutung
P_U	Aus dem Untergrund zu entnehmender Wärmebedarf [W]
P_W	Wärmebedarf des Wohnhauses [W]
\dot{q}_h	Volumenstrom des Grundwassers [m^3s^{-1}]
\dot{Q}	Heizleistung [W]
q_u	Strömungsrate in der ungesättigten Zone [ms^{-1}]
q_{th}	Wärmefluss [Wm^{-2}]
R	Bohrlochradius [m]
r_s	Erdwärmesondenradius [m]
R_a	Widerstand zwischen dem Fluid und der Bohrlochwand [mKW^{-1}]
R_b	Widerstand zwischen dem auf- und abströmenden Fluid [mKW^{-1}]
R_E	Thermischer Bohrlochwiderstand [mKW^{-1}]
Re	Reynoldszahl [-]
S	Speicherterm [Wm^{-3}]
T	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
T_0	Ausgangstemperatur des Untergrundes zum Zeitpunkt Null [$^{\circ}\text{C}$]
T_b	Temperatur an der Bohrlochaußenwand [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Mittlere Fluidtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
$T(x,y,t)$	Temperatur am Punkt x, y zum Zeitpunkt t [$^{\circ}\text{C}$]
T	Zeit [s]
v_A	Abstandsgeschwindigkeit [ms^{-1}]
v_D	Filter- bzw. Darcy-Fließgeschwindigkeit [ms^{-1}]
v_s	Stromverbrauch der Wärmepumpe [kWh]
v_T	Geschwindigkeit der Temperature Ausbreitung [ms^{-1}]

Griechisches Symbol	Bedeutung
α_t	Wärmeübergangskoeffizient bei turbulenter Strömung [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
α_v	Van Genuchten-Parameter [-]
Θ	Wassergehalt [Vol.-%]
θ_ψ	Wassergehalt als Funktion des Matrixpotentials [Vol.-%]
ε	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe [-]
θ_r	Restwassergehalt [Vol.-%]
θ_s	Sättigungswassergehalt [Vol.-%]
ψ	Potential [Pa]
ψ_m	Matrixpotential [Pa]
Λ	Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
λ_{eff}	Effektive Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
μ	Kinematische Viskosität [m^2s^{-1}]
ρ	Massendichte [kgm^{-3}]
Φ	Anstieg der Kurve der Auswertung des Thermal Response Tests [K]

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren gewann der Ausbau an erneuerbaren Energien weltweit zunehmend an Bedeutung. Gründe dafür sind nicht zuletzt die Endlichkeit fossiler Energieträger und die Abhängigkeit ölimportierender Länder von den Fördernationen. Ziel der Nutzung erneuerbarer Energien ist die langfristige Eindämmung der Treibhausgasemissionen und weiterer Umweltprobleme, die mit der Öl- und Gasförderung einhergehen (Geitmann, 2012). Um den bisherigen Anteil der erneuerbaren Energien von 21,6 % (REN21, 2016: Stand 2015) an der weltweiten Strom- und Wärmeherzeugung auszubauen, definierten in den vergangenen Jahren 173 Länder politische Ziele zur Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien (REN21, 2016). In Deutschland beispielsweise stieg der Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtstromerzeugung zwischen den Jahren 2014 und 2015 von 27,3 % (161.421 GWh) auf 31,5 % (187.364 GWh) (BMW, 2016). Da auf nationaler Ebene die Energie zur Wärmebereitstellung mit 52 % (1.338 TWh) den Primärenergiebedarf dominiert, jedoch lediglich 9,9 % dieses Anteils durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden (Stand 2014), ist das Ausbaupotential für umweltschonende Alternativen gerade im Wärmesektor groß (BMW, 2015).

Neben Technologien zur Nutzung von Biomasse, Solarenergie und Wind ist die thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes eine vielversprechende und zunehmend verbreitete Anwendung. Sie ist vielseitig zur Wärmeabgewinnung, Gebäudekühlung und saisonal alternierenden Nutzung beider Anwendungen nutzbar und unabhängig von jahreszeitlichen und täglichen Schwankungen. Zusammen mit der Umweltwärme trägt die oberflächennahe Geothermie im zweiten Quartal des Jahres 2016 mit einem Anteil von 7,3 % (6,9 TWh) zu der Wärmebereitstellung durch erneuerbare Energien bei (UBA, 2016).

Allerdings steht der Ausbau der thermischen Untergrundnutzung, nicht zuletzt auf Grund der vergleichsweise hohen Investitionskosten und der erst kurz- bis mittelfristigen Erfahrungen im Systembetrieb, nach wie vor in Konkurrenz mit den konventionellen Energiesystemen wie Öl- und Gasheizungen. Das bestätigt vor allem der Anteil von 87 % (2013), den die Öl- und Gasheizsysteme an den insgesamt installierten Heizungsanlagen tragen (Bundesverband Geothermie, 2015).

Um die Nutzung des Untergrundes als vielseitig einsetzbare und nachhaltige thermische Ressource zukünftig voranzutreiben, muss sich die Wissenschaft neuen Herausforderungen stellen. Dazu gehören die Steigerung der Systemeffizienz, die Überwindung von Planungsunsicherheiten sowie die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Konkur-

renzfähigkeit gegenüber anderen Energiesystemen. Hohes Potential zur Bewältigung dieser Herausforderungen zeigen Gebiete mit konzentriertem Wärme- und Kältebedarf wie Gewerbegebiete oder urbane Wohnsiedlungen. Allerdings muss gerade im Wohnsektor, wo für Einfamilienhäuser in der Regel die Installation individueller Systeme erfolgt, der Einfluss anderer Untergrundnutzungen berücksichtigt werden. Zukünftig sind die stetige technische Optimierung und die Entwicklung von Nutzungsansätzen zur fortschreitenden Integration erneuerbarer Technologien im Energiemix wichtige Grundsteine für die langfristige Bereitstellung von umweltschonenden Alternativen zu fossilen Energieträgern.

2 Motivation und Zielstellung

Die thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes hat sich in den vergangenen zehn Jahren als zuverlässige regenerative Energiequelle am Markt etabliert. Mit einem durchschnittlichen Jahreszuwachs von etwa 17.000 installierten geothermischen Systemen summiert sich die Zahl der im Jahr 2015 bundesweit im Betrieb befindlichen Erdwärmepumpen auf 333.000 Systeme (Bundesverband Geothermie, 2016). Einen wesentlichen Beitrag zur Anerkennung dieser erneuerbaren Energie leistet die stetige technische Weiterentwicklung der geothermischen Systeme. Dazu zählen die Steigerung der Effizienz erdgekoppelter Wärmepumpen (Staffell et al., 2012), die Bewertung geeigneter Verfüllmaterialien (Erol und François, 2014; Indacoechea-Vega et al., 2015) sowie die Verbesserung der Systemkonfiguration und Optimierung des Betriebes von Erdwärmesondenfeldern (Bayer und de Paly, 2014).

Allerdings betrachten Studien zur technischen Verbesserung von Erdwärmesonden die Untergrundbedingungen vereinfacht. Die Mächtigkeit der mit Grundwasser ungesättigten Schichten, anthropogene Wärmequellen und Grundwasserströmungen werden in der Regel vernachlässigt. Besonders bei einer erhöhten Konzentration thermischer Untergrundnutzungen wird die Bedeutung der Komplexität der relevanten Strömungs- und Wärmetransportprozesse, beispielsweise für die standortspezifische Variation thermischer Entzugsleistungen oder das Risiko für thermische Interaktionen zwischen benachbarten geothermischen Systemen, nicht realistisch abgebildet. Die resultierenden Unsicherheiten wirken sich auf die Analyse langfristiger Umweltauswirkungen und die Bewertung des Energiedargebotes im oberflächennahen Untergrund aus. Während beispielsweise die Studien von Pannike et al. (2006) und Hähnlein et al. (2010) sensitive Wärmetransportparameter identifizieren und Methoden zur Vorhersage induzierter Temperaturanomalien veröffentlichen, fehlt eine Untersuchung des Einflusses konkreter Untergrundcharakteristika auf das verfügbare oberflächennahe Energiedargebot. Für einen effizienten Betrieb geothermischer Systeme ist es notwendig, den Einfluss aller potentiell relevanten Untergrundeigenschaften bei der Vorerkundung eines Standortes zu betrachten. Darüber hinaus bedarf es der Entwicklung standortspezifischer Erschließungsansätze für eine nachhaltige geothermische Bewirtschaftung des urbanen Raumes. Die Herausforderungen der intensiven Untergrundnutzungen müssen vielmehr als Chance und weniger als Problem angesehen werden.

Zur Minimierung der Planungsunsicherheiten, die mit der Untergrundparametrisierung und der individuellen geothermischen Nutzung im urbanen Raum einhergehen, werden folgende Arbeitshypothesen untersucht:

- 1) Die Grundwasserströmungsbedingungen und die Mächtigkeit der ungesättigten Zone des Untergrundes sind neben der Wärmeleitfähigkeit des porösen Mediums Schlüsselparameter für die Planung oberflächennaher geothermischer Systeme.
- 2) Die vereinfachte Planungspraxis, die aus Kostengründen speziell bei Systemen mit Heizleistungen kleiner als 30 kW Anwendung findet, bildet die relevanten Untergrundbedingungen nicht hinreichend genau ab. Folglich steigt das Risiko für die Über- und Unterschätzung des lokalen geothermischen Potentials.
- 3) Eine nachhaltige und effiziente geothermische Bewirtschaftung des Untergrundes im urbanen Raum bedarf einer Erweiterung der Betrachtungsskala über die Grundstücksgrenzen hinaus, sodass insbesondere das Risiko für thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen minimiert wird.

Grundlage der Prüfung dieser Thesen ist das im Folgenden erläuterte Arbeitsschema (Abbildung 2-1). Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die Definition von Szenarien, die sich an bestehenden bzw. geplanten thermischen Untergrundnutzungen im urbanen Raum orientieren (Abschnitt I.). Auf Grundlage der in Untersuchungsgebieten durchgeführten Messkampagnen werden Daten zur Parametrisierung der Modellstudien erhoben (Abschnitt II.). Die modellbasierte Analyse des Einflusses ausgewählter Untergrundcharakteristika auf die thermische Untergrundnutzung bildet die Grundlage für die Bewertung relevanter Strömungs- und Wärmetransportprozesse (Abschnitt III.). Dabei wird die Bedeutung der Advektion für die thermische Entzugsleistung des oberflächennahen Untergrundes analysiert. Auch der Einfluss des Grundwasserflurabstandes wird insbesondere in Hinblick auf flache geothermische Systeme untersucht. Es wird dargestellt wie advektiver und konduktiver Wärmetransport die Ausbildung von Temperaturanomalien beeinflussen. Der Fokus liegt dabei auf Systemen, die in geringem Abstand von 10 bis 20 m zueinander installiert sind. In Anlehnung an die identifizierten relevanten Parameter und Prozesse wird ein standortspezifischer Erkundungsansatz vorgestellt. Zur Untersuchung des Vorteils dieses Ansatzes erfolgt eine Gegenüberstellung mit dem vereinfachten Vorgehen bei der Untergrundparametrisierung anhand von Literaturdaten und Karten (Abschnitt III.). Abschließend wird in einem Synthesekapitel ein Konzept für eine geothermische Erschließung von urbanen Wohngebieten vorgestellt (Abschnitt IV.). Dabei wird diskutiert, welche finanziellen Optionen eine Erschließung über die Grundstücksgrenzen hinaus bietet und welche Einschränkungen bei der energetischen Bestandssanierung existieren.

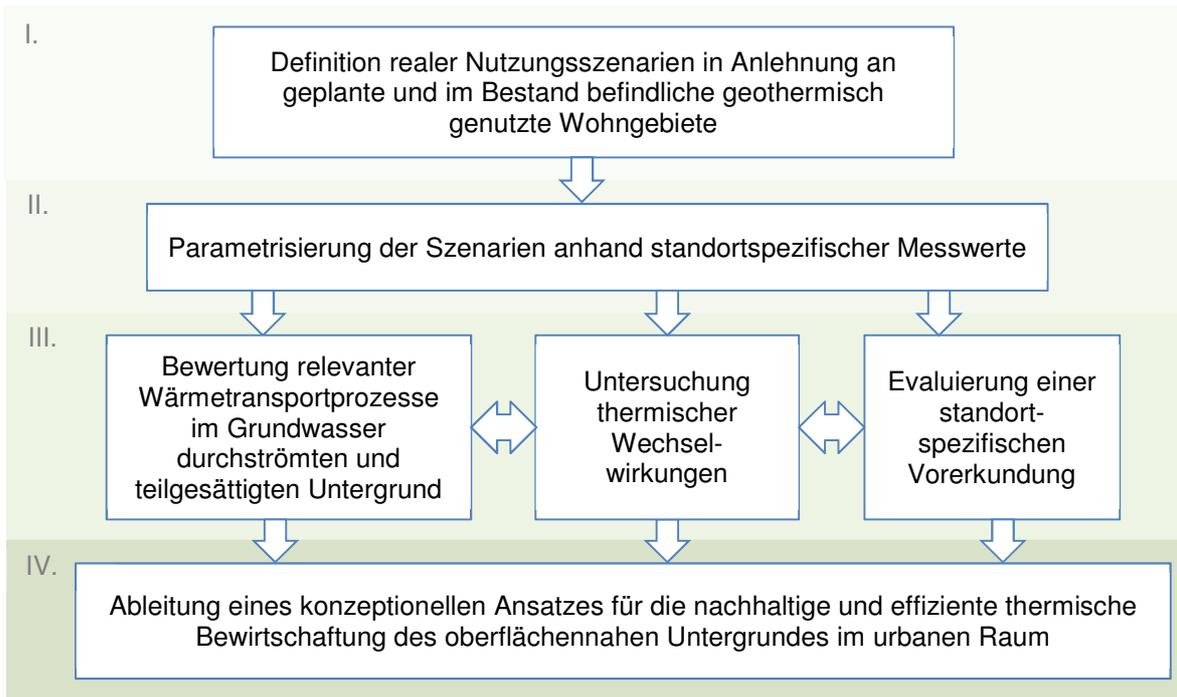


Abbildung 2-1: Schema zur Ableitung eines konzeptionellen Ansatzes für eine nachhaltige thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes im urbanen Raum.

3 Grundlagen

3.1 Thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes

Die thermische Nutzung des Untergrundes ist deutlich von den regionalen geologischen Bedingungen abhängig. Während ein hoher geothermischer Gradient in Ländern wie Island, den USA oder der Türkei die Nutzung von Hoch- bis Mittelenthalpie-Lagerstätten zulässt, beschränken die geologischen Bedingungen in Deutschland die geothermische Untergrundnutzung größtenteils auf die Erschließung von Geringenthalpie-Lagerstätten. Die geothermisch erschlossenen Tiefen dieser Lagerstätten reichen im oberflächennahen Bereich meist von 50 bis 150 m, selten bis 400 m. Bei oberflächennahen Systemen wird die im Untergrund verfügbare geothermische Energie zum einen von dem geothermischen Wärmestrom des Erdinneren ($0,05$ bis $0,12 \text{ Wm}^{-2}$) und zum anderen, überwiegenden Teil aus solarer Strahlung (1.000 Wm^{-2}) gespeist (Abbildung 3-1). Saisonale Schwankungen der Solarstrahlung wirken sich dabei auf das Temperaturregime der oberen 10 bis 20 m des Untergrundes aus. Tiefer liegende Schichten charakterisiert eine zeitlich konstante Untergrundtemperatur, die der mittleren Atmosphärentemperatur entspricht (Bußmann, 2012; Stober und Bucher, 2012; VDI 4640-1, 2010). Im urbanen Raum beeinflusst zudem die Ausbildung unterirdischer Wärmeinseln das oberflächennahe Temperaturregime (Abbildung 3-1). Dabei erwärmt sich der Untergrund unter Städten sowohl durch natürliche Wärmequellen als auch durch anthropogene Quellen wie Keller oder Tunnel (Ferguson und Woodbury, 2007). Fallstudien zeigen, dass Temperaturen im urbanen Untergrund deutlich über den natürlichen Untergrundtemperaturen liegen, z. B. sind die Temperaturen in Köln und Winnipeg (Kanada) bis zu 5 K (Zhu et al., 2010) oder in Basel bis zu 9 K (Epting und Huggerberger, 2013) über dem natürlichen Wert.

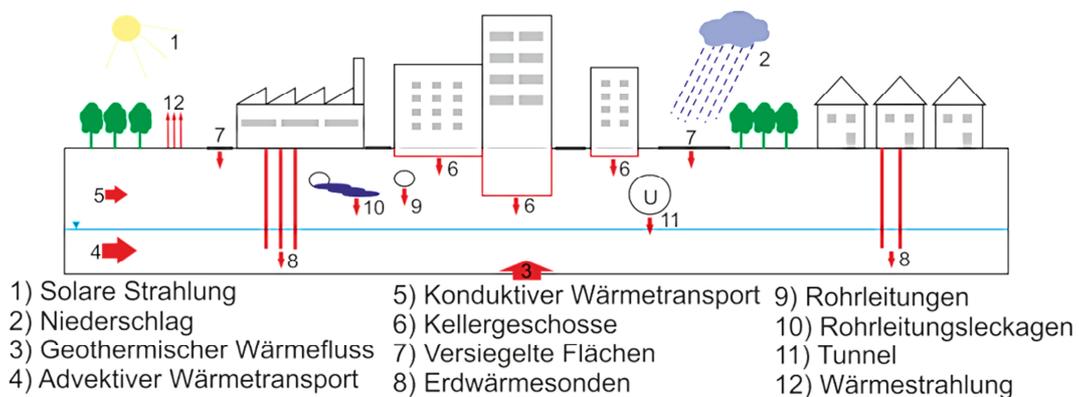


Abbildung 3-1: Natürliche und anthropogene Wärmequellen im urbanen Untergrund (verändert nach Florides und Kalogirou, 2007; Menberg et al., 2013; Umweltbundesamt, 2015; VDI 4640-1, 2010).

3.1.1 Geothermische Systeme

Die im oberflächennahen Untergrund gespeicherte Energie kann je nach geologischen, hydrogeologischen und hydrogeochemischen Bedingungen durch offene oder geschlossene geothermische Systeme genutzt werden. Offene geothermische Systeme nutzen das Grundwasser direkt als Wärmeträgermedium, indem es durch einen oberstromig gelegenen Entnahmebrunnen zum Wärmetauscher gepumpt und anschließend durch einen unterstromig platzierten Schluckbrunnen in den Untergrund eingespeist wird (Abbildung 3-2: a). Geschlossene Systeme unterscheidet man in horizontale Erdwärmekollektoren, die in ein bis zwei Meter Tiefe unterhalb der Frostschutzgrenze verlegt sind und vertikal installierte Erdwärmesonden. Letztere werden über eine Haspel in Bohrlöcher von bis zu 400 m Tiefe eingebracht (Abbildung 3-2: b). Sie sind mit einem Marktanteil von circa 60 % die in Deutschland dominierende Technologie (Bundesverband Geothermie, 2015; Lund et al., 2004; Stober und Bucher, 2012). Man unterscheidet Doppel-U-, Einfach-U- und Koaxial-Erdwärmesonden, deren Rohre meist aus Polyethylen bestehen (Abbildung 3-2: c). Angetrieben durch eine Umwälzpumpe zirkuliert im Inneren der Erdwärmesonden ein Wärmeträgerfluid, das sich meist aus einem Gemisch aus Wasser und einem umweltverträglichen Frostschutzmittel wie Ethylenglycol zusammensetzt (Brielmann et al., 2011; Lund et al., 2004). Eine optimale thermische Verbindung zwischen dem Wärmeträgerfluid und der Untergrundmatrix gewährleistet ein thermisch verbessertes Hinterfüllmaterial im Bohrloch (Bockelmann et al., 2010; Bußmann, 2012; Florides und Kalogirou, 2007).

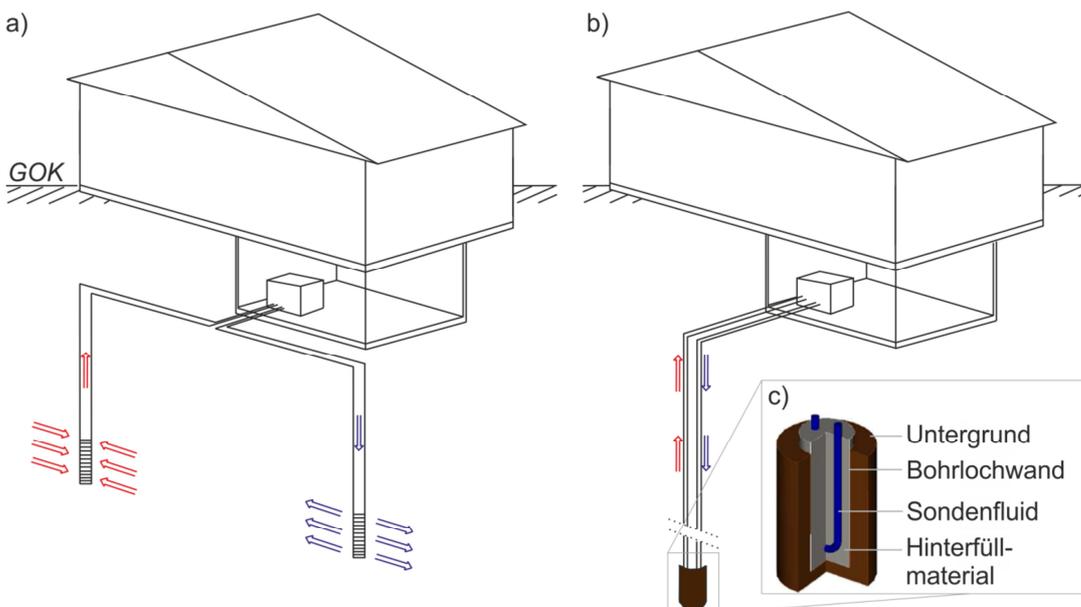


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung oberflächennaher geothermischer Systeme: a) Offenes System mit Entnahme- und Schluckbrunnen, b) Geschlossenes System mit einer Einfach-U-Erdwärmesonde, c) Detailausschnitt einer Einfach-U-Erdwärmesonde (ohne Maßstab, verändert nach Sanner et al., 2003 und Zheng et al., 2015).

Unabhängig von der Art des installierten geothermischen Systems ist die Schnittstelle zwischen der unterirdischen Installation und der Haustechnik der flachen geothermischen Systeme immer ein Wärmepumpenkreislauf. Unter Zuführung von elektrischer Energie hebt die Wärmepumpe die dem Untergrund entzogene Energie auf das Energieniveau des Heizsystems an. Die detaillierte Funktionsweise des Wärmepumpenkreislaufes mit seinen Komponenten Verdampfer, Kondensator, Kompressor und Expansionsventil erläutern Baumann et al. (2006), Bockelmann et al. (2010) und Schlabbach et al. (2012).

Die Beurteilung der Wärmepumpeneffizienz basiert auf der Jahresarbeitszahl, die das jährliche Verhältnis aus abgegebener Wärmeleistung und aufgenommener elektrischer Arbeit quantifiziert. Sie gilt immer unter Berücksichtigung der systemspezifischen Randbedingungen und wird stark vom Nutzerverhalten beeinflusst. Je höher die Jahresarbeitszahl ist, desto geringer ist der Anteil an benötigtem Strom. Eine hohe Jahresarbeitszahl führt dazu, dass dem Untergrund zur Deckung des Wärmebedarfes des Gebäudes bei sonst gleichen Bedingungen weniger Energie entzogen werden muss (Gl. 3-1; Loose, 2007):

$$(Gl. 3-1) \quad P_U = P_W \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$$

Wobei gilt: P_U ist die dem Untergrund zu entnehmende Energie in W, P_W ist der Wärmebedarf des Gebäudes in W, und ε ist die dimensionslose Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. In der Praxis schwankt die Jahresarbeitszahl in der Regel zwischen drei und vier (Loose, 2007). Es ist zu beachten, dass zwischen der Jahresarbeitszahl und der Leistungszahl (im Englischen Coefficient of Performance, kurz COP) unterschieden wird. Im Gegensatz zur Jahresarbeitszahl spiegelt die Leistungszahl einen Momentanwert wider, der unter definierten Laborbedingungen (DIN EN 14511, 2013) aus dem Verhältnis zwischen Heizleistung und Antriebsenergie ermittelt wird (Bürger und Neschen, 2012; Bußmann, 2012; Schlabbach et al., 2012).

Eine weitere Anwendung der oberflächennahen Geothermie ist die Wärmespeicherung, d. h. das gezielte Einbringen von Wärme in den Untergrund mit optionaler späterer Entnahme. Beispielsweise wird die Überschusswärme, die bei der Kühlung von Wohngebäuden in den Sommermonaten anfällt, im Untergrund gespeichert, um den Wärmeentzug in den Wintermonaten zu optimieren (u. a. Possemiers et al., 2014). Generell wird davon ausgegangen, dass der saisonale Wärmeeintrag zu einer Verbesserung der Energiebilanz des Untergrundes führt (u. a. Dickinson et al., 2009). Die Bilanz zwischen eingetragener und entnommener Energie ist in der Regel unausgeglichen. Allerdings verbessert sich das langzeitliche Temperaturniveau, da durch die Wärmespeicherung zumin-

dest ein Teil der in den Wintermonaten entnommenen Energie nachgeliefert wird. Die Abgabe von Überschusswärme in den Untergrund findet beispielsweise in der Industrie zur Kühlung von Lagerhallen oder zur Abführung von Prozesswärme Anwendung (u. a. Lippmann und Tsang, 1980). Technisch erfolgt die Wärmeabgabe in den Untergrund sowohl mit geschlossenen Erdwärmesondenspeichern als auch mit offenen Aquiferspeichern. Allerdings müssen bei Aquiferspeichern die chemische Beschaffenheit und die Dynamik des Grundwasserleiters bekannt sein, um eine optimale Planung des Systems zu ermöglichen (DGG und DGGT, 2014; Sanner et al., 2003; Schlabbach et al., 2012).

3.1.2 Umweltauswirkungen und Risiken

Die Auswirkungen der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes sind zum einen die im Untergrund induzierten Temperaturänderungen, die die chemischen und mikrobiologischen Untergrundbedingungen beeinflussen. Zum anderen existieren technische Risiken durch das Abteufen der Bohrung im Allgemeinen und die Installation der Erdwärmesonde.

Die durch den Wärmeentzug bzw. Wärmeeintrag induzierten Umweltauswirkungen sind wesentlich von der Intensität der Temperaturänderung abhängig. Generell bewirken höhere Temperaturänderungen stärkere Auswirkungen auf die chemischen, physikalischen und mikrobiologischen Untergrundbedingungen (UBA, 2015). Die Temperaturänderungen können das geochemische Gleichgewicht der im Untergrund vorkommenden Minerale verändern, indem beispielsweise Lösungsreaktionen der Silikate oder Feldspate sowie Reaktionen zur Calcitausfällung beeinflusst werden (Arning et al., 2006). Auch die Anwendung thermischer Untergrundspeicher (mit Temperaturen über 45 °C) kann die Mobilisierung von organischem Material und die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid fördern (Brons et al., 1991). In direktem Zusammenhang mit den geochemischen Veränderungen können Temperaturanomalien die mikrobiologische Zusammensetzung des Untergrundes beeinflussen, da die mikrobiologische Diversität mit der thermisch verursachten Änderung der Nährstoff- und Substrateigenschaften korreliert (Brielmann et al., 2011; Lerm et al., 2011).

Potentielle technische Risiken bei der thermischen Nutzung des Untergrundes sind überwiegend mit dem Abteufen einer Bohrung verbunden und damit nicht speziell auf die Anwendung oberflächennaher Geothermie begrenzt. Das Durchteufen verschiedener Stockwerke kann zu unerwünschten hydraulischen Kurzschlüssen zwischen Grundwasserleitern mit variierender chemischer Zusammensetzung führen. In seltenen Fällen sind auch Austritte artesisch gespannten Grundwassers und oberflächennahe Hebungs- und

Senkungserscheinungen Folgen des Abteufens von Bohrungen (Butscher et al., 2011; LAWA, 2011; Scholz und Stober, 2001; Tholen und Walker-Hertkorn, 2008). Aus genehmigungsrechtlicher Sicht ist zudem eine Verunreinigung des Grundwassers durch das Erdwärmesondenfluid, das bei einer Leckage austreten kann, zu verhindern (VDI 4640-1, 2010). In der Praxis wird dieses Risiko durch eine automatisierte technische Überwachung des Erdwärmesondendruckes und der sofortigen Deaktivierung der Umwälzpumpe bei Druckabfall minimiert (BWP, 2012).

3.1.3 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen

Oberstes Ziel aller rechtlichen Vorgaben, die die thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes tangieren, ist der Schutz des Grundwassers als Trinkwasserressource. Daher gelten sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene verschiedene Gesetze und Richtlinien, die die Belange der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes abdecken. Europaweit wird die thermische Nutzung des Untergrundes durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG, 2000) und Grundwasserrichtlinie (Richtlinie 2006/118/EG, 2006) tangiert. Sie bestimmen zum einen, dass ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserentnahme und -neubildung herrschen muss. Zum anderen fordern sie den guten chemischen Zustand des Grundwassers (DGG und DGGT, 2014). In Deutschland selbst existiert kein Gesetz für eine bundesweit einheitliche Regelung der thermischen Untergrundnutzung. Vielmehr gelten verschiedene Landesgesetze, Erlasse, Richtlinien und Leitfäden der Bundesländer (Hähnlein et al., 2011).

Wasserhaushaltsgesetz

In erster Linie wird die thermische Untergrundnutzung in Deutschland durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und das Bundesberggesetz (BBergG) bestimmt. Nach § 9 Abs. 2 WHG sind thermische Untergrundnutzungen durch Erdwärmesonden als Benutzung zu verstehen, da sie Maßnahmen darstellen, „die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen“. Auch offene Systeme stellen eine Benutzung dar, weil ihre Anwendung gemäß § 9 Abs. 1 WHG ein „Entnehmen, Zutagefördern [...] und Ableiten von Grundwasser“ darstellt. Folglich bedarf die Anwendung beider Systeme einer Erlaubnis oder Bewilligung nach § 8 WHG. Erdwärmekollektoren stehen in der Regel nicht im Kontakt mit dem Grundwasser und benötigen daher keine wasserrechtliche Erlaubnis. Der durch das Wasserhaushaltsgesetz definierte Rahmen wird durch die Landeswassergesetze der Bundesländer erweitert und konkretisiert. Vorhaben müssen bei den Landesbehörden angezeigt und durch sie überwacht werden. Die Landesbehörden prüfen, ob sich die geplante Grundwasserbenutzung in einem Trinkwasserschutzgebiet, Heilquellenschutzgebiet oder in

anderen schützenswerten Grundwasservorkommen befindet und damit die Genehmigung untersagt werden muss (Schlabbach et al., 2012; WHG, 2009).

Bundesberggesetz und Lagerstättengesetz

Das Bundesberggesetz (BBergG) definiert gemäß § 3 Abs. 3 BBergG Erdwärme als bergfreien Bodenschatz. Es bedarf nach § 7 BBergG der Erlaubnis für das Aufsuchen und nach § 8 BBergG der Bewilligung für das Gewinnen dieses bergfreien Bodenschatzes. Abweichend davon gilt gemäß § 4 Abs. 2 BBergG, dass keine Bewilligung gefordert ist, wenn die thermische Nutzung des Untergrundes „in einem Grundstück aus Anlaß oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung“ steht. Demnach ist für geothermische Systeme, deren Nutzung keine Auswirkungen auf das Nachbargrundstück haben und deren Heizbedarf 30 kW nicht überschreitet, keine bergrechtliche Bewilligung nötig (Benz, 2009). Erreicht die geplante Bohrung jedoch eine Ziel-tiefe von über 100 m unter Geländeoberkante muss die Bohrung gemäß § 127 Abs. 1 BBergG der Bergbehörde angezeigt und, wenn gefordert, ein Betriebsplan für die Bohr-arbeiten ausgestellt werden (BBergG, 1980; DGG und DGGT, 2014). Ergänzend zu den Vorgaben anderer Gesetze gilt das Lagerstättengesetz (LagerstG). Dieses besagt, dass alle mit mechanischer Kraft in den Untergrund eingebrachten Bohrungen ungeachtet ihrer Tiefe der zuständigen Behörde, meist die staatlichen geologischen Dienste der Länder, angezeigt werden müssen, um u. a. (hydro-) geologische und geophysikalische Daten in Datenbanken zu sammeln und für weitere Nutzungen zur Verfügung zu stellen (DGG und DGGT, 2014).

Neben dem Wasserhaushaltsgesetz, den Landeswassergesetzen, dem Bundesberg- und dem Lagerstättengesetz können in Einzelfällen auch weitere Gesetze die thermische Nutzung des Untergrundes tangieren. Beispiele dafür sind das Bundes-Bodenschutz-gesetz (BBodSchG) und das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG; Hähnlein et al., 2011; Stober und Bucher, 2012).

Richtlinien und Leitfäden

Ergänzend zu den genannten Gesetzen existieren auf Bundes- und Länderebene Richt-linien und Leitfäden zur Nutzung von oberflächennahen geothermischen Systemen. Anders als die Gesetzestexte fokussieren diese Papiere die thermische Nutzung des Untergrundes. Die VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 bis 3 (2001 und 2010) informiert über die geo-thermischen Systeme und relevanten Untergrundparameter wie beispielsweise die charak-teristische Wärmeleitfähigkeit, hydraulische Leitfähigkeit und Wärmekapazität. Sie erläutert die Grundlagen zur Dimensionierung von Systemen mit Heizleistungen kleiner als 30 kW und gibt exemplarisch die zur Nutzung von Erdwärmesonden zu erwartenden sediment-

spezifischen thermischen Entzugsleistungen an (VDI 4640 1-3, 2001 und 2010). Zudem sind in dieser nationalen Richtlinie Temperaturgrenzwerte gegeben wie beispielsweise für die Vorlauftemperatur des Wärmeträgermediums in der Erdwärmesonde. Sie gibt vor, dass das Fluid, verglichen mit der ungestörten Erdreichstemperatur, nicht mehr als ± 12 K geändert werden soll (VDI 4640-2, 2001). Zur Minimierung des Einflusses thermischer Wechselwirkungen gibt die VDI 4640-1 (2010) für einzelne Erdwärmesonden einen Mindestabstand von 5 m bei einer Sondenlänge von 40 bis 50 m bzw. von 6 m bei Sondenlängen von über 50 bis 100 m vor. Diese Vorgaben sind vergleichbar mit den Empfehlungen der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zum frostfreien Betrieb und zum Betrieb unter Ausschluss der thermischen Beeinflussung des Nachbargrundstückes (LAWA, 2011).

Neben diesen Richtlinien existieren auf der Ebene der Bundesländer Leitfäden zur thermischen Nutzung des Untergrundes. Sie geben ergänzend zu den allgemeinen Informationen Auskünfte zu länderspezifischen Vorgaben wie der Nutzung von Abstandhaltern bei der Installation von Erdwärmesonden und Mindestabständen zwischen Erdwärmesonden eines Systems und benachbarten geothermischen Systemen (Tabelle 3-1; u. a. Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009; BWP, 2012; Hähnlein et al., 2011).

Tabelle 3-1: Vorgegebene Mindestabstände zwischen Erdwärmesonden eines Systems und zwischen benachbarten Systemen (Auszug aus Hähnlein et al., 2011).

Bundesland	Mindestabstand [m]	
	zur nächsten Erdwärmesonde	zum Nachbargrundstück
Bayern	6	5
Berlin	5 - 6	5
Niedersachsen	5	10
Rheinland-Pfalz	10	3

Ergänzend zu den Leitfäden und Richtlinien wurden in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Vorgaben und Maßnahmen zur Qualitätsüberwachung für die Planung, die Installation und den Betrieb von Erdwärmesonden veröffentlicht. Sie haben das Ziel, potentielle Risiken, wie die des Abteufens einer Bohrung zu minimieren. Exemplarisch sind hier die Arbeitsblätter des Deutschen Vereins für Gas- und Wasserfach (DVGW) zu nennen, wie das im Juli 2013 veröffentlichte Arbeitsblatt W 120-2: Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik und oberflächennahe Geothermie (Rumohr und Schäfer, 2013).

3.1.4 Planung und Dimensionierung

Kennwerte für die Planung und Dimensionierung eines Erdwärmesondensystems sind die thermischen Entzugsleistungen des Untergrundes sowie der für die Wärme- bzw. Kälteversorgung eines Gebäudes benötigte Energiebedarf. Dieser Energiebedarf hängt entscheidend von der Gebäudestruktur (Dämmung und Wohnfläche) ab (Schlabbach et al., 2012). Die thermischen Entzugsleistungen werden neben technischen Werten wie den jährlichen Betriebsstunden eines Systems und dem Jahreszyklus der Wärmeentnahme (in der Heizphase) im Wesentlichen von den standortspezifischen thermophysikalischen und hydrodynamischen Eigenschaften des Untergrundes bestimmt. Als einflussreiche Parameter sind vor allem die Wärmeleitfähigkeit und die Grundwasserfließgeschwindigkeit hervorzuheben (Schlabbach et al., 2012; Vergleich Kapitel 4).

Die Charakterisierung der relevanten Untergrundeigenschaften wird in der Praxis je nach Heizbedarf des zu versorgenden Gebäudes und der Komplexität des geplanten Systems unterschiedlich umgesetzt. Für Anlagen mit Heizleistungen unter 30 kW werden zur Bewertung der Untergrundeigenschaften aus finanziellen Gründen meist ausschließlich geologische und geothermische Karten sowie Literaturangaben herangezogen. Auf die standortspezifische Erkundung der Untergrundgegebenheiten muss in der Regel verzichtet werden (Vergleich Kapitel 6.3.1). Die geothermischen Karten der Landesämter enthalten Angaben zu den regionalen geothermischen Potentialen. Exemplarisch zu nennen ist der Geothermieatlas Sachsens und die geothermische Karte Nordrhein-Westfalens (Geologischer Dienst NRW, 2015; LfULG, 2016). Ziel der geothermischen Karten ist es, anhand von (hydro-) geologischen Daten und Karten die geothermische Nutzbarkeit eines Standortes für verschiedene Tiefenstufen zu bewerten. Alternativ dazu werden in der Praxis häufig auch Werte der spezifischen thermischen Entzugsleistungen aus den Tabellen der VDI 4640-2 (2001) entnommen. In der VDI 4640-2 (2001) sind tabellarisch die Zusammenhänge zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und den zu erwartenden thermischen Entzugsleistungen für 1.800 und 2.400 Betriebsstunden (ohne und mit Warmwasseraufbereitung) dargestellt. Diese Angaben gelten allerdings für bestimmte Systemeigenschaften und definierte Randbedingungen. Während für trockene Sedimente mit Wärmeleitfähigkeiten kleiner als $1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ spezifische Entzugsleistungen von 25 Wm^{-1} anzusetzen sind, charakterisieren Festgesteine mit Wärmeleitfähigkeiten von $1,5$ bis $3,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und Grundwasser gesättigte Sedimente thermische Entzugsleistungen von 60 Wm^{-1} (Tholen und Walker-Hertkorn, 2008; VDI 4640-2, 2001). Vereinfacht kann die benötigte Installationslänge der Erdwärmesonden L_{BHE} in m als Quotient aus der für die Gebäudeversorgung benötigten Energie P_w in W und der spezifischen Entzugsleistung des

Untergrundes P_{ext} in Wm^{-1} berechnet werden (Gl. 3-2; Koenigsdorff, 2011; Stober und Bucher, 2012):

$$(Gl. 3-2) \quad L_{BHE} = \frac{P_w}{P_{ext}}$$

In der Praxis wird die spezifische Entzugsleistung des geschichteten Untergrundes über die Mächtigkeiten der durchteuften Schichten gewichtet und zur Berechnung der benötigten Installationslänge der Erdwärmesonden genutzt (LfULG, 2013).

Da sowohl die Angaben der geothermischen Karten als auch die Tabellenwerte der VDI 4640-2 (2001) die relevanten Untergrundeigenschaften annähern, werden in der Praxis für komplexe geothermische Anwendungen mit Heizleistungen größer als 30 kW umfangreichere Planungs- und Erkundungsuntersuchungen empfohlen. So werden zur Bestimmung der standortspezifischen Wärmeleitfähigkeit und des Bohrlochwiderstandes in der Regel Thermal Response Tests durchgeführt. Als Ergebnisse dieser Tests werden die lokalen thermischen Entzugsleistungen abgeleitet. Bei der Durchführung des in-situ Thermal Response Tests wird über eine mobile Messapparatur ein definierter Energieeintrag einer Erdwärmesonde zugeführt. Als Reaktion auf die in Form von Wärme eingebrachte Energie erhöht sich die Untergrundtemperatur je nach den Wärmetransporteigenschaften des Untergrundes zu Beginn des Versuches stärker und nähert sich über die Zeit einem konstanten Wert an (Florides und Kalogirou, 2007; Sanner et al., 2005; Tinti et al., 2015). Auf Grundlage der Kelvin'schen Linienquellentheorie (1856) entwickelte Hellström (1991) unter Voraussetzung des entsprechenden Zeitkriteriums folgende Berechnungsgrundlage (Gl. 3-3 bis 3-6; zitiert in Tholen und Walker-Hertkorn, 2008):

$$(Gl. 3-3) \quad T_f = m \ln(t) + b$$

$$\text{mit: (Gl. 3-4)} \quad m = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda H}$$

$$(Gl. 3-5) \quad b = \frac{\dot{Q}}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_T}{r_0^2} \right) - e \right] + R_B \right) + T_0$$

$$\text{für: (Gl. 3-6)} \quad t > \frac{5r_0^2}{\alpha_T}$$

Wobei gilt: T_f ist die mittlere Fluidtemperatur in $^{\circ}\text{C}$, \dot{Q} ist die Heizleistung in W , λ ist die Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, H ist die Tiefe der Erdwärmesonde in m , t ist die Zeit in s , α_T ist die Temperaturleitfähigkeit in ms^{-1} , r_0 ist der Bohrlochradius in m , e ist die dimensionslose Euler'sche Zahl, R_B ist der thermische Bohrlochwiderstand in mKW^{-1} , und T_0 ist die ungestörte Untergrundtemperatur in $^{\circ}\text{C}$. Ist der gemessene Zusammenhang zwischen der

mittleren Mediumstemperatur (y -Achse) und dem Logarithmus der Zeit (x -Achse) graphisch aufgetragen, ergibt sich auf der Grundlage der Gleichungen 3-3 bis 3-6 durch die Regressionsgerade die Wärmeleitfähigkeit und der Bohrlochwiderstand (Tholen und Walker-Hertkorn, 2008). Das Ergebnis der Wärmeleitfähigkeit stellt einen integral über die Erdwärmesondentiefe gemittelten Wert dar. Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten bzw. thermischen Entzugsleistungen einzelner Schichten dient der tiefenorientierte Enhanced Thermal Response Test (z. B. Heidinger et al., 2004; Luo et al., 2015).

Die über den Thermal Response Test bestimmten standortspezifischen Kennwerte werden bei größeren geothermischen Systemen als Eingangswerte für die Dimensionierung genutzt (Vergleich Kapitel 3.3). Die Bandbreite der Ansätze zur Dimensionierung geothermischer Systeme reicht von analytischen Lösungen der Wärmetransportprozesse (Stauffer et al., 2014) über Softwaretools wie dem Earth Energy Designer EED (Buildingphysics, 2008), EWS (Huber, 2011) oder geo-HAND (Koenigsdorff und Veser, 2008) bis hin zu numerischen Verfahren (Capozza et al., 2012; Chiasson et al., 2000).

Ziel aller Anwendungen ist die möglichst genaue Bestimmung relevanter Planungsparameter wie der thermischen Entzugsleistung und der Installationslänge der Erdwärmesonden. Damit wird das Risiko für die Unter- und Überdimensionierung des geothermischen Systems minimiert. Bei einer Unterdimensionierung der Systeme ist die langfristige Wärme- bzw. Kälteversorgung nicht gesichert und das Risiko für das Auftreten von Frost-Tau-Wechseln entlang der Erwärmesonde erhöht. Dagegen resultiert eine Überdimensionierung der Sonden in erhöhten Investitionskosten wie z. B. für das Abteufen der Bohrung. Diese erhöhten Investitionskosten verschlechtern die Konkurrenzfähigkeit erdgekoppelter Wärmepumpen gegenüber Luftwärmepumpen und anderen konventionellen Heizsystemen. Zusätzlich wird durch die Anwendung der Planungssoftware eine Steigerung der Effizienz angestrebt, die die Jahresarbeitszahl optimiert und die Betriebskosten verringert (Chiasson et al., 2000; Koenigsdorff, 2011).

3.2 Strömung und Wärmetransport im Untergrund

3.2.1 Grundwasser gesättigter Untergrund

Grundwasserströmung

Das Darcy-Gesetz beschreibt die Ausbildung der Grundwasserströmung in Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes in Richtung eines Potentialgefälles (Domenico und Schwartz, 1997; Kinzelbach und Rausch, 1995; Gl. 3-7):

$$(Gl. 3-7) \quad \dot{q}_h = -K \nabla h$$

Wobei in isotropen Medien gilt: \dot{q}_h ist der Volumenstrom des Grundwassers in m^3s^{-1} , K der Durchlässigkeitstensor ($K_x = K_y = K_z$) in ms^{-1} und ∇h repräsentiert das Potentialgefälle im Grundwasser in mm^{-1} . Für den eindimensionalen Fall kann das Darcy-Gesetz wie folgt vereinfacht werden (Hölting und Coldewey, 2013; Gl. 3-8):

$$(Gl. 3-8) \quad q_h = k_f A i$$

Wobei gilt: k_f ist der Durchlässigkeitsbeiwert in ms^{-1} , A ist die durchströmte Fläche in m^2 , und i ist der dimensionslose hydraulische Gradient als Quotient aus Fließlänge und Potentialhöhenunterschied.

Anhand dieser Form der Darcy-Gleichung lässt sich bei Kenntnis des hydraulischen Gradienten und des Durchlässigkeitsbeiwertes die Filtergeschwindigkeit (auch Darcy-Geschwindigkeit) des Grundwassers v_D in ms^{-1} bestimmen. Unter Berücksichtigung der dimensionslosen effektiven Porosität des Grundwasserleiters n_{eff} ergibt sich aus der Filtergeschwindigkeit die Abstandsgeschwindigkeit v_A in ms^{-1} (Hölting und Coldewey, 2013; Gl. 3-9 und 3-10):

$$(Gl. 3-9) \quad v_D = k_f i$$

$$(Gl. 3-10) \quad v_A = \frac{v_D}{n_{eff}}$$

Die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes in porösen Medien ist auf laminare Strömungen mit Reynoldszahlen $Re < 10$ begrenzt (Domenico und Schwartz, 1997; Hillel, 1980; Hölting und Coldewey, 2013). Generell definiert die Reynoldszahl den Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung wie folgt (Al-Khoury, 2012; Koenigsdorff, 2011; Gl. 3-11):

$$(Gl. 3-11) \quad Re = \frac{v_D L_c}{\mu}$$

Wobei gilt: L_c ist die charakteristische Länge in m und vergleichbar mit dem Rohrdurchmesser bei Rohrströmung oder dem mittleren Korndurchmesser der Sedimentmatrix in m, und μ ist die kinematische Viskosität des Fluides in m^2s^{-1} .

Wärmetransport

Der Wärmetransport im Untergrund erfolgt über drei grundlegende Prozesse: Konduktion, Advektion (auch als Konvektion bezeichnet) und Wärmestrahlung. Letztere ist bei der Betrachtung oberflächennaher thermischer Untergrundnutzungen vernachlässigbar. Grundlage der Beschreibung des Energiehaushaltes im Untergrund ist die Energieerhaltung, die mit der Kontinuitätsgleichung wie folgt ausgedrückt wird (Hillel, 1980; Gl. 3-12):

$$(Gl. 3-12) \quad 0 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) \pm S$$

Wobei gilt: ρ ist die Dichte in kgm^{-3} , c ist die spezifische Wärmekapazität in $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, ∇T repräsentiert den Temperaturgradient in K, λ ist die Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, und S ist der Speicherterm in Wm^{-3} .

Die Konduktion beschreibt den Wärmetransport zwischen Feststoffen und/oder Fluiden auf Grund eines Temperaturunterschiedes. In Anlehnung an den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik erfolgt der Wärmetransport immer in Richtung der geringeren Temperatur. Vergleichbar mit dem Darcy-Gesetz beschreibt das Fouriersche Gesetz den Wärmefluss \dot{q}_{th} in Wm^{-2} entlang eines Temperaturgradienten, der wesentlich von der Wärmeleitfähigkeit λ des Feststoffes bzw. Fluides abhängt (Al-Khoury, 2012; Carslaw und Jaeger, 1986; Gl. 3-13):

$$(Gl. 3-13) \quad \dot{q}_{th} = -\lambda \nabla T$$

Advektion beschreibt, analog zum Stofftransport im Grundwasser, den Transport von Wärme mit der Grundwasserströmung. Als Summe aus konduktivem und advektivem Wärmetransport lässt sich der Wärmefluss wie folgt beschreiben (Al-Khoury, 2012; Domenico und Schwartz, 1997; Gl. 3-14):

$$(Gl. 3-14) \quad \dot{q}_{th} = -\lambda \nabla T + \rho c \dot{v} T$$

Wobei gilt: \dot{v} ist die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in ms^{-1} .

Die Geschwindigkeit v_T in ms^{-1} , mit der sich die Temperatur im Untergrund ausbreitet, wird wie folgt berechnet (Stauffer et al., 2014; Gl. 3-15):

$$(Gl. 3-15) \quad v_T = \frac{n C_w}{C_m} v$$

Wobei gilt: C_w und C_m sind die volumetrischen Wärmekapazitäten von Wasser bzw. dem porösen Medium in $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$, und n ist die dimensionslose Porosität des Grundwasserleiters. Der Faktor $\left(\frac{n C_w}{C_m}\right)$, der zur Grundwasserfließgeschwindigkeit multipliziert wird, ist ein Maß für die Verzögerung der Temperaturobreitung, verglichen mit dem Grundwasserfluss, die durch die thermischen Wechselwirkungen mit der Sedimentmatrix auftritt (Stauffer et al., 2014).

In Analogie zur Charakterisierung von Schadstofftransportprozessen dient die dimensionslose Péclet-Zahl Pe als Maß zur Bewertung des im Untergrund dominierenden Wärmetransportprozesses. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen advektivem und konduktivem Wärmetransport (Domenico und Schwartz, 1997; Huysmans und Dassargues, 2005; Gl. 3-16):

$$(Gl. 3-16) \quad P_e = \frac{C_w v L_c}{\lambda}$$

Wobei gilt: L_c ist die charakteristische Länge in m, die je nach Betrachtungsskala z. B. den Abstand zwischen Erdwärmesonden, den Bohrlochradius, die Länge des Erdwärmesondenfeldes oder auch die mittlere Korngröße des porösen Mediums repräsentiert (Chiasson et al., 2000; Diao et al., 2004). Nach Chiasson et al. (2000) dominiert bei Péclet-Zahlen größer eins, unter Annahme einer charakteristischen Länge von 4,5 m (als Maß für den Bohrlochabstand), die Advektion den Wärmetransport im Grundwasser.

3.2.2 Ungesättigter Untergrund

Ungesättigte Strömung

In der ungesättigten Zone ist die Beschreibung der Fließverhältnisse ungleich komplexer als im gesättigten Bereich, da sie zusätzlich zur Wasser- und Festphase auch von der Gasphase des mit Luft gefüllten Porenraumes abhängig ist. Die Porenwassersättigung, also die Bindung des Wassers im Boden, wird in der Pedologie anhand des Gravitations- und des Matrixpotentials beschrieben. Das Gravitationspotential ist abhängig von der Bezugshöhe, in der sich eine bestimmte Menge Wasser befindetet, z. B. dem Abstand zum Grundwasserspiegel. Das Matrixpotential wird in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden bestimmt, wobei eine indirekte Proportionalität zur Wassersättigung besteht (Scheffer et al., 2010). Zur Beschreibung der Strömung in der ungesättigten Zone wird die Darcy-Gleichung zur Darcy-Buckingham-Gleichung (1907) erweitert (zitiert in Hillel, 1980; Gl. 3-17):

$$(Gl. 3-17) \quad \dot{q}_v = -K(\psi) \nabla h$$

Wobei gilt: q_v ist die Strömungsrate in der ungesättigten Zone in ms^{-1} , $K(\psi)$ ist die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit in ms^{-1} in Abhängigkeit vom antreibenden Potential ψ in Pa, und ∇h ist der dimensionslose Gradient des Potentials.

Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung resultiert die Richards-Gleichung (1931), hier exemplarisch für den Fall der vertikalen Strömung in z-Richtung dargestellt (zitiert in Hillel, 1980; Gl. 3-18):

$$(Gl. 3-18) \quad \frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} = -\nabla (K(\psi) \nabla \psi) + \frac{\partial K(\psi)}{\partial z}$$

Wobei gilt: θ ist der Wassergehalt in Vol.-%. Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Bodens und dem Matrixpotential wird über Retentionskurven (auch Wasserspannungskurven) beschrieben. Einen Ansatz dazu definierte van Genuchten (1980) wie folgt (zitiert in Hartge und Horn, 1999; Gl. 3-19):

$$(Gl. 3-19) \quad \theta_\psi = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + |\alpha \psi_m|]^m}$$

Wobei gilt: θ_ψ ist der Wassergehalt in Vol.-% als Funktion des Matrixpotentials ψ_m in Pa, θ_r ist der Restwassergehalt, θ_s ist der Sättigungswassergehalt jeweils in Vol.-%, und α_v , n_v und m_v sind die sogenannten van Genuchten-Parameter, empirische Konstanten, die über die lineare Regression bestimmt werden können. Generell gilt $m_v = 1 - n_v^{-1}$ (Domenico und Schwartz, 1997). Letztere können beispielsweise durch die Anwendung des Computerprogrammes Rosetta für verschiedene Bodentypen abgeschätzt werden (Schaap et al., 2001).

Die Berechnung der Leitfähigkeitsfunktion $K(\psi)$ erfolgt in Abhängigkeit der van Genuchten-Parameter und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_f anhand des Mualem-van Genuchten-Modells (Mualem, 1976 und van Genuchten, 1980 zitiert in Bohne et al., 1993; Gl. 3-20):

$$(Gl. 3-20) \quad K(\psi) = k_f \frac{(1 - (\alpha / \psi)^{n_v})^{n_v} (1 + (\alpha / \psi)^{n_v})^{-m}}{(1 + (\alpha / \psi)^{n_v})^{m}}$$

Wobei l als Parameter mit geringem Einfluss auf die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit für die meisten Böden mit dem Wert 0,5 angesetzt werden kann.

Wärmetransport

Der Wärmetransport in der ungesättigten Zone setzt sich aus zwei Prozessen zusammen: Konduktion über die Festphase (Matrix des porösen Mediums) und die Konduktion über den Porenraum (in Abhängigkeit von der Porenwassersättigung) (Dong et al., 2015). Es wird angenommen, dass Advektion als Mechanismus des horizontalen Wärmetransportes mit dem strömenden Grundwasser nicht stattfindet. Jedoch kann Wärme je nach betrachtetem System auch durch die Infiltration von Regenwasser in die ungesättigte Zone eingebracht werden. Anders als im Zweiphasensystem des mit Grundwasser gesättigten Untergrundes sind die effektive Wärmekapazität und die effektive Wärmeleitfähigkeit in der Matrix der vadosen Zone Funktionen der Wassersättigung. Für die Betrachtung der Wärmekapazität gilt, die Gesamtkapazität ist gleich der Summe der entsprechend ihrer Volumenanteile gewichteten Wärmekapazitäten der einzelnen Phasen (Farouki, 1981; Hillel, 1980; Gl. 3-21):

$$(Gl. 3-21) \quad c = f_s c_s + f_a c_a + f_f c_f$$

Wobei gilt: c ist die gesamte Wärmekapazität in $Jm^{-3}K^{-1}$, und c_s , c_a und c_f sind jeweils die Wärmekapazitäten der Festphase (s), der Luft (a) und des Wassers (f), und f_s , f_a und f_f sind jeweils die Volumenanteile der einzelnen Phasen.

Die Wärmeleitfähigkeit ungesättigter Böden ist neben den Wärmeleitfähigkeiten der festen, flüssigen und gasförmigen Phasen auch wesentlich von der Struktur der Bodenmatrix und der Lagerungsdichte abhängig (Bertermann et al., 2015). Wie Dong et al. (2015) darstellen, gibt es verschiedene mathematische Ansätze zur Berechnung der ungesättigten Wärmeleitfähigkeit. Exemplarisch ist im Folgenden der Ansatz nach De Vries (1963) beschrieben (zitiert in Hillel, 1980; Gl. 3-22):

$$(Gl. 3-22) \quad \lambda_g = \frac{f_f \lambda_f + k_a f_a \lambda_a + k_s f_s \lambda_s}{f_f + k_a f_a + k_s f_s}$$

Wobei gilt: λ_g ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens in $Wm^{-1}K^{-1}$, λ_f , λ_a und λ_s sind die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Phasen, und k_a und k_s sind Faktoren, die die Geometrie der Bodenmatrix repräsentieren. Verglichen mit den Werten der mit Grundwasser gesättigten Bereiche sind die Wärmeleitfähigkeiten ungesättigter poröser Medien geringer (VDI 4640-1, 2010).

3.3 Strömung und Wärmetransport in Erdwärmesonden

Die Wärmetransportprozesse in Erdwärmesonden sind abhängig von den thermischen Wechselwirkungen, die zwischen den einzelnen Systemkomponenten wie dem Wärmeträgerfluid, dem Sondenrohr und dem Verfüllmaterial ablaufen. Zusammenfassend werden die Wärmetransportprozesse vom Erdwärmesondenfluid zum Bohrlochrand, genauer der Wärmetransport vom Wärmeträgerfluid zum Sondenrohr, der radialen Wärmeleitung im Sondenrohr selbst sowie im Verfüllmaterial anhand des effektiven Bohrlochwiderstandes R_b beschrieben. Er beeinflusst die in Abhängigkeit von einer definierten Temperaturdifferenz nutzbare thermische Entzugsleistung der Erdwärmesonden (Koenigsdorff, 2011; Lamarche et al., 2010; Stauffer et al., 2014; Gl. 3-23):

$$(Gl. 3-23) \quad P_{ext} = \frac{T_f - T_b}{R_b}$$

Wobei gilt: T_f ist die mittlere Fluidtemperatur in K, die gleich dem Mittelwert der Temperaturen des auf- und abströmenden Fluides ist, T_b ist die mittlere Temperatur an der Bohrlochaußenwand in K, und P_{ext} ist der Wärmestrom zur Erdwärmesonde in Wm^{-1} , R_b ist der thermische Bohrlochwiderstand in mKW^{-1} . In der Praxis erfolgt die Bestimmung des Bohrlochwiderstandes numerisch, analytisch oder experimentell unter Anwendung des Thermal Response Tests (Vergleich Kapitel 3.1.4). Eine ausführliche Methodenübersicht zur Bestimmung des Bohrlochwiderstandes ist in Lamarche et al. (2010) gegeben.

Der Wärmeübergangskoeffizient α_t in $Wm^{-2}K^{-1}$ beschreibt die Wärmeleistung zwischen Feststoff (Sondenrohr) und Fluid pro Quadratmeter bei einem Kelvin Temperaturdifferenz. Er wird wie folgt berechnet (Koenigsdorff, 2011; Gl. 3-24):

$$(Gl. 3-24) \quad \alpha_t = \frac{Nu \lambda_f}{d}$$

Wobei gilt: Nu ist die dimensionslose Nußelt-Zahl, und d ist der Innendurchmesser der Erdwärmesonde in m. Charakteristische Wärmeübergangskoeffizienten für Erdwärmesonden liegen in der Größenordnung von 1.000 bis 2.000 $Wm^{-2}K^{-1}$ (Koenigsdorff, 2011). Turbulente Strömungsverhältnisse werden angestrebt, um die dynamischen Querbewegungen der Teilchen für eine Verbesserung der Wärmeaustauschbedingungen zu nutzen. Für Reynoldszahlen Re größer als 2.320 werden turbulente Strömungsverhältnisse angenommen bzw. Reynoldszahlen größer als 2.300 und kleiner als 4.000 werden transiente und ab Reynoldszahlen größer als 4.000 turbulente Strömungsverhältnisse angenommen (Al-Khoury, 2012, Koenigsdorff, 2011).

Im Verfüllmaterial findet Wärmeaustausch sowohl zwischen dem Vor- und Rücklauf der Erdwärmesonde als auch zwischen dem Erdwärmesondenrohr und der Bohrlochwand statt. Je geringer die Strömungsgeschwindigkeit des Wärmeträgerfluides im Inneren der Erdwärmesonde ist, desto stärker ist der Effekt des thermischen Kurzschlusses zwischen auf- und abströmendem Fluid, da sich ihre Temperaturen in Folge des Wärmeaustausches zwischen beiden Medien angleichen. Um diesen unerwünschten Energieverlust (in der Heizphase) des Fluides, das aus dem Untergrund in Richtung Wärmepumpe strömt, zu minimieren, bedarf es einer optimierten Strömungsgeschwindigkeit (Bauer, 2011; Koenigsdorff, 2011).

3.3.1 Analytische Lösungsansätze

Die Betrachtung der Wärmeleitungsgleichung zur Abbildung von Wärmetransportprozessen im Untergrund ist eine Annäherung an die tatsächlich in der Natur ablaufenden komplexen Prozesse. Die Qualität und Belastbarkeit der Ergebnisse hängt sowohl bei analytischen als auch bei numerischen Ansätzen stark von der Qualität der zugrunde liegenden Eingabeparameter ab. Um die für thermische Untergrundnutzungen relevanten Strömungs- und Wärmetransportprozesse anhand analytischer Lösungen abzubilden, gelten folgende Vereinfachungen:

- Die Parameter zur Beschreibung der hydrodynamischen und thermophysikalischen Untergrundeigenschaften sowie die Anfangsbedingungen werden als konstant und homogen betrachtet.
- Das betrachtete Volumen ist infinit und radialsymmetrisch.
- Die zugrunde liegenden Randbedingungen wie die thermische Entzugsleistung und die Grundwasserströmungsbedingungen sind ebenfalls homogener Natur, zeitlich und räumlich konstant oder werden nicht berücksichtigt (Stauffer et al., 2014).

Verglichen mit den numerischen Ansätzen (Vergleich Kapitel 3.3.2) liegt der Vorteil der analytischen Ansätze in ihrer schnellen und kostengünstigen Anwendung. Sie benötigen kurze Rechenzeiten, da keine komplexen mehrdimensionalen Berechnungsgitter für die Sondenkonfigurationen genutzt werden. Auch Lizenzkosten, wie sie für die Nutzung kommerzieller numerischer Softwaretools anfallen, müssen für die Anwendung analytischer Lösungen nicht oder in geringerem Maße investiert werden (Li und Lai, 2015). Aus einer Vielzahl analytischer Lösungen zur oberflächennahen thermischen Untergrundnutzung (u. a. Hellström, 1991; Li und Lai, 2015; Stauffer et al., 2014) werden im Folgenden zwei Ansätze dargestellt, die Erdwärmesonden als Linienelemente mit infiniter vertikaler Ausdehnung approximieren.

Infinite Linienquelle

Unter Vernachlässigung der Grundwasserströmung wird zur Untersuchung der Temperaturveränderungen in gering durchlässigen Sedimenten (z. B. Ton oder Festgestein) sowie zur Bewertung von Thermal Response Tests der Ansatz der Infiniten Linienquelle angewendet. Dieser basiert auf der Grundlage des zweidimensionalen konduktiven Wärmetransportes (Stauffer et al., 2014; Gl. 3-25):

$$(Gl. 3-25) \quad T(x,y,t) = T_0 - \frac{P_{ext}}{4\pi\lambda_s} Ei\left(-\frac{r_s^2}{4D_t t}\right)$$

Wobei gilt: $T(x,y,t)$ ist die Temperatur am Punkt x, y zum Zeitpunkt t in K, T_0 ist die Anfangstemperatur in K, P_{ext} ist die thermische Entzugsleistung der Erdwärmesonden in Wm^{-1} , λ_s ist die Wärmeleitfähigkeit des Grundwasserleiters in $Wm^{-1}K^{-1}$, r_s ist die radiale Distanz zur Linienquelle bzw. zur Sonde in m, D_t ist der Tensor der thermischen Diffusion in m^2s^{-1} , t die Zeit in s, und Ei beschreibt die Integralexponentialfunktion.

Moving Infinite Line Source

Der analytische Ansatz der Moving Infinite Line Source beschreibt zusätzlich zum konduktiven auch den advektiven Wärmetransport und ist somit für die Analyse von Erdwärmesondennutzungen in Grundwasser durchströmten Sedimenten geeignet. Im Untergrund mit homogenen hydraulischen und thermischen Parametern gilt im Gleichgewichtszustand (Man et al., 2012; Stauffer et al., 2014; Gl. 3-26):

$$(Gl. 3-26) \quad T(x,y) = T_0 + \frac{q_{tb}}{2\pi\lambda_m} \exp\left(\frac{v_T x}{2D_t}\right) K_0\left(\frac{v_T \sqrt{x^2 + y^2}}{2D_t}\right)$$

Wobei gilt: $T(x,y)$ ist die Temperatur am Punkt mit den Koordinaten x und y in K, v_T ist die Geschwindigkeit der Temperaturlausbreitung in ms^{-1} , und K_0 ist die modifizierte Bessel-Funktion.

Earth Energy Designer

Die Earth Energy Designer Software (Buildingphysics, 2008) ist eines der am häufigsten angewendeten Planungstools zur Dimensionierung von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern. Basierend auf einem semi-analytischen Ansatz erweitert es die bisher betrachteten analytischen Lösungen. Die Dimensionierung von Erdwärmesonden erfolgt vereinfacht im homogenen, wassergesättigten Untergrund bei rein konduktivem Wärmetransport. Dabei können in Abhängigkeit von den Untergrundparametern, wie der mittleren Temperatur der Erdoberfläche, der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und dem geothermischen Wärmestrom, die mittlere Fluidtemperatur und die benötigte Bohrlochlänge berechnet werden (Buildingphysics, 2008). Auf Grundlage der von Eskilson (1987) und

Hellström (1991) aus numerischen Simulationen (Superposition Borehole Model) und Parameterstudien abgeleiteten sogenannten g-Funktionen können mit der Software verschiedene Sondenkonfigurationen dargestellt werden. g-Funktionen sind im Wesentlichen von dem Abstand der Erdwärmesonden und ihrer Länge abhängig und ermöglichen unter Berücksichtigung der Vollbenutzungsdauer und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Erdwärmesonde die Ableitung von Leistungsdiagrammen. Vorteil der Anwendung dieser g-Funktionen ist die Bereitstellung eines geeigneten Startwertes, um die Iterationsschritte bei der Optimierung des Sondendesigns zu minimieren (Buildingphysics, 2008; De Carli et al., 2014; Loose, 2007; Tholen und Walker-Hertkorn, 2008).

3.3.2 Numerische Lösungsansätze

Analytische Lösungen bilden die komplexen Prozesse thermischer Untergrundnutzungen nicht in jedem Fall hinreichend genau ab. Für die Untersuchung transienter, dreidimensionaler Strömungs- und Wärmetransportprozesse wurden umfangreichere numerische Lösungsansätze entwickelt. Drei wesentliche Anwendungsziele dieser numerischen Tools sind:

- 1) Optimierung des Systemdesigns, z. B. der benötigten Installationslängen der Erdwärmesonden,
- 2) Untersuchung thermischer in-situ Tests, wie dem Thermal Response Test und
- 3) Bewertung der Systemeffizienz und der potentiellen Umweltauswirkungen.

Insbesondere bei komplexeren Anwendungen wie Erdwärmesondenfeldern und Systemen zur saisonalen Wärmespeicherung bieten numerische Simulationen wichtige Planungsgrundlagen (Rees und He, 2013). Die Vielzahl der in der Praxis angewendeten Programme reicht von vergleichsweise einfachen Erdwärmesondentools bis hin zu komplexen dreidimensionalen Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellen. Beispielhaft zu nennen sind die Programme MT3DMS (Hecht-Méndez et al., 2010; Zheng und Wang, 1999), SHEMAT (Clauser, 2003), Feflow (DHI-WASY, 1979 - 2016; Diersch et al., 2011a, 2011b) und OpenGeoSys (Boockmeyer und Bauer, 2014; Kolditz et al., 2012; Shao et al., 2014). Grundsätzlich hängt die Wahl der geeigneten Software stark von der zu betrachtenden Untersuchungsskala ab. Die Untersuchung von Prozessen im Sondeninneren bzw. im Nahbereich der Sonde erfordert eine andere Diskretisierung als großskalige Analysen langzeitlicher Veränderung der Untergrundtemperatur im weiteren Umfeld der von Erdwärmesonden.

Hochaufgelöste Gittergeometrien zur Modellierung von Erdwärmesonden

Zur Untersuchung der verschiedenen Verfüllmaterialien, Fluidströmungen im Rohrrinneren oder auch thermischen Wechselwirkungen zwischen zu- und abströmenden Sondenfluid existieren hochaufgelöste Modelle. Sie bilden die gesamte Geometrie der Erdwärmesonde inklusive des Sondenrohres, Verfüllmaterials und der Bohrlochwand ab. Darstellungen von Querschnitten durch Erdwärmesonden mit hochaufgelösten Gittern zeigen beispielsweise Bauer (2011) oder Boockmeyer und Bauer (2014). Ein Nachteil dieser realitätsnahen, hoch diskretisierten Abbildung der Systemkomponenten ist die große Anzahl an Gitterelementen. Eine hohe Zahl an Gitterelementen führt gerade bei kurzzeitig schwankenden Randbedingungen zu vergleichsweise langen Rechenzeiten (Boockmeyer und Bauer, 2014; Diersch et al., 2011a; Rees und He, 2013).

Vereinfachte Gittergeometrien zur Modellierung von Erdwärmesonden

Das Ziel der Entwicklung vereinfachter Gittergeometrien zur Modellierung von Erdwärmesonden ist die Reduzierung der Rechenzeiten auf ein in der Praxis akzeptables Maß. Somit ist auch die Untersuchung großskaliger Temperaturänderungen und komplexer Erdwärmesondenfelder modelltechnisch umsetzbar. Die Grundlage ist die Betrachtung der Erdwärmesonde als eindimensionales Linienelement, das mit den Strömungs- und Wärmetransportprozessen im Untergrund verknüpft ist.

Für die Abbildung dieses Linienelementes existieren zwei verschiedene Ansätze, die sich in der Betrachtung des Wärmetransportes in der Sonde unterscheiden. Der numerische Ansatz von Al-Khoury et al. (2005 und 2006) ist für die Analyse kurzzeitiger Prozesse wie der Auswertung von Thermal Response Test anwendbar. Der Ansatz von Eskilson und Claesson (1988) gilt für die Betrachtung langzeitlicher Wärmetransportprozesse. Beide Ansätze betrachten die Erdwärmesonde als eindimensionales Linienelement. Die lokalen Wärmetransportprozesse in der Erdwärmesonde werden für dieses Linienelement zusammengefasst und mit den globalen Wärmetransportprozessen des Untergrundes verknüpft. Dabei wird beispielsweise die Einfach-U-Erdwärmesonde als System aus vier Komponenten betrachtet: die zu- und abströmenden Fluide sowie die Verfüllmaterialien, die die Sondenrohre umgeben (T_1 und T_2 sowie T_{g1} und T_{g2} in Abbildung 3-3).

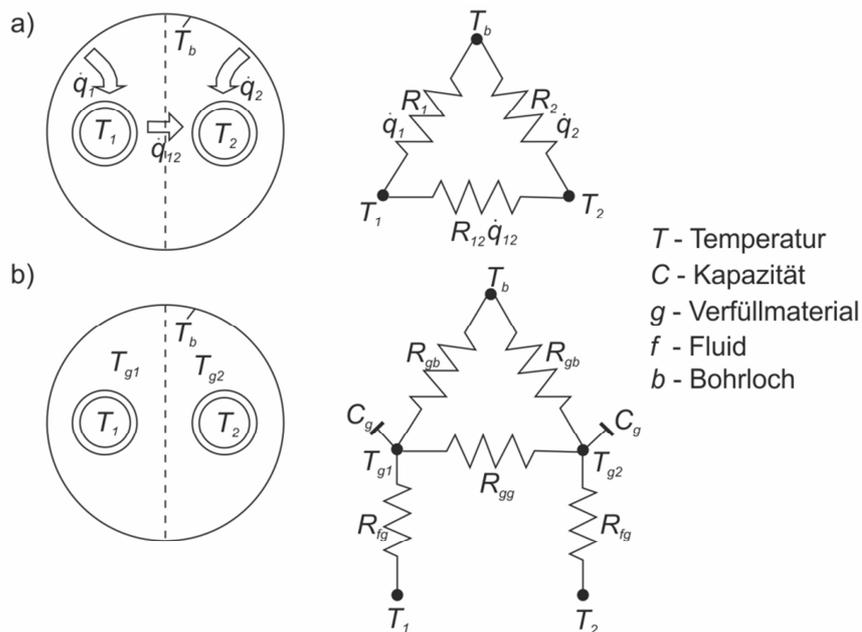


Abbildung 3-3: Horizontaler Querschnitt durch eine Einfach-U-Erdwärmesonde: a) Darstellung der thermischen Widerstände zwischen den Komponenten einer Erdwärmesonde und b) Erweiterung des Widerstandsmodells zum Widerstandskapazitätsmodell (verändert nach Bauer, 2011).

Bei der Beschreibung der Wärmetransportprozesse in der Erdwärmesonde in Form einer Dreieckschaltung der thermischen Widerstände wird die Analogie zwischen dem Ohm'schen Gesetz und dem Fourier Gesetz genutzt (DHI-WASY, 2010). Demnach entspricht der Strom in einem elektrischen Leiter dem Quotienten aus Potentialdifferenz und elektrischem Widerstand so, wie die Wärmeflussrate dem Verhältnis von Temperaturänderung zum thermischen Widerstand entspricht (Al-Khoury, 2012; Eskilson und Claesson, 1988). Unter Anwendung dieser Widerstandsmodelle werden verschiedene, in Reihe oder parallel geschaltete Wärmetransportprozesse zwischen den einzelnen Komponenten einer Erdwärmesonde abgebildet (Bauer, 2011; Diersch et al., 2011a; Eskilson und Claesson, 1988).

Das auf- und abwärts strömende Fluid ist über je einen thermischen Widerstand R_1 und R_2 mit der Bohrlochwand und mit sich selbst über den Widerstand R_{12} verknüpft. Die Widerstände in KmW^{-1} zwischen dem Fluid und der Bohrlochwand und zwischen dem auf- und abströmenden Fluid werden zum Bohrlochwiderstand R_a und zum Widerstand R_b zusammengefasst (Hellström 1991 zitiert von Al-Khoury, 2012; Bauer, 2011; Gl. 3-27 bis Gl. 3-28):

$$(Gl. 3-27) \quad R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$(Gl. 3-28) \quad R_a = \frac{R_{12} (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Da der stationäre Ansatz der Widerstandsmodelle nicht für sehr kurze Zeitschritte gilt, wird der bestehende Ansatz durch thermische Kapazitäten der Bohrlochkomponenten zu Widerstandskapazitätsmodellen erweitert. Durch eine Y-Schaltung können mehrere Widerstandskapazitätsmodelle einen Knotenpunkt repräsentieren, sodass eine eindimensionale Darstellung der Erdwärmesonde als Linienelement möglich ist (Bauer, 2011). Abbildung 3-3: b zeigt diese Y-Schaltung exemplarisch für eine Einfach-U-Sonde. Die Verknüpfung dieser thermischen Widerstände ist auf Grund ihrer Abhängigkeit von der Geometrie und den Materialien in der Erdwärmesonde immer ein systemspezifisches Problem. Die mathematischen Ansätze zur Betrachtung der advektiven Strömung im Sondeninneren, des Wärmeüberganges zwischen Sondenwand und Verfüllung, zwischen den differenzierten Verfüllmaterialien sowie zwischen Erdwärmesonde und Boden beschreiben Bauer (2011) und DHI-WASY (2010) detailliert für alle drei Erdwärmesondentypen.

4 Einfluss der Advektion auf die thermischen Entzugsleistungen für einen nachhaltigen Erdwärmesonden-Betrieb

4.1 Einleitung

In den vergangenen Jahren zeigte sich ein anhaltender Fortschritt in der technologischen Entwicklung von geothermischen Systemen. Beispielsweise wurden die Wärmepumpeneffizienz und das Verfüllmaterial optimiert, sodass sich die Nutzung oberflächennaher Geothermie als erneuerbare Technologie zur Wärme- und Kälteversorgung am Markt etablierte (z. B. in Erol und François, 2014; Indacochea-Vega et al., 2015 und Staffell et al., 2012). Während sich die Weiterentwicklung der Technologie auf systemspezifische Parameter konzentriert, wird der Einfluss lokaler Untergrundbedingungen auf das Design und den Betrieb der Systeme bisher unzureichend betrachtet. Zum einen sind die zur Modellparametrisierung angewendeten Werte oftmals Literaturangaben, die erheblichen Unsicherheiten unterliegen (Vergleich Kapitel 6). Zum anderen ist der Aufbau der Untergrundmatrix zumeist ein komplexes System, das von den in der Praxis üblichen Planungs- und Dimensionierungstools stark vereinfacht abgebildet wird. Letzteres geht auch aus der Diskussion von Dehkordi und Schincariol (2012) über die Designsoftware als „Black Box“ hervor. Die vielfach angewendete Software Earth Energy Designer beispielsweise stellt den Untergrund als vollständig gesättigtes, homogenes Medium dar, in dessen Matrix kein Grundwasser strömt. Der dabei simulierte Wärmetransport basiert ausschließlich auf Konduktion. Die Advektion als Wärmetransportprozess mit dem strömenden Grundwasser wird vernachlässigt (Buildingphysics, 2008).

Diese vereinfachte Betrachtung der Untergrundbedingungen, insbesondere der Grundwasserverhältnisse, steht im Widerspruch zu wissenschaftlichen Untersuchungen über den Einfluss der Advektion auf unterirdische Wärmetransportprozesse. Liebel (2012) analysiert den Einfluss der Grundwasserströmung auf Wärmetransportparameter wie die effektive Wärmeleitfähigkeit und den Bohrlochwiderstand in geklüftetem Festgestein. Dabei übersteigen die in-situ gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes die im Labor für verschiedene Gesteine bestimmten Werte deutlich. Im Fazit zeigen sie, dass nicht zuletzt durch den lokalen Einfluss der Grundwasser durchströmten Klüfte die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes immer mit Unsicherheiten behaftet ist. Den direkten Einfluss des advektiven Wärmetransportes auf die Daten des Thermal Response Tests analysierten unter anderem Chiasson et al. (2000). Ihre Ergebnisse belegen die Erhöhung der gemessenen Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bei

zunehmendem Einfluss der Grundwasserströmung gegenüber den Werten, die ohne Grundwassereinfluss bestimmt wurden. Ihren Studien nach resultiert die ungenaue Bewertung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes in einer Unsicherheit in der Dimensionierung geothermischer Systeme. Die benötigte Bohrtiefe kann infolgedessen über- oder unterschätzt werden. Wie Chiasson et al. (2000), verweisen auch Huber et al. (2014) auf die Nutzung effektiver Wärmeleitfähigkeiten zur Charakterisierung Grundwasser durchströmter Schichten als Grundlage für die Dimensionierung geothermischer Systeme. Zur Ableitung sedimentspezifischer effektiver Wärmeleitfähigkeiten führten sie Labor- und Feldversuche bei variierender Grundwasserhydraulik durch. Auch Pannike et al. (2006) identifizieren die hydraulische Leitfähigkeit als sensitiven Wärmetransportparameter. Sie leiteten einen vereinfachten Ansatz zur Bestimmung der Installationslänge der Erdwärmesonden ab. Dafür berechneten sie unter Anwendung der Planungssoftware Earth Energy Designer die thermischen Entzugsleistungen des Untergrundes bei variierender Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserfließgeschwindigkeiten.

Den unmittelbaren Einfluss der Advektion auf die Leistung der geothermischen Systeme zeigen beispielsweise Wang et al. (2009) an einer Fallstudie. Aus weiteren Studien geht ein positiver Einfluss der Grundwasserströmung auf die thermischen Entzugsleistungen des untersuchten Standortes hervor, der zudem mit einer langfristigen Verbesserung des thermischen Regenerationspotentials einhergeht.

Ergänzend zu den Untersuchungen des Einflusses der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf das Design und den Betrieb einzelner Erdwärmesonden betrachten Lee und Lam (2007) ein Erdwärmesondenfeld unter dem Einfluss verschiedener Strömungsrichtungen. Ihre numerischen Studien belegen den Einfluss der Grundwasserfließrichtung auf die optimale Anordnung eines Erdwärmesondenfeldes. Je unsicherer die Grundwasserfließrichtung ist, desto größer ist der prozentuale Fehler in der Berechnung der Fluidtemperatur der Erdwärmesonde. Ihre Ergebnisse belegen, dass eine Berücksichtigung der Grundwasserströmung zur Bewertung des geothermischen Potentials zu einer Optimierung des Systemdesigns und damit einhergehend auch zu einer Anpassung der Bohrkosten führen kann.

Neben der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes und der Dimensionierung geothermischer Systeme bestimmt die Grundwasserströmung auch die Ausbreitung der induzierten Temperaturänderungen. Hähnlein et al. (2010) entwickelten analytische Lösungen zur Abbildung und Vorhersage der Ausbreitung dieser Temperaturfahnen. Mit ihren Untersuchungen zeigen sie unter anderem, dass die Einhaltung genehmigungsrechtlicher Vorgaben kritisch zu hinterfragen ist. Exemplarisch zu nennen ist die Vorgabe, die Untergrund-

temperatur in einem Radius größer 10 m um eine Erdwärmesonde nicht zu verändern. Das gilt vor allem für die Ausbreitung der Temperaturfahnen in Grundwasserfließrichtung. Auch Dehkordi und Schincariol (2012) untersuchten den thermischen Einfluss hydrogeologischer Untergrundparameter auf die geothermische Nutzung. Dabei zeigen sie unter anderem, dass die Advektion der treibende Prozess zur Regeneration der Temperaturänderungen ist. In ihren Szenarien führt die Erhöhung der Grundwasserströmung von $1\text{E-}13$ auf $1\text{E-}6 \text{ ms}^{-1}$ zu einer Beschleunigung des Wiederanstiegs der Untergrundtemperaturen auf das Ausgangsniveau während der Heizpausen.

Insgesamt zeigen aktuelle Untersuchungen, dass die Advektion die geothermische Nutzung des Untergrundes in folgenden drei Kernpunkten beeinflusst:

- Optimierung des Systemdesigns in Bezug auf die Festlegung der Bohrtiefe und Anordnung der Erdwärmesonden,
- Vorhersage der räumlichen Ausbreitung und Intensität der induzierten Temperaturanomalien zur Minimierung des Risikos für thermische Interaktionen zwischen benachbarten Systemen sowie
- Bewertung des thermischen Regenerationspotentials als Grundlage für die Gewährleistung der Nachhaltigkeit der geothermischen Untergrundbewirtschaftung.

Obwohl der Einfluss der Grundwasserhydraulik auf diese Kernpunkte bereits untersucht wurde, fehlt die Berücksichtigung dieser Untersuchungsergebnisse in der Planung und Installation von geothermischen Systemen. Um den Wissenstransfer in die Praxis zu verbessern, wird in der hier vorgestellten Studie eine Bewertungsmethode zur Quantifizierung des Einflusses der Advektion auf die thermische Untergrundnutzung entwickelt. Diese Methode dient als Entscheidungshilfe zur Ableitung benötigter Untergrunderkundungen und geeigneter Tools zur Dimensionierung des Systems. Aufbauend auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Bedeutung der Advektion für die thermische Nutzung des Untergrundes, wurden verschiedene Szenariensimulationen durchgeführt. Diese stellen den Einfluss der Strömung auf die räumliche Ausbreitung der Temperaturanomalien dar und quantifizieren die Steigerung der thermischen Entzugsleistungen des Untergrundes mit zunehmender Grundwasserfließgeschwindigkeit. Durch die Betrachtung verschiedener Sedimente und Mächtigkeiten des Grundwasserleiters wird dabei auch der Schichtung des Untergrundes in Form eines Zwei-Schicht-Szenarios Rechnung getragen. Um die Wirtschaftlichkeit der entsprechenden Szenarien zu betrachten, werden Installationslängen und Bohrkosten gegenübergestellt. Die Erkenntnisse aus den Szenarienanalysen fließen unmittelbar in den Ansatz zur Kategorisierung des Einflusses der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die thermische Entzugsleistung ein. Durch die Anwendung dieses Ansatzes kann die Relevanz der Advektion für eine nachhaltige und effektive thermische

Untergrundnutzung in der Praxis berücksichtigt werden. Die Dimensionierung der Systeme wird optimiert und die Bewertung des Risikos für thermische Interaktionen zwischen benachbarten Systemen vereinfacht.

4.2 Durchführung

Um den Einfluss der Grundwasserdynamik auf das Temperaturregime und den Energiehaushalt im Untergrund zu untersuchen, wurden modellbasierte Szenarienanalysen mit variierenden Grundwasserfließgeschwindigkeiten durchgeführt. Das konzeptionelle Modell umfasst eine Fläche von 11,2 ha (140 m x 800 m) und reicht in eine Tiefe von 100 m (Anhang, Abbildung A-1). Die Parametrisierung des Modells erfolgt je nach betrachtetem Szenario für den gesamten Grundwasserleiter bzw. -stauer gemäß den Angaben in Tabelle 4-1. Die Definition der Werte für Mittelsand erfolgt in Anlehnung an die Ergebnisse der Untersuchungen in Taucha (Vergleich Kapitel 6)

Tabelle 4-1: Parametrisierung der drei untersuchten Sedimente des Grundwasserleiters und des Grundwasserstauers.

	Schluffiger Sand	Mittelsand	Kiesiger Sand	Grundwasserstauer
Wärmeleitfähigkeit [Wm⁻¹K⁻¹]	3,0 ¹⁾	2,4 ³⁾	2,0 ¹⁾	1,8 ¹⁾
Spezifische Wärmekapazität [MJm⁻³K⁻¹]	2,8 ¹⁾	2,5 ³⁾	2,2 ¹⁾	2,1 ¹⁾
Hydraulische Leitfähigkeit [ms⁻¹]	1,0E-5 ²⁾	7,2E-4	1,0E-3 ²⁾	1,0E-10 ²⁾
Porosität [-] ²⁾	0,35	0,30	0,35	0,5

1) VDI 4640-2 (2001); 2) Hölting und Coldewey (2013); 3) Messwerte des Untersuchungsgebietes in Taucha (Vergleich Kapitel 6)

Die Randbedingung der Grundwasserströmung im vollständig gesättigten Modell wurde über ein konstantes hydraulisches Potential (Dirichlet-Randbedingung) definiert. Die unterschiedlichen hydraulischen Durchlässigkeiten resultieren bei konstantem Gradienten des hydraulischen Potentials in abweichenden Fließgeschwindigkeiten für schluffigen Sand, Mittelsand und kiesigen Sand. Somit wird eine natürliche Bandbreite der hydraulischen Leitfähigkeit verschiedener Sedimente des Grundwasserleiters abgebildet (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Übersicht der untersuchten Szenarien mit konstantem hydraulischen Gradienten. Auf Grund der unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten der Sedimente des Grundwasserleiters ergeben sich abweichende Grundwasserfließgeschwindigkeiten für jedes Sediment.

Hydraulischer Gradient [-]	Szenarien mit variierender Grundwasserfließgeschwindigkeit [m d^{-1}]					
	Mittelsand		Kiesiger Sand		Schluffiger Sand	
2,10E-6	SM1	1,00E-4	SG1	1,82E-4	SU1	1,82E-6
2,10E-5	SM2	1,00E-3	SG2	1,82E-3	SU2	1,82E-5
2,10E-4	SM3	1,00E-2	SG3	1,82E-2	SU3	1,82E-4
6,84E-4	SM3-1*	3,25E-2	-	-	-	-
1,16E-3	SM3-2*	5,50E-2	-	-	-	-
1,63E-3	SM3-3*	7,75E-2	-	-	-	-
2,10E-3	SM4	1,00E-1	SG4	1,82E-1	SU4	1,82E-3
6,84E-3	SM4-1*	3,25E-1	-	-	-	-
1,16E-2	SM4-2*	5,50E-1	-	-	-	-
1,63E-2	SM4-3*	7,75E-1	-	-	-	-
2,10E-2	SM5	1,00E+0	SG5	1,82E+0	SU5	1,82E-2

* Da die Untersuchungen für Mittelsand die größten Auswirkungen der Advektion auf das Temperaturregime zeigten, wurden für dieses Sediment zusätzlich sechs weitere Grundwasserfließgeschwindigkeiten (SM3-1 bis SM3-3 sowie SM4-1 bis SM4-3) betrachtet.

Die Randbedingung des oberflächennahen geothermischen Systems besteht aus einer Doppel-U-Erdwärmesonde mit einer Länge von 100 m. In der siebenmonatigen Heizperiode strömt das Wärmeträgermedium mit einer Fließrate von $54 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ durch das Sondenrohr. Die Heizpause in den Sommermonaten von Mai bis September charakterisiert eine Fließrate von $0 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Weitere systemspezifische Parameter zeigt Tabelle A-1 im Anhang. Die Definition der Randbedingung für den Wärmeentzug der Erdwärmesonde weicht von der in der Praxis üblichen Definition ab. Statt vorgegebener monatlicher Entzugsleistungen wird die Sonde anhand zeitabhängiger Vorlauftemperaturen des Wärmeträgermediums in der Erdwärmesonde von null Grad beschrieben. Diese Abweichung von dem in der Praxis geläufigem Vorgehen ist notwendig, da explizit die verfügbaren thermischen Entzugsleistungen bestimmt werden sollen. So werden die Randbedingungen für einen nachhaltigen und frostfreien Betrieb angesetzt. Es wird ermittelt, welche Energie dem Untergrund maximal entzogen werden kann, ohne dass die Temperatur des Sondenfluid unter null Grad fällt. Die ungestörte Untergrundtemperatur und die Temperatur der Erdoberfläche (Dirichlet-Randbedingung) betragen bei allen untersuchten Szenarien $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Simulationszeit von zehn Jahren ist ausreichend, um quasi-stationäre Verhältnisse zu untersuchen. Alle Analysen wurden mit der Finiten Elemente Software Feflow unter Anwendung des implementierten Erdwärmesonden-Tools durchgeführt (DHI-WASY, 2013; DHI-WASY, 1979 - 2016; Diersch et al., 2011a, 2011b).

Basierend auf den modellierten Vor- und Rücklauftemperaturen der Erdwärmesonde wurden die thermischen Entzugsleistungen wie folgt berechnet (DHI-WASY, 2010; Gl. 4-1):

$$(Gl. 4-1) \quad Q = C_v q_f (T_i - T_o)$$

Wobei gilt: Q ist die thermische Entzugsleistung der Erdwärmesonde in MJd^{-1} , C_v ist die volumetrische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums in der Erdwärmesonde in $\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, q_f ist die Fließrate des Wärmeträgermediums in m^3d^{-1} , und T_i und T_o sind die Vor- und Rücklauftemperaturen der Erdwärmesonde in K.

Die Sensitivität der thermischen Entzugsleistungen wurde exemplarisch für die Szenarien des Mittelsandes bei Fließgeschwindigkeiten von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ untersucht, wobei folgende standort- bzw. systemspezifische Randbedingungen variiert wurden:

- 1) die initialen Untergrundtemperaturen (6, 8, 10, 14 und 16 °C),
- 2) die Fließraten des Wärmeträgermediums (20, 30, 40 und $54 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$) sowie
- 3) die Dauer der Heizperiode (3, 5 und 7 Monate).

4.3 Ergebnisse und Diskussion

4.3.1 Temperaturänderungen im Untergrund

Die analysierten Temperaturänderungen bekräftigen die Ergebnisse von Chiasson et al. (2000), indem sie den verbesserten Wärmetransport aus dem Untergrund zur Erdwärmesonde mit zunehmender Fließgeschwindigkeit des Grundwassers verdeutlichen. Je höher die Fließgeschwindigkeiten sind, desto geringer sind die induzierten Temperaturänderungen in 1,5 m Entfernung von der Erdwärmesonde (Abbildung 4-1). Für Mittelsand variieren die mittleren Temperaturänderungen nach einem zehnjährigen Systembetrieb zwischen 3,2 K (Fließgeschwindigkeit des Grundwassers von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$) und 0,2 K (Fließgeschwindigkeit des Grundwassers von 1 md^{-1}). Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit verbessert sich das thermische Regenerationspotential des oberflächennahen Untergrundes, sodass sich die an der Erdwärmesonde induzierten Temperaturänderungen ab einer Fließgeschwindigkeit von $0,03 \text{ md}^{-1}$ während der Heizpause im Sommer nahezu vollständig zurückbilden.

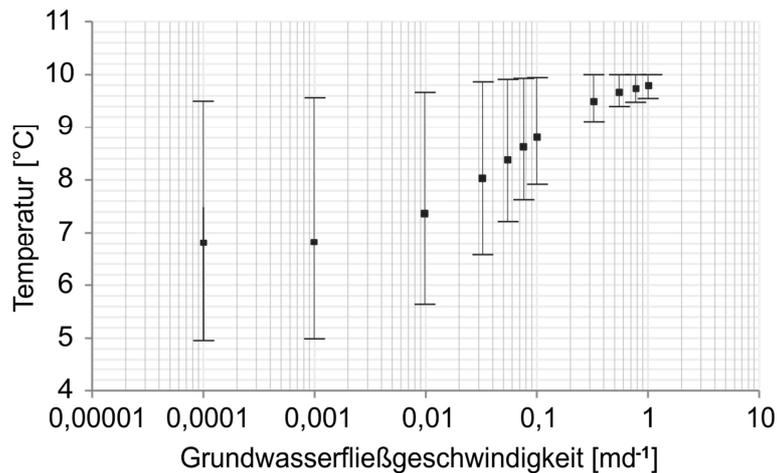


Abbildung 4-1: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die minimalen, maximalen und mittleren jährlichen Untergrundtemperaturen nach zehn Jahren saisonalem Wärmeentzug im Mittelsand im Grundwasserabstrom im Abstand von 1,5 m zur Erdwärmesonde.

4.3.2 Wirkungsradius der thermischen Anomalien

Zusätzlich zu der Intensität der Temperaturänderungen beeinflusst die Grundwasserströmung auch die Form der Temperaturfahnen. Die Bewertung der Ausdehnung der Temperaturänderungen ist vor allem bei der Bewertung möglicher thermischer Wechselwirkungen benachbarter Systeme unter intensiver geothermischer Untergrundnutzung wichtig. Daher werden im Folgenden die Temperaturänderungen im Untergrund in den von der VDI 4640-2 (2001) vorgegebenen Mindestabständen zwischen:

- 1) zwei Erdwärmesonden eines geothermischen Systems sowie
- 2) zwischen den Erdwärmesonden benachbarter Systeme mit einem Abstand von 5 bzw. 10 m

betrachtet.

Je höher die Grundwasserfließgeschwindigkeit ist, desto geringer sind die Temperaturänderungen in 5 bzw. 10 m Entfernung von der Erdwärmesonde. Allerdings drängt die Grundwasserbewegung die Ausdehnung der Fahne in Grundwasserfließrichtung, sodass potentielle Wechselwirkungen mit benachbarten, stromabwärts gelegenen Systemen in der Regel begünstigt werden. Wie die untersuchten Szenarien des Mittelsandes (Szenarios SM1 bis SM5) zeigen, sind die Temperaturänderungen bei einer Fließgeschwindigkeit von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM1) am stärksten und nahezu unabhängig von der Fließrichtung ausgeprägt. Es bilden sich annähernd radialsymmetrische Temperaturfahnen im Umfeld der Erdwärmesonde, die durch konduktiven Wärmetransport dominiert werden (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Folglich sind benachbarte Erdwärmesonden am stärksten von Änderungen der Untergrundtemperatur im Bereich von 0,85 bis 1,03 K in 10 m Abstand

bzw. 1,64 bis 1,71 K in 5 m Abstand beeinflusst (Szenario SM1). Da die Grundwasserdynamik die Temperaturanomalie stromabwärts verlagert, sind die Temperaturänderungen in Fließrichtung weitreichender als senkrecht zu ihr (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Entlang der Grundwasserfließrichtung formen sich ovale Temperaturfahnen, die deutlich vom advektiven Wärmetransport beeinflusst werden. Szenario SM3 zeigt in Fließrichtung eine Temperaturänderung des Untergrundes von 0,92 K in 10 m Entfernung bzw. 1,64 K in 5 m Entfernung. Dagegen betragen die Änderungen senkrecht zu der Fließrichtung 0,28 K in 10 m Abstand bzw. 0,92 K in 5 m Abstand. Obwohl eine erhöhte Fließgeschwindigkeit des Grundwassers zu einer größeren Ausdehnung der Temperaturfahnen stromabwärts führt, injizieren hohe Fließgeschwindigkeiten nicht zwangsläufig ein erhöhtes Risiko für thermische Interaktionen. Vielmehr sind in den untersuchten Szenarien mit vergleichsweise starker Grundwasserströmung die Temperaturänderungen auf Grund der stetigen Nachlieferung der Energie so gering, dass sich das Risiko für thermische Wechselwirkungen minimiert. Bei einer Grundwasserfließgeschwindigkeit von 1 md^{-1} zeigen die Untersuchungen eine geringfügige Variation der Temperatur von bis zu 0,17 K (Szenario SM5).

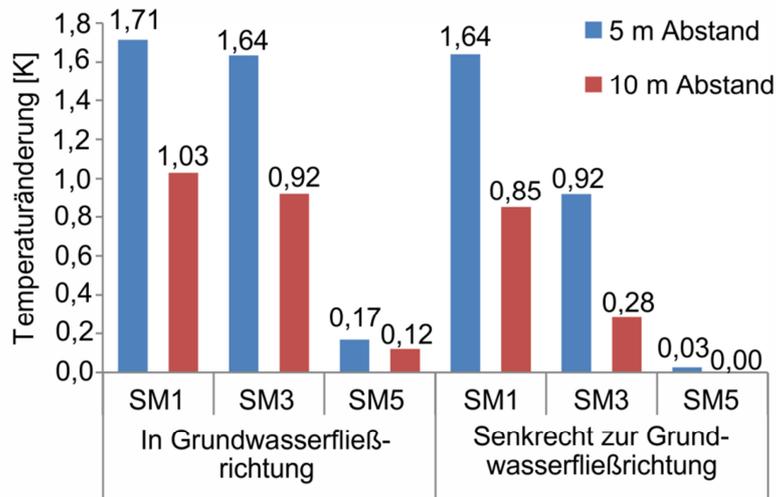


Abbildung 4-2: Vergleich der induzierten Temperaturänderungen im Mittelsand in 5 und 10 m Entfernung im Abstrom der Erdwärmesonde bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM1), $1\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM3) und 1 md^{-1} (Szenario SM5).

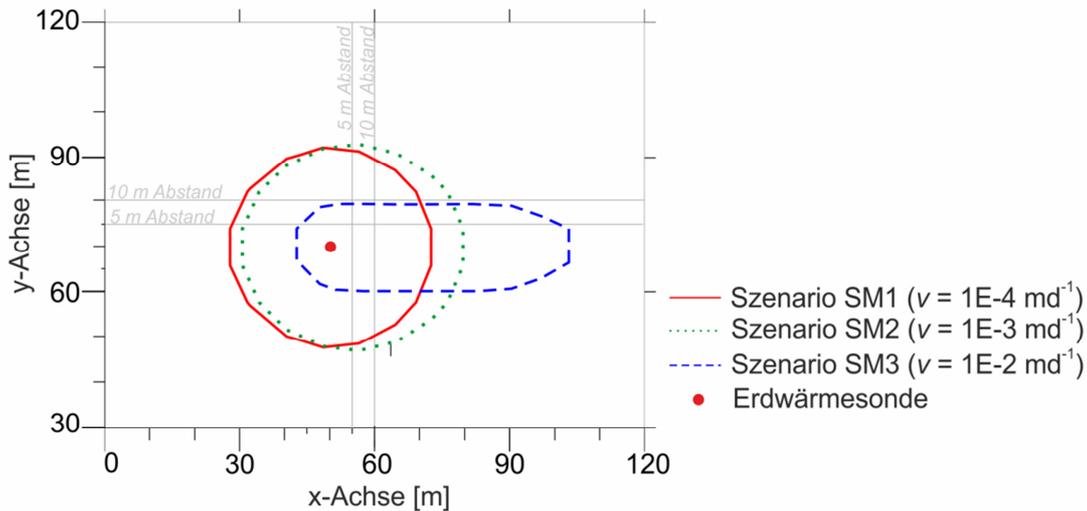


Abbildung 4-3: Vergleich der Temperaturisolinie bei einer Temperaturänderung von 0,5 K für Fließgeschwindigkeiten von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM1), $1\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM2) und $1\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ (Szenario SM3) nach zehn Jahren der saisonalen Heizzyklen. Für Szenario SM4 und SM5 (Fließgeschwindigkeiten $\geq 0,1 \text{ md}^{-1}$) sind keine Temperaturisolinien abgebildet, da die Änderungen der Temperatur geringer als 0,5 K sind.

4.3.3 Vergleich verschiedener Sedimente

Zur Untersuchung der Sensitivität der Temperaturänderungen gegenüber der Zusammensetzung der lokalen Sedimente des Grundwasserleiters werden im Folgenden die Temperaturänderungen in schluffigem Sand, Mittelsand und kiesigem Sand verglichen. Dabei werden minimale und maximale hydraulische Gradienten gegenübergestellt, um für jedes Sediment typische Grundwasserfließgeschwindigkeiten abzubilden. Wie die saisonalen Temperaturverläufe an den Beobachtungspunkten in 1,5 m Entfernung zur Erdwärmesonde und die Vertikalprofile der Temperatur des Wärmeträgerfluides im Inneren der Sonde zeigen, weichen die Temperaturänderungen zwischen den untersuchten Sedimenten bei minimaler Fließgeschwindigkeit geringfügig voneinander ab (Abbildung 4-4: 1-a und 2-a). Mit zunehmendem hydraulischem Gradienten bilden sich die Fließgeschwindigkeiten in den Sedimenten und damit auch die Temperaturanomalien unterschiedlich stark aus. Die Szenarien mit minimalem hydraulischen Gradienten (Abbildung 4-4: 1-a) zeigen bei allen drei untersuchten Sedimenten eine vergleichbare Variation der Grundtemperatur über die Zeit. Dagegen sind bei den Szenarien mit dem maximalen hydraulischen Gradienten im schluffigen Sand die stärksten Temperaturschwankungen zu erkennen (Abbildung 4-4: 1-b). Durch die geringe hydraulische Leitfähigkeit des Schluffes ($1\text{E-}5 \text{ ms}^{-1}$) dominiert der konduktive Wärmetransport. Im Vergleich dazu schwächt der advective Wärmetransport die Temperaturänderungen im Jahreszyklus im Mittelsand sowie im kiesigen Sand ab (Abbildung 4-4: 1-b).

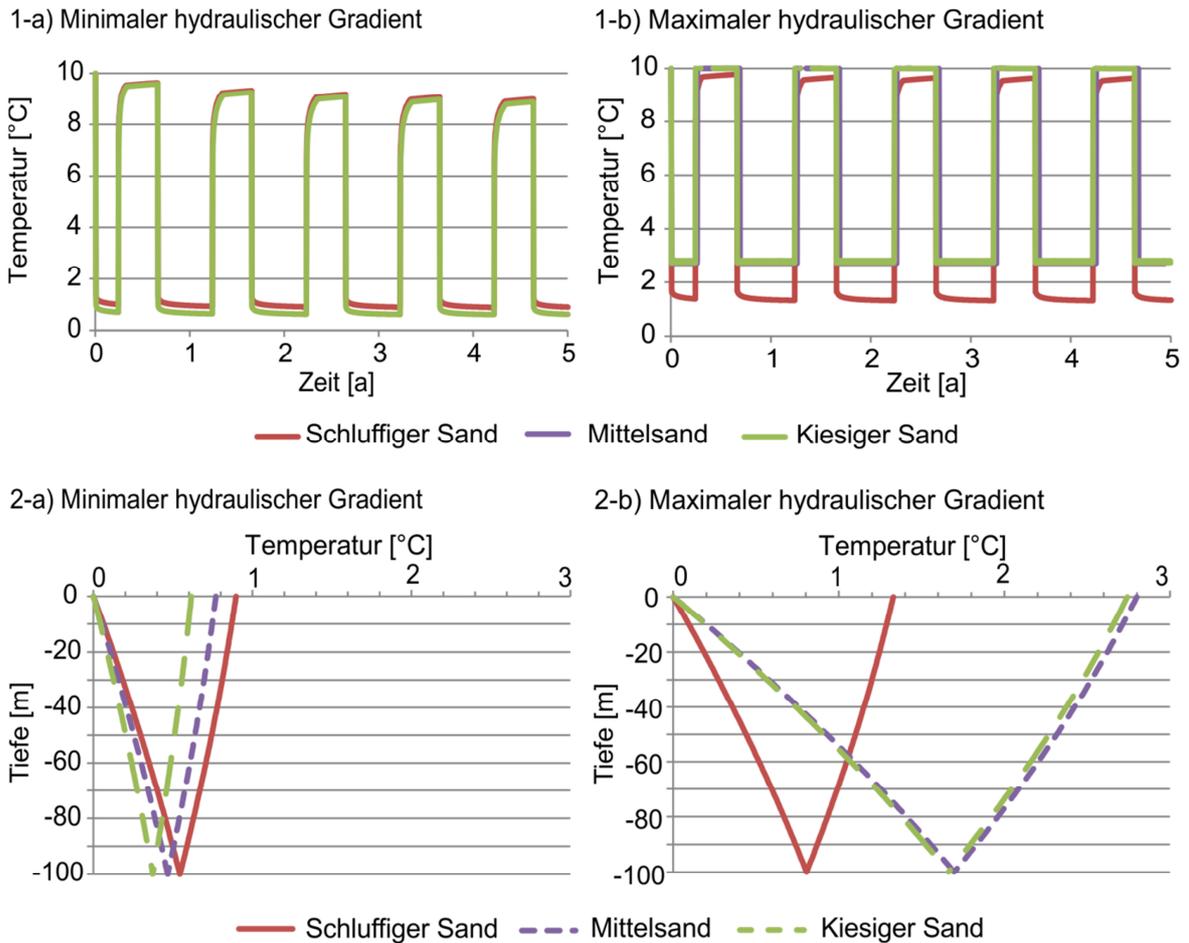


Abbildung 4-4: Vergleich der drei untersuchten Sedimente in Bezug auf 1) die saisonalen Temperaturänderungen im Untergrund im Nahbereich der Erdwärmesonde bei a) maximalem und b) minimalem hydraulischen Gradienten sowie 2) die vertikalen Temperaturprofile im Inneren der Erdwärmesonde bei a) maximalem und b) minimalem hydraulischen Gradienten nach zehn Jahren saisonalem Heizen (In Abbildung 4-4: 1 überdeckt der Graph des kiesigen Sandes den Graph des Mittelsandes).

Neben der absoluten Temperaturänderung beeinflusst die Grundwasserströmung auch die Zeit, die zum Erreichen quasi-stationärer Untergrundtemperaturen nötig ist. Diese quasi-stationären Bedingungen wiederum sind ausschlaggebend für die Bewertung der Langzeiteffizienz und der Umweltauswirkungen eines geothermischen Systems. Bei minimalem hydraulischen Gradienten stellen sich erst nach etwa fünf Jahren konstante mittlere Untergrundtemperaturen ein (Abbildung 4-4: 1-a). Dagegen werden bei maximaler Fließgeschwindigkeit im Mittelsand und im kiesigen Sand schon nach der ersten Heizperiode quasi stationäre Bedingungen erreicht (Abbildung 4-4: 1-b). Somit können die langfristig verfügbaren jährlichen Entzugsleistungen für Sedimente mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit bzw. geringem hydraulischen Gradienten erst nach mehreren Jahren bewertet und gegebenenfalls angepasst werden. Bei maximalen Fließgeschwindigkeiten ist dies bereits nach dem ersten Jahr möglich.

Die zunehmende hydraulische Leitfähigkeit des Sediments und damit die steigende Grundwasserfließgeschwindigkeit erhöhen die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur der Erdwärmesonde. Je höher diese Temperaturdifferenz ist, desto ausgeprägter ist der Wärmeübergang von dem Untergrund in die Erdwärmesonde. Bei einem minimalen hydraulischen Gradienten wird in allen drei Sedimenten eine Rücklauf-temperatur der Erdwärmesonde aus dem Untergrund von weniger als 1 °C erreicht. Dagegen führt ein hoher Gradient zu Rücklauf-temperaturen von 1,33 °C (schluffiger Sand), 2,74 °C (kiesiger Sand) und 2,8 °C (Mittelsand; Abbildung 4-4: 2). Je höher die Temperaturdifferenz zwischen dem ein- und ausströmenden Wärmeträgermedium ist, desto mehr Wärme wurde aus dem Untergrund aufgenommen und entsprechend höher sind die thermischen Entzugsleistungen (Gl. 4-1).

4.3.4 Thermische Entzugsleistung

Einhergehend mit der Steigerung der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur der Erdwärmesonde, korreliert die Grundwasserfließgeschwindigkeit positiv mit der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes. Im Folgenden wird am Beispiel des Mittelsandes der Einfluss variierender Fließgeschwindigkeiten und Mächtigkeiten des Grundwasserleiters auf die thermischen Entzugsleistungen des oberflächennahen Untergrundes untersucht. Alle berechneten Entzugsleistungen beziehen sich auf die im Abschnitt 4.2 dargestellten Randbedingungen des betrachteten Erdwärmesondensystems. Der Einfluss ausgewählter Randbedingungen wird ergänzend im Abschnitt 4.3.6 diskutiert.

Durch die stetige Nachlieferung von thermischer Energie mit dem Grundwasser kühlt sich die Untergrundtemperatur in direkter Angrenzung an die Erdwärmesonde bei hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten nur minimal ab. Dadurch bildet sich ein maximaler Temperaturgradient zwischen der Erdwärmesonde und dem Untergrund aus. Im Mittelsand führt eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ auf 1 md^{-1} zu einer Erhöhung der Rücklauf-temperatur der Erdwärmesonde um etwa 3 K. Damit einhergehend steigt auch die thermische Entzugsleistung für die untersuchten Szenarien des oberflächennahen Untergrundes etwa um den Faktor 3,5 von 20 Wm^{-1} auf 69 Wm^{-1} (Abbildung 4-5). Schon eine Steigerung der Fließgeschwindigkeit von $1\text{E-}4 \text{ md}^{-1}$ auf $1,3\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ führt zu einer Verdopplung der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes von 20 auf etwa 40 Wm^{-1} .

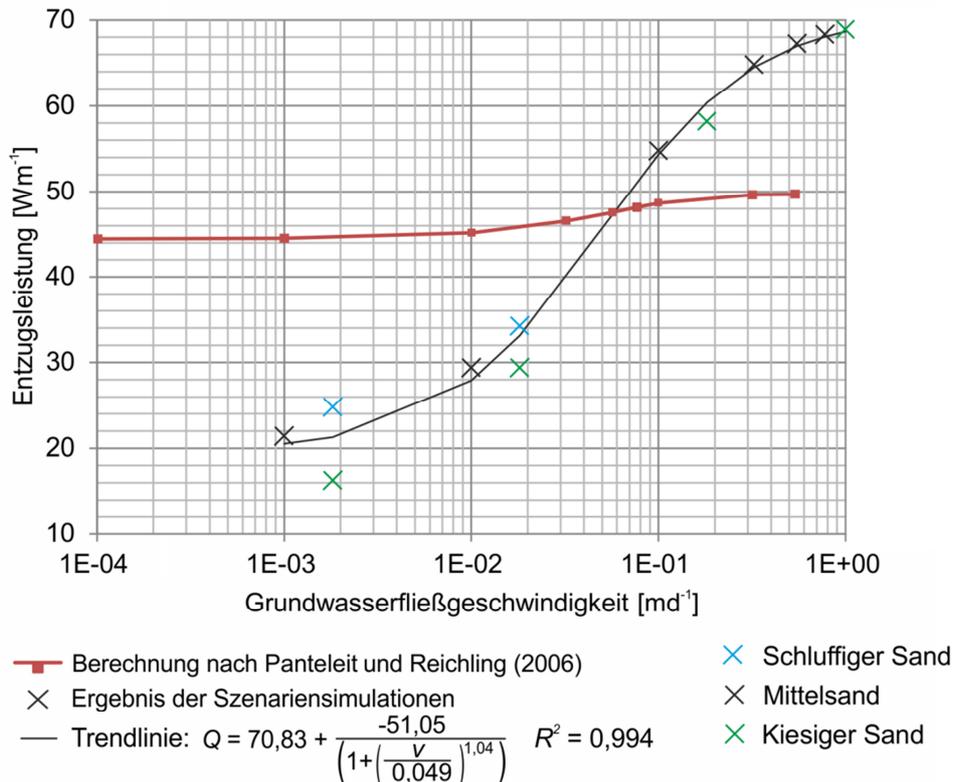


Abbildung 4-5: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die thermische Entzugsleistung nach dem Ansatz von Panteleit und Reichling (2006, Gültigkeitsbereich für untersuchte Szenarien: 1,0E-4 bis 5,5E-1 md⁻¹) und als Ergebnis der Szenariensimulationen für verschiedene Sande unter Ableitung eines vereinfachten Berechnungsansatzes zur Abschätzung der standortspezifischen thermischen Entzugsleistungen.

Die exemplarische Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit dem Ansatz von Panteleit und Reichling (2006) verdeutlicht, wie stark der Einfluss der Advektion gegenwärtig unterschätzt wird. Auf der Grundlage ihres Berechnungsansatzes wird die thermische Entzugsleistung des oberflächennahen Untergrundes für Wohngebäude mit Heizleistungen unter 30 kW wie folgt berechnet (Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016; Gl. 4-2 bis 4-3):

(Gl. 4-2)

$$\begin{aligned}
 P_{ext} = & \left(-0,85 + \frac{0,1}{300} (h - 1.800) + 0,23 \text{ GWF}\right) \lambda^2 + \\
 & \left(13,6 - \frac{0,6}{300} (h - 1.800) + 0,85 \text{ GWF}\right) \lambda + \\
 & 18,8 - \frac{1,25}{300} (h - 1.800) + 4,55 \text{ GWF}
 \end{aligned}$$

(Gl. 4-3)

mit $GWF = 1 - e^{-k_f i}$

Dieser Berechnungsansatz basiert auf Simulationen mit der Software Earth Energy Designer (Buildingphysics, 2008) zur Planung geothermischer Systeme, die standardmäßig in der Praxis Anwendung findet. Zur Berücksichtigung der Grundwasserströmung definierten Panteleit und Reichling (2006) einen Grundwasserfaktor, der einen Wert zwischen 0 und 1 annimmt. Dabei entspricht der Wert 1 einer mittleren hydraulischen Leitfähigkeit von $5E-3 \text{ ms}^{-1}$ und einem hydraulischen Gradienten von $2E-3$. Der Wert 0 entspricht einer mittleren hydraulischen Leitfähigkeit kleiner $1E-6 \text{ ms}^{-1}$ und einem hydraulischen Gradienten von $5E-4$.

Verdeutlicht wird die unterschiedliche Wichtung des Einflusses der Advektion anhand des Ansatzes nach Panteleit und Reichling (2006) und den vorgestellten Szenariensimulationen zudem bei der Gegenüberstellung der Entzugsleistungen für den minimalen ($GWF = 0$) und maximalen Grundwasserfaktor ($GWF = 1$). Nach Panteleit und Reichling (2006) resultiert eine Steigerung des Grundwasserfaktors von 0 auf 1 in einer Erhöhung der Entzugsleistungen um 12 %. Dagegen ergibt die Simulation eine Steigerung der Entzugsleistungen um 229 % (Abbildung 4-6). Selbst wenn der Grundwasserfaktor im Ansatz den advektiven Wärmetransport berücksichtigt, wird der starke Einfluss der Grundwasserströmung nicht abgebildet. Infolgedessen wird das oberflächennahe geothermische Potential an Standorten mit hoher Grundwasserströmung unterschätzt und die geothermischen Systeme überdimensioniert.

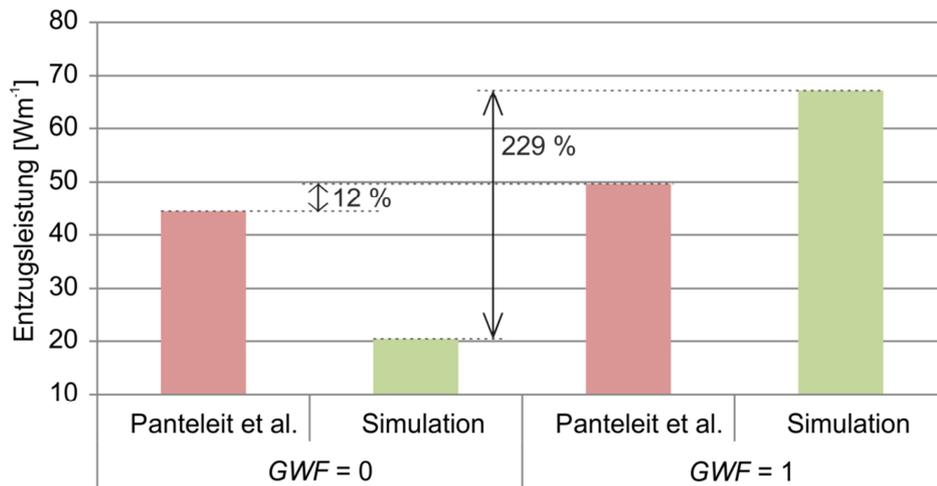


Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der thermischen Entzugsleistungen nach Panteleit und Reichling (2006) und Panteleit (2016) mit den simulierten Ergebnissen bei minimaler ($GWF = 0$) und maximaler Grundwasserströmung ($GWF = 1$).

Die Gegenüberstellung des Ansatzes von Panteleit und Reichling (2006) mit Anwendung des in der Praxis vielfach angewendeten Tools Earth Energy Designer und den in der Finiten Elemente Software Feflow durchgeführten Simulationen verdeutlicht den Bedarf an

neuen Ansätzen zur Abschätzung der thermischen Entzugsleistung des oberflächennahen Untergrundes insbesondere unter Berücksichtigung des Einflusses der Advektion. Daher wurde auf Basis der vorgestellten Simulationen die im Folgenden dargestellte Gleichung abgeleitet, mit der die thermische Entzugsleistung Q in Wm^{-1} in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit v in md^{-1} berechnet werden kann (Gl. 4-4):

$$(Gl. 4-4) \quad Q = 70,83 + \frac{-51,05}{\left(1 + \left(\frac{v}{0,049}\right)^{1,04}\right)}$$

Diese Gleichung entspricht der logistischen Regression der Simulationsergebnisse für schluffigen, mittleren und kiesigen Sand mit einem Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0,994. Sie gilt für Fließgeschwindigkeiten zwischen $1\text{E-}3$ und 1 md^{-1} und Wärmeleitfähigkeiten von 2 bis $3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Abbildung 4-5).

4.3.5 Mächtigkeit des Grundwasserleiters

Insgesamt fördern höhere Entzugsleistungen eine Optimierung des Systems, weil dadurch bei der Planung die Installationslänge verringert und Bohrmeter und Bohrkosten eingespart werden können. Da sich der Untergrund aus Grundwasser leitenden und stauenden Schichten zusammensetzt, muss die Mächtigkeit der mit Grundwasser durchströmten Schichten bei der Betrachtung realer Systeme berücksichtigt werden. Ausgangspunkt für einen in der Praxis üblichen Ansatz ist die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten und thermischen Entzugsleistungen der einzelnen Schichten anhand von Literaturwerten oder Messungen. Der Anteil der Mächtigkeit der einzelnen Schichten an der gesamten geothermisch erschlossenen Tiefe wird dabei als Wichtungsfaktor bei Summierung der einzelnen thermischen Entzugsleistungen berücksichtigt (LfULG, 2013; Gl. 4-5):

$$(Gl. 4-5) \quad Q_M = Q_{L1} h_{L1} + Q_{L2} h_{L2} + \dots + Q_{Ln} h_{Ln}$$

Wobei gilt: Q_M ist die mittlere thermische Entzugsleistung des geothermisch erschlossenen Untergrundes in Wm^{-1} , Q_{Ln} ist die thermische Entzugsleistung der einzelnen Schichten L_1 bis L_n in Wm^{-1} , und h_{Ln} ist der dimensionslose Anteil der jeweiligen Schicht an der gesamten geothermisch erschlossenen Tiefe.

Im Folgenden wird geprüft, welchen Einfluss die Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf die mittleren thermischen Entzugsleistungen hat und ob die nach Gleichung Gl. 4-5 berechneten mittleren Entzugsleistungen mit den anhand von Modellsimulationen ermittelten Entzugsleistungen übereinstimmen. Dabei bestehen die analysierten Untergrundmodelle je aus einer Grundwasser leitenden und einer Grundwasser stauenden Schicht. Die Mächtigkeit

keit des Grundwasserleiters variiert mit einem Anteil von 0, 25, 50, 75 und 100 % an der gesamten geothermisch erschlossenen Tiefe von 100 m.

Die Ergebnisse zeigen, dass die berechneten und simulierten mittleren thermischen Entzugsleistungen der untersuchten Szenarien bis auf minimale Abweichungen durch die Schichtübergänge sehr gut übereinstimmen (Tabelle 4-3). Es ist zu erkennen, dass die thermische Entzugsleistung mit zunehmender Mächtigkeit des Grundwasserleiters steigt, insbesondere bei Grundwasserleitern mit hohen Fließgeschwindigkeiten (Szenario SM5). Je höher die Entzugsleistung ist, desto geringer ist die benötigte Installationslänge und desto geringer sind die Bohrkosten (Abbildung 4-5, Tabelle 4-3). Die höchste Variation der Installationslänge zeigt sich zwischen dem Szenario mit einem Anteil des Grundwasserleiters an der geothermisch erschlossenen Tiefe von 0 % und minimalen Grundwasserfließgeschwindigkeiten (Szenario SM1, 464 m Installationslänge und 23.200 € Bohrkosten) und einem Anteil des Grundwasserleiters von 100 % und maximaler Grundwasserströmung (Szenario SM5, 116 m Installationslänge und 5.800 € Bohrkosten). Ein Anteil des Grundwasserleiters von 100 % repräsentiert die vollständige Grundwassersättigung des Untergrundes, wie sie in der Regel zwar nicht auftritt, jedoch in der Planungssoftware wie dem Earth Energy Designer als vereinfachte Randbedingung angesetzt wird (Buildingphysics, 2008).

Tabelle 4-3: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit und Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf die mittleren simulierten und berechneten thermischen Entzugsleistungen (Q_{sim} und Q_{calc}), benötigten Installationslängen (L_{BHE}) bei dem Wärmebedarf von 8 kW (beispielhaft für die Szenarien SM1 und SM5 für Mittelsand mit Fließgeschwindigkeiten von $1E-4$ bzw. 1 md^{-1}).

Mächtigkeit des Grundwasserleiters [%]	Szenario SM1 ($v = 1E-4 \text{ md}^{-1}$)			Szenario SM5 ($v = 1 \text{ md}^{-1}$)		
	$Q_{sim} [\text{Wm}^{-1}]$	$Q_{calc} [\text{Wm}^{-1}]$	$L_{BHE} [\text{m}]$	$Q_{sim} [\text{Wm}^{-1}]$	$Q_{calc} [\text{Wm}^{-1}]$	$L_{BHE} [\text{m}]$
0	17,3	17,3	464	17,3	17,3	464
25	18,2	18,2	439	32,0	30,2	250
50	20,2	19,1	397	45,0	43,1	178
75	20,5	20,1	390	57,5	56,0	139
100	21,0	21,0	381	68,9	68,9	116

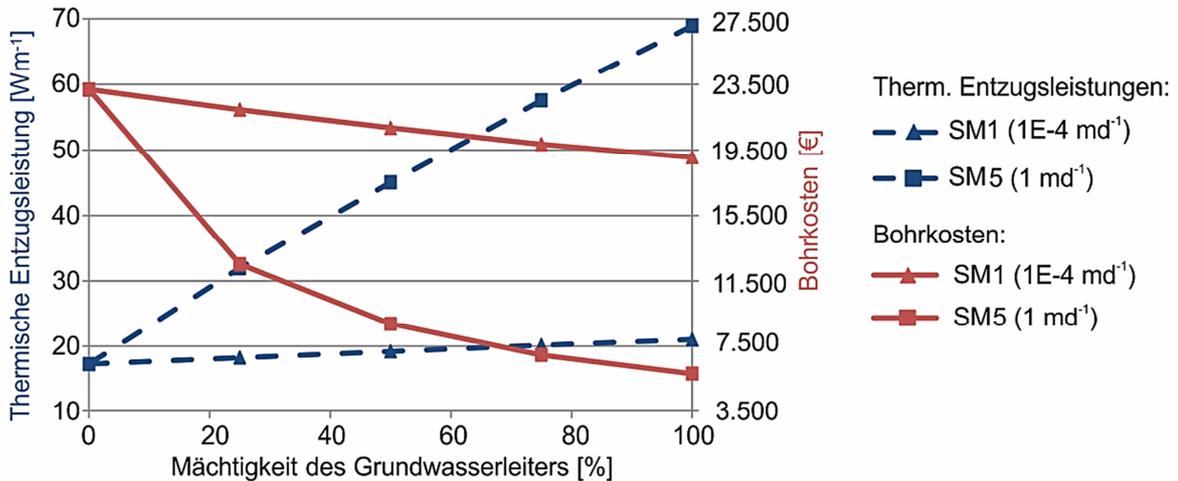


Abbildung 4-7: Einfluss der Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf die thermische Entzugsleistung des Mittelsandes und die Bohrkosten am Beispiel eines Einfamilienhauses mit einem Wärmebedarf von 8 kW und Bohrkosten von 50 €m⁻¹ bei minimaler (Szenario SM1) und maximaler untersuchter Grundwasserfließgeschwindigkeit (Szenario SM5).

4.3.6 Einfluss systemspezifischer Randbedingungen

Die thermischen Entzugsleistungen, die für oberflächennahe geothermische Systeme betrachtet werden, sind in jedem Fall von den Randbedingungen des untersuchten Szenarios abhängig. Wichtige Randbedingungen sind die Untergrundeigenschaften (z. B. die ungestörte Erdreichtemperatur oder die Grundwasserfließgeschwindigkeit), das Nutzerverhalten und die systemtechnischen Faktoren wie die Betriebsstunden, der Bohrl Lochdurchmesser, die Lage der Erdwärmesonde im Bohrloch und die Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten, (Stober und Bucher, 2012; Tholen und Walker-Hertkorn, 2008). Da auch die in der Literatur aufgeführten geothermischen Potentiale verschiedener Sedimente (beispielsweise in der VDI 4640-1, 2010) von spezifischen Randbedingungen abhängen, ist ihre allgemeine Anwendung auf beliebige Systeme generell kritisch zu hinterfragen. Um diese Sensitivität exemplarisch hervorzuheben, werden im Folgenden für das Szenario des mittleren Sandes mit einer Fließgeschwindigkeit von 1E-4 md⁻¹ drei Randbedingungen untersucht:

- 1) die ungestörte Erdreichtemperatur (Variation zwischen 8, 10, 12, 14 und 16 °C),
- 2) die Dauer der Heizperiode (Variation zwischen 3, 5 und 7 Monaten) sowie
- 3) die Fließrate des Wärmeträgermediums im Inneren der Erdwärmesonde (Variation zwischen 20, 30, 40 und 54 m³d⁻¹).

Den stärksten Einfluss auf die berechnete thermische Entzugsleistung hat die Variation der ungestörten Erdreichstemperatur (Abbildung 4-8). Unter den hier betrachteten Randbedingungen (Vorlauftemperatur der Erdwärmesonde von 0 °C) führt eine Erhöhung der Untergrundtemperatur zur Steigerung der Temperaturdifferenz zwischen Untergrund und Wärmeträgermedium und damit zu einem verbesserten Wärmetransport in Richtung der Erdwärmesonde. Nach fünf Jahren saisonalem Heizen erbringt eine Steigerung der un-

gestörten Untergrundtemperatur um 8 K (von 8 °C auf 16 °C) einen Anstieg der Entzugsleistungen um 100 % von 17 auf 34 Wm⁻¹ (Abbildung 4-8: a). Verglichen damit ist der Einfluss der Dauer der Heizperiode gering. Der Unterschied in der Rücklauftemperatur der Erdwärmesonde zwischen der dreimonatigen und siebenmonatigen Heizperiode von 3,37 °C zeigt, dass sich kürzere Heizperioden grundsätzlich positiv auf das thermische Regime im Untergrund auswirken. Der Untergrund kann sich in den längeren Heizpausen vollständig thermisch regenerieren. Nichtsdestotrotz variieren die berechneten thermischen Entzugsleistungen der unterschiedlich langen Heizzyklen wenig, da sich die Untergrundtemperaturen schon in den kürzeren Heizpausen (für die hier getroffenen Rahmenbedingungen) den ungestörten Untergrundtemperaturen angleichen. Die Steigerung der Strömungsrate des Wärmeträgermediums im Inneren der Erdwärmesonde korreliert positiv mit den Rücklauftemperaturen der Erdwärmesonde und den berechneten Entzugsleistungen. Obwohl die Rücklauftemperatur mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit auf Grund der kürzeren Verweilzeit des Wärmeträgermediums in der Erdwärmesonde abnimmt, erhöht sich die Entzugsleistung, da ein größerer Volumenstrom pro Zeit die Erdwärmesonde passiert. In der Praxis führt eine erhöhte Fließrate nicht zwangsläufig zu einer gesteigerten Effizienz des geothermischen Systems, da die Fließrate den Energieverbrauch der Umwälzpumpe zum Antrieb der Zirkulation in der Erdwärmesonde beeinflusst und direkt mit den anderen Komponenten des Wärmepumpenkreislaufes verknüpft ist.

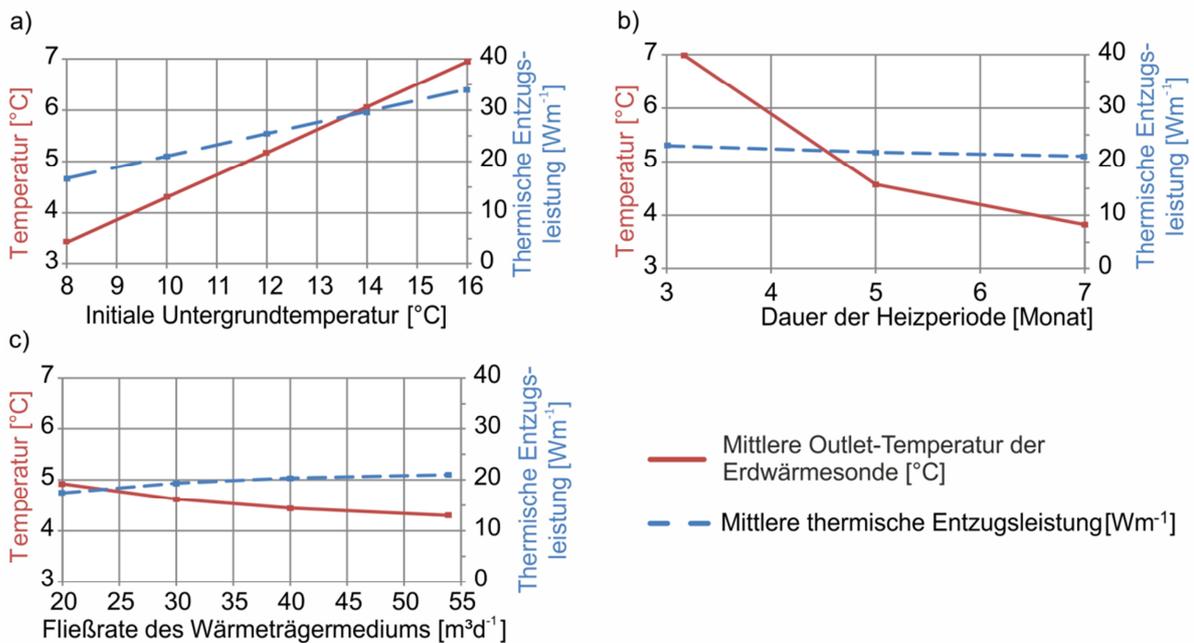


Abbildung 4-8: Einfluss der Randbedingungen a) initiale Untergrundtemperatur, b) Dauer der Heizperiode und c) Fließrate des Wärmeträgermediums im Inneren der Erdwärmesonde auf die thermische Entzugsleistung nach fünf Jahren saisonalem Heizbetrieb für Mittelsand mit einer Fließgeschwindigkeit von 1E-4 md⁻¹ (Szenario SM1).

Insgesamt ist die Sensitivität der berechneten thermischen Entzugsleistungen gegenüber den Untergrundeigenschaften wie der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Untergrundtemperatur deutlich höher einzuschätzen als gegenüber den systemspezifischen Parametern wie die Fließrate des Wärmeträgermediums der Erdwärmesonde. Diese Ergebnisse bestätigen die hohe Bedeutung, die der Untergrundparametrisierung für eine effiziente und umweltschonende thermische Nutzung geothermischer Systeme zukommt. Literaturangaben der thermischen Entzugsleistung verschiedener Sedimente stellen nur Orientierungswerte dar und sind ausschließlich dann als geeignet zu bewerten, wenn die zur Ermittlung der Werte angenommenen Randbedingungen bekannt und mit denen des zu untersuchenden Systems vergleichbar sind.

4.3.7 Klassifizierung des Einflusses der Advektion

Für eine nachhaltige thermische Nutzung des Untergrundes muss der Einfluss der dominierenden Wärmetransportprozesse bei der Planung und dem Design der Systeme berücksichtigt werden. Die Klassifizierung des Einflusses der Grundwasserfließgeschwindigkeiten auf das Temperaturregime des Untergrundes und die verfügbaren thermischen Entzugsleistungen erfolgt auf Grundlage der dimensionslosen Péclet-Zahl Pe (Vergleich Kapitel 3.2.1, Gl. 3-16). Ausgangspunkt für die Klassifizierung ist der Ansatz von Chiasson et al. (2000). Demnach hat die Grundwasserströmung bei Péclet-Zahlen größer 1 einen relevanten Einfluss auf die Auswertung von Thermal Response Tests. Für die folgenden Untersuchungen entspricht die charakteristische Länge zur Berechnung der Péclet-Zahl dem Wert 4,5 m und repräsentiert den Abstand zwischen zwei benachbarten Erdwärmesonden (Chiasson et al., 2000).

Aufbauend auf den dargestellten Zusammenhängen zwischen der Grundwasserfließgeschwindigkeit und den induzierten Temperaturänderungen sowie den berechneten thermischen Entzugsleistungen, leitet sich die folgende Klassifizierung des Einflusses der Advektion ab:

- Klasse 1: $0 < Pe < 1$,
- Klasse 2: $1 \leq Pe \leq 10$,
- Klasse 3: $10 < Pe$.

Je höher die Péclet-Zahl ist, desto höher sind die Grundwasserfließgeschwindigkeit und die thermische Entzugsleistung. Folglich repräsentiert jede Klasse eine Spannbreite an Grundwasserfließgeschwindigkeiten und thermischen Entzugsleistungen des Untergrundes (Abbildung 4-9 und Tabelle 4-4).

Klasse 1 ist durch einen bei der Planung geothermischer Systeme vernachlässigbar geringen Einfluss von Grundwasserfließgeschwindigkeiten zwischen $1\text{E-}4$ und $1\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ charakterisiert. Die für diese Klasse resultierenden Entzugsleistungen liegen im Bereich von 20 bis 29 Wm^{-1} (unter den in Abschnitt 4.2 erläuterten Randbedingungen). Induzierte Temperaturanomalien zeigen eine radialsymmetrische Geometrie mit maximalen Änderungen der Untergrundtemperatur und ein vergleichbar geringes geothermisches Potential (Abbildung 4-9 und Tabelle 4-4). Da in dieser Klasse der advective Wärmetransport einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die thermische Untergrundnutzung hat, sind Planungs- und Designtools, die ausschließlich den konduktiven Wärmetransport berücksichtigen, geeignet.

Entgegengesetzte Bedingungen definiert Klasse 3, wobei die Advektion den Wärmetransport dominiert. Die Grundwasserfließgeschwindigkeiten dieser Klasse übersteigen $0,33 \text{ md}^{-1}$ und erhöhen die thermischen Entzugsleistungen um den Faktor 3 auf über 55 Wm^{-1} (verglichen mit den minimalen Werten der Klasse 1). Die Temperaturfahnen dieser dritten Klasse sind durch eine maximale Ausdehnung in Grundwasserfließrichtung gekennzeichnet. Trotz dieser großen räumlichen Ausdehnung zeigen diese Anomalien nur minimale absolute Temperaturänderungen, da mit dem strömenden Grundwasser unmittelbar Energie nachgeliefert wird. Durch die größere räumliche Ausdehnung kann es bei geringem Abstand zwischen benachbarten geothermischen Systemen eher zu Überlagerungen der Temperaturfahnen kommen. Die Auswirkungen für die thermische Nutzung (beispielsweise eine Verschlechterung der Systemeffizienz durch eine stärkere Abkühlung des Untergrundes) ist auf Grund der sehr geringen Temperaturänderung jedoch minimal. Der positive Einfluss der Advektion auf die Energiebilanz des Untergrundes und damit die Effizienz und Nachhaltigkeit geothermischer Systeme muss bei dem Design und der Planung berücksichtigt werden. Konventionelle Planungstools wie der Earth Energy Designer (Buildingphysics, 2008) werden diesem Anspruch auf Grund der Betrachtung des ausschließlich auf der Konduktion basierenden Wärmetransportes nicht gerecht. Für diese Klasse bietet der in Kapitel 4.3.4 entwickelte Ansatz zur Abschätzung der thermischen Entzugsleistungen eine geeignete Alternative zu rein Konduktion basierten Planungstools.

Die Klasse 2 repräsentiert die Übergangszone zwischen Klasse 1 und 3, in der sowohl Advektion als auch Konduktion einen deutlichen Einfluss auf das Temperaturregime im Untergrund haben. Für die in dieser Klasse untersuchten Szenarien ergeben Grundwasserfließgeschwindigkeiten von $0,03$ bis $0,1 \text{ md}^{-1}$ eine Verdopplung der thermischen Entzugsleistungen auf Werte zwischen 29 und 55 Wm^{-1} . Allerdings stellt diese Klasse, auch wenn sie gesteigerte Entzugsleistungen aufweist, einen kritischen Bereich dar. Die Kombination aus erhöhten Temperaturänderungen (durch mittlere Rücklauftemperaturen an der Erd-

wärmesonde zwischen 1,6 und 2,2 °C) und stärkerer Grundwasserströmung (verglichen mit Klasse 1) führt zu einem erhöhten Risiko für thermische Interaktionen zwischen benachbarten Erdwärmesonden. In diesen Größenordnungen der Grundwasserfließgeschwindigkeit muss die Advektion als Prozess in die Planung der thermischen Untergrundnutzung insbesondere im urbanen Raum mit hoher Dichte an installierten Erdwärmesonden einbezogen werden. Analog zur Klasse 3 sollte auch in dieser Klasse das Systemdesign unter Anwendung numerischer Modelle z. B. in Hinblick auf minimale Untergrundtemperaturen zur Verhinderung von Frost-Tau-Wechseln kritisch untersucht und gegebenenfalls angepasst werden.

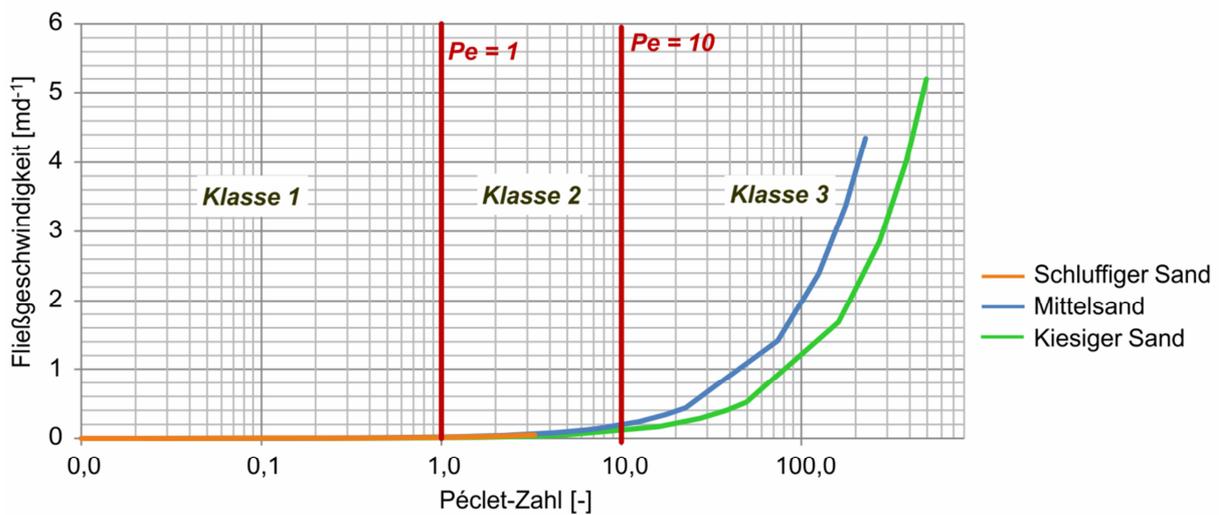


Abbildung 4-9: Klassifizierung des Einflusses der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie anhand der berechneten Péclet-Zahl für die untersuchten Szenarien.

Tabelle 4-4: Charakterisierung der drei Klassen des Einflusses der Grundwasserströmung.

	1. Klasse	2. Klasse	3. Klasse
Einfluss der Grundwasserdynamik	Gering	Mittel	Hoch
Péclet-Zahl [-]	< 1	1 - 10	> 10
Fließgeschwindigkeit [md⁻¹]	< 0,01	0,01 - 0,10	> 0,10
Mittlere Rücklauftemperatur während der Heizphase [°C]	< 1,6	1,6 - 2,2	> 2,2
Dominanter Wärmetransportprozess	Konduktion	Konduktion oder Advektion	Advektion
Thermische Entzugsleistung [Wm⁻¹]	< 29	29 - 55	> 55
Geometrie und Intensität der Temperaturänderung	Kleine Fahnen mit max. Änderungen	Variierende Ausdehnung und Änderung	Große Fahnen mit min. Änderung

	1. Klasse	2. Klasse	3. Klasse
Risiko für thermische Interaktionen mit negativen Auswirkungen auf benachbarte Systeme	Erhöht im nahen Umfeld	Vergleichsweise hoch im Grundwasserabstrom	Gering

Wie schon im Abschnitt 0 dargestellt, muss die Schichtung des Untergrundes bei der Bewertung relevanter Wärmetransportprozesse berücksichtigt werden. Analog zu dem Vorgehen bei der Berechnung der mittleren thermischen Entzugsleistung des Untergrundes wird im Folgenden die mittlere Péclet-Zahl berechnet, um die geothermisch erschlossene Tiefe zu charakterisieren (Gl. 4-6):

$$(Gl. 4-6) \quad Pe_M = Pe_{L1} h_{L1} + Pe_{L2} h_{L2} + \dots + Pe_{Ln} h_{Ln}$$

Wobei gilt: Pe_M ist die mittlere Péclet-Zahl der erschlossenen Tiefe und Pe_{L1} bis Pe_{Ln} sind die Péclet-Zahlen der einzelnen Schichten L_1 bis L_n , die nach ihrem Anteil an der Gesamttiefe h_{L1} bis h_{Ln} gewichtet werden.

Je höher die Mächtigkeit und die Péclet-Zahl des Grundwasserleiters sind, desto größer ist die mittlere Péclet-Zahl des Untergrundes (Abbildung 4-10). Bereits für kleine Mächtigkeiten des Grundwasserleiters unter 10 % überschreitet die mittlere Péclet-Zahl die Obergrenze für die Klasse 1 von $Pe = 1$. Somit fällt die Mehrheit der untersuchten Szenarien zur oberflächennahen geothermischen Nutzung in die Klasse 2 oder 3. Auch wenn in einzelnen Fällen der Einfluss der Advektion auf das Energieregime des Untergrundes vernachlässigbar gering ist, muss die Advektion als Wärmetransportprozess für den Großteil der untersuchten Szenarien berücksichtigt werden.

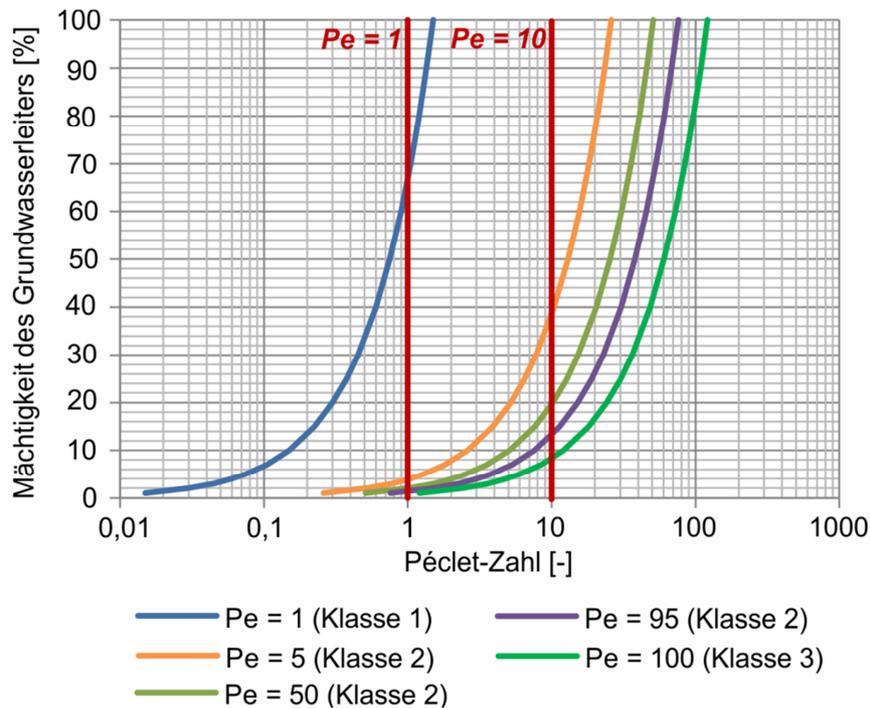


Abbildung 4-10: Einfluss der Mächtigkeit und der Péclet-Zahl des Grundwasserleiters auf die mittlere Péclet-Zahl des geothermisch erschlossenen Untergrundes.

4.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Energiebilanz des oberflächennahen Untergrundes wird sowohl durch konduktiven als auch durch advektiven Wärmetransport bestimmt. Szenarien mit Grundwasserfließgeschwindigkeiten kleiner $0,01 \text{ md}^{-1}$ und einer Mächtigkeit des Grundwasserleiters von maximal 62 % dominiert der konduktive Wärmetransport. Bei allen anderen untersuchten Szenarien muss dagegen die Advektion als Wärmetransportprozess berücksichtigt werden.

Zum einen steigt mit zunehmender Fließgeschwindigkeit das verfügbare geothermische Potential des Untergrundes. Schon eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit von $0,01 \text{ md}^{-1}$ (Obergrenze der Klasse 1) auf $0,1 \text{ md}^{-1}$ (Obergrenze Klasse 2) führt zu einer Verdopplung der thermischen Entzugsleistung. Damit einhergehend halbieren sich die benötigten Bohrer und reduzieren sich die Installationskosten. Zudem wird die Systemeffizienz durch eine Anpassung des Systemdesign an die standortspezifischen Bedingungen optimiert. Mit einer angepassten Systemplanung verbessert sich die Konkurrenzfähigkeit erdgekoppelter Wärmepumpen gegenüber konventionellen Wärmequellen (wie Erdöl und -gas) und luftgekoppelten Wärmepumpen.

Zum anderen ist die Grundwasserströmung essentiell für die Bewertung der induzierten Temperaturanomalien und potentieller thermischer Interaktionen zwischen benachbarten geothermischen Systemen. Obwohl bei einer maximalen Grundwasserströmung die räumliche Ausdehnung der Temperaturanomalie am höchsten ist, reduziert sich das Risiko für

eine negative Beeinflussung der benachbarten Erdwärmesonden. Durch die stetige Nachlieferung von Energie sind die induzierten absoluten Temperaturänderungen minimal.

Des Weiteren belegen die vorgestellten Ergebnisse zum Einfluss der Advektion, dass die Eignung der Softwaretools zur Dimensionierung geothermischer Systeme je nach Standortbedingungen geprüft werden muss. Während Tools, die ausschließlich konduktiven Wärmetransport berücksichtigen, für die Planung von geothermischen Systemen an Standorten mit Péclet-Zahlen kleiner eins geeignet sind, kommen sie bei erhöhtem Einfluss der Grundwasserströmung an ihre Anwendungsgrenzen. Alternativ sollte der aus den Szenariensimulationen abgeleitete Ansatz zur Abschätzung der thermischen Entzugsleistungen an Standorten mit Péclet-Zahlen größer eins in die Planung einbezogen werden.

Der Vergleich des Einflusses verschiedener Randbedingungen auf die thermische Entzugsleistung belegt, dass die Untergrundbedingungen für die untersuchten Szenarien eine größere Bedeutung haben als exemplarisch betrachtete systemspezifische Randbedingungen. Grundsätzlich ist jedoch die Planung der Systeme nur so belastbar, wie es die Eingabedaten zur Parametrisierung des Untergrundes sind. Um den Einfluss der Advektion abzuleiten, müssen daher die für die geothermische Nutzung relevanten Untergrundcharakteristiken, zu denen auch die Grundwasserfließgeschwindigkeit und -fließrichtung zählt, standortspezifisch bestimmt werden. Eine Auswahl an Erkundungsmethoden zur Bestimmung der für die geothermische Untergrundnutzung relevanten Parameter ist in Tabelle A-2 im Anhang dargestellt. Unsicherheiten, die mit der Erkundung einhergehen, sind im Kapitel 6.4.2 diskutiert.

5 Thermische Auswirkungen einer intensiven geothermischen Nutzung unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen

5.1 Einleitung

Erdwärmekollektoren, Brunnendubletten und in ihrer Bohrtiefe begrenzte Erdwärmesonden (z. B. in Bayern: BWP, 2012) sind geothermische Systeme, die sich in ihrer Anwendung oft auf die oberen Dekameter des Untergrundes beschränken. Anders als bei tiefen geothermischen Systemen wird das Energiedargebot dieser flachen Systeme in den oberen Zehnermetern des Untergrundes weniger durch den geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinneren, sondern durch oberflächennahe Wärmequellen gespeist. Dabei dominiert die solare Strahlung die Energiebilanz des Bodens und stellt die für die geothermische Nutzung nötige Energie bereit (Hillel, 1980). Neben oberirdischen Faktoren wie Lufttemperatur und Intensität der Sonneneinstrahlung spielen die Eigenschaften des oberflächennahen Untergrundes eine wesentliche Rolle bei der Quantifizierung des standort-spezifischen geothermischen Potentials.

Allerdings werden in der Planungspraxis die Untergrundbedingungen vor allem bei kleineren geothermischen Systemen, wie sie für Einfamilienhäuser typisch sind, in der Regel vereinfacht betrachtet. Insbesondere bei einem hohen Anteil der Grundwasser durchströmter Schichten an der geothermisch erschlossenen Tiefe führt die Vernachlässigung des advektiven Wärmetransportes zu einer Fehleinschätzung des standort-spezifischen geothermischen Potentials. Infolgedessen steigt das Risiko für die Über- und Unterdimensionierung der geothermischen Systeme. Zudem erschwert die Unwissenheit über die Strömungsbedingungen die Prognose von Temperaturanomalien im Umfeld des geothermischen Systems (Vergleich Kapitel 4).

Neben der Grundwasserströmung kann auch die ungesättigte Zone Einfluss auf die Effizienz und Nachhaltigkeit der geothermischen Untergrundnutzung haben. Grund dafür ist die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes vom Wassergehalt des Sedimentes. So ist die Wärmeleitfähigkeit von ungesättigtem Sand um etwa $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ geringer als die des Grundwasser gesättigten Sandes (VDI 4640-1, 2010). Nicht zuletzt deswegen unterscheiden sich Grundwasser gesättigte und ungesättigte Sedimente deutlich in ihrem geothermischen Potential. Ihre spezifischen Entzugsleistungen variieren um circa 35 Wm^{-1} (VDI 4640-2, 2001). Wie hoch der Einfluss der ungesättigten Zone auf das geothermische Potential eines Standortes ist, hängt von ihrer Schichtmächtigkeit ab. Diese ungesättigte

Mächtigkeit wiederum kann ohne standortspezifische Daten nur schwer abgeschätzt werden, da sie bereits auf kleiner Skala um über 10 m variieren kann. Exemplarisch dargestellt ist diese Variabilität in den Karten der Grundwasserflurabstände der Städte Taucha und Dresden. An beiden Standorten nimmt die ungesättigte Mächtigkeit auf einer Strecke von wenigen Kilometern von 2 auf über 20 m zu (Abbildung 5-1). Der Einfluss dieser Variation kann exemplarisch an einem geothermischen System mit einer maximalen Installationstiefe von 45 m und einer Gesamtlänge an installierten Erdwärmesonden von 180 m gezeigt werden. Der Anteil der ungesättigten Zone an der geothermisch erschlossenen Mächtigkeit liegt je nach Grundwasserflurabstand zwischen 4,4 und 44 % (bei Grundwasserflurabständen von 2 m und 20 m).

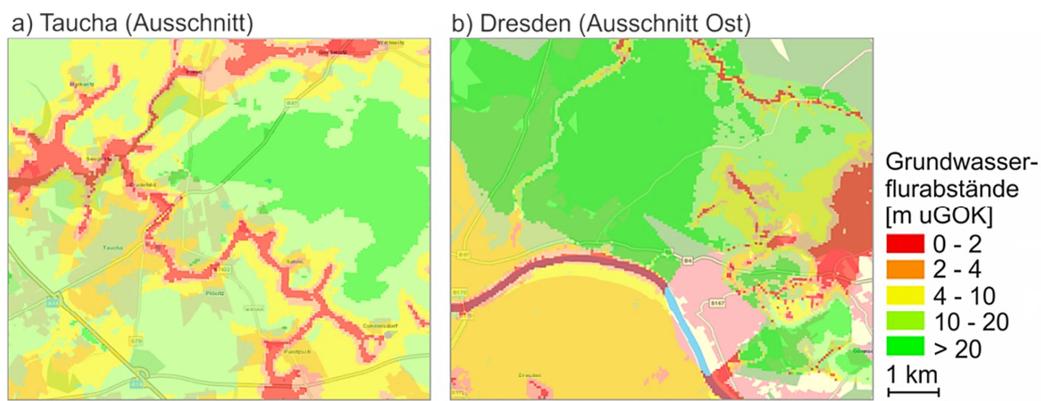


Abbildung 5-1: Ausschnitte aus der Karte der mittleren Grundwasserflurabstände in Sachsen am Beispiel der Städte a) Taucha und b) Dresden (verändert nach GeoSN, 2015).

Bei der in der Praxis üblichen Planung geothermischer Systeme auf Basis des konduktiven Wärmetransports wird auch der Einfluss der ungesättigten Mächtigkeit vernachlässigt. Beispielhaft ist das Planungstool Earth Energy Designer zu nennen, das ursprünglich für die Planung geothermischer Systeme mit Tiefen über 100 m entwickelt wurde und den Untergrund daher vereinfacht als vollständig mit Grundwasser gesättigtes Medium darstellt (Buildingphysics, 2008; Eskilson, 1987). Weder die Abhängigkeit des geothermischen Potentials von den mit Grundwasser durchströmten Schichten noch die Beeinflussung der standortspezifischen Wärmeleitfähigkeiten durch die ungesättigte Zone werden hier direkt berücksichtigt. Die Folgen der Vereinfachung der Untergrundbedingungen, die die Wärmetransportprozesse je nach Standortgegebenheiten deutlich beeinflussen können, sind in der Literatur unzureichend erläutert. Zwar diskutieren beispielsweise Casasso und Sethi (2014), Hähnlein et al. (2010), Lo Russo et al. (2012) und Pannike et al. (2006) in ihren Studien relevante Untergrundparameter für die geothermische Nutzung von offenen und geschlossenen Systemen, jedoch begrenzen sich ihre Untersuchungen auf einzelne Anwendungen.

Mit dem Trend der zunehmend intensiven Nutzung des Untergrundes im urbanen Raum gewinnt die Betrachtung der für den Wärmetransport relevanten Untergrundbedingungen zunehmend an Bedeutung. Dies gilt vor allem, da sich in innerstädtischen Gebieten der Wärme- und Kältebedarf auf einer verglichen mit außerstädtischen Arealen geringen Fläche konzentriert. Zudem beeinflussen andere urbane Strukturen wie Tunnel und Keller die Temperaturbedingungen im Untergrund (Menberg et al., 2013). Als Beispiel für eine Fläche mit intensiver geothermischer Nutzung ist ein Wohngebiet in Köln Junkersdorf zu nennen, das mit einem Anteil von 30 % mit Erdwärme versorgt wird. Das entspricht einem Wärmebedarf von insgesamt 478 kW. Die 305 im Wohngebiet installierten Erdwärmesonden ergeben in Summe eine Installationslänge von 11,5 km und sind mitunter nur wenige Meter bis Dekameter voneinander entfernt (Stadt Köln, Umwelt- und Verbraucherschutzamt, 2013; Vienken et al., 2015).

Wie sich die Vereinfachung der Untergrundbedingungen auf die Planung von geothermischen Systemen in derart intensiv genutzten Bereichen auswirkt, ist gegenwärtig unzureichend untersucht. Daher ist es das Ziel der im Folgenden vorgestellten Studie, die Auswirkungen der vereinfachten Betrachtung der Untergrundbedingungen auf die geothermische Nutzung im urbanen Raum zu beleuchten. Die Untersuchungen fokussieren den Einfluss der Grundwasser durchströmten und Grundwasser ungesättigten Schichten auf die Ausbildung von Temperaturanomalien bei der Nutzung eines einzelnen sowie zwei benachbarter geothermischer Systeme. Dafür werden Grundwasser gesättigte und teilgesättigte Bedingungen unter verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Im Ergebnis wird der Zusammenhang zwischen den standortspezifischen Untergrundbedingungen und dem Risiko für thermische Interaktionen zwischen benachbarten geothermischen Systemen diskutiert.

5.2 Untersuchungsgebiet

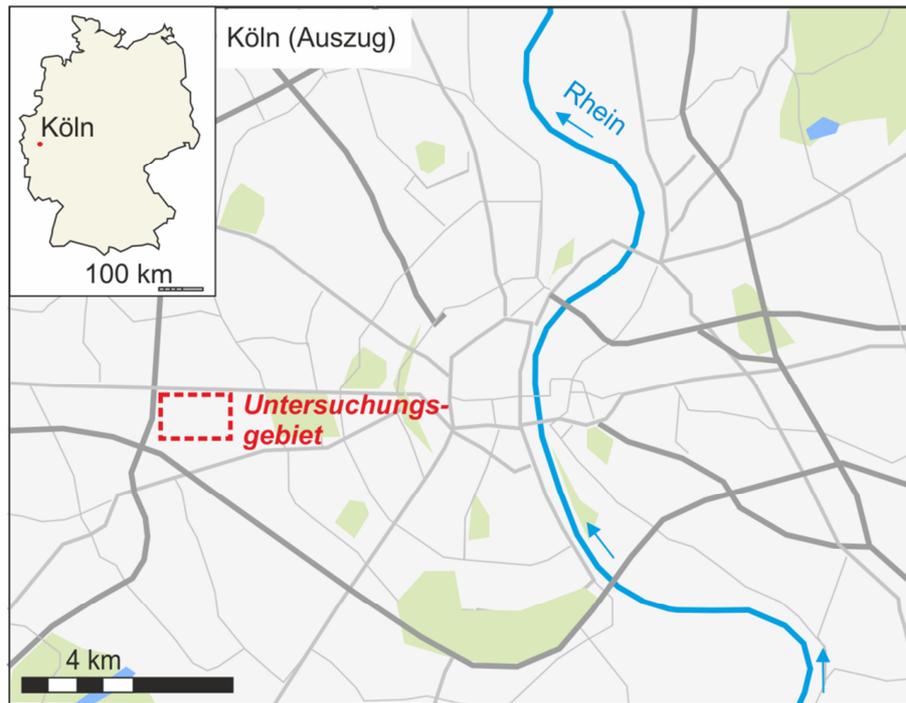
Das Untersuchungsgebiet repräsentiert das bereits genannte städtische Wohngebiet in Köln Junkersdorf (Abbildung 5-2: a). Auf einem ehemaligen Kasernengelände mit einer Fläche von 0,15 km² wurden in den vergangenen Jahren sukzessive Einfamilien- und Reihenhäuser kernsaniert und neu errichtet. Neben 50 Erdwärmesondensystemen sind drei offene Systeme mit insgesamt acht Grundwasserbrunnen installiert. Die Installations-tiefe der Erdwärmesonden beschränkt sich auf den oberflächennahen Untergrund mit einer durchschnittlichen Tiefe von 38 m unter Geländeoberkante (Stadt Köln, Umwelt- und Verbraucherschutzamt, 2013; Vienken et al., 2015).

Geologisch ist das Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Tieflandsbucht zuzuordnen, die im Norden an das Rheinische Schiefergebirge angrenzt. Die Niederrheinische

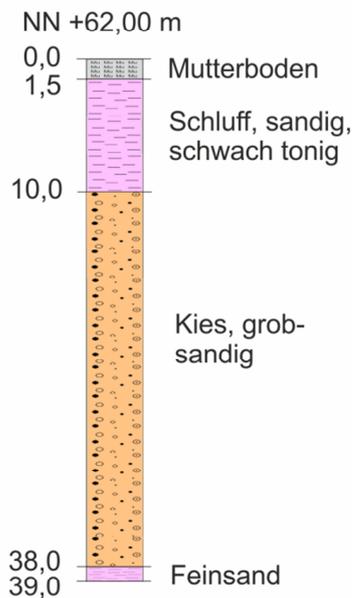
Bucht ist ein in Bruchschollen untergliedertes Senkungsgebiet. Die Beckenstruktur charakterisieren Bruchschollen wie die Erft-Scholle und die Kölner Scholle, die sich als Resultat der orogenen Bruchschollenbewegungen und Hebungen ausbildeten. Auf dem paläozoischen Grundgebirge lagerte sich eine bis zu 1.000 m mächtige Schichtfolge aus fluviatil geprägten Sedimenten des Tertiärs und Quartärs ab (Boenigk, 1978; Quitzow und Vahlensieck, 1955). Das Untersuchungsgebiet liegt in den nacheiszeitlichen Terrassenebenen des Rheins. Gut durchlässige quartäre Terrassensedimente bilden die oberen Grundwasserleiter. Ihre Basis setzt sich aus Feinsanden und Schluffen des Tertiärs zusammen (Ad-hoc-AG Hydrogeologie, 2016).

Wie die Bohrprofile der bereits am Standort installierten Erdwärmesonden zeigen, ist der sandig kiesige Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet etwa 28 m mächtig. Ab einer Tiefe von etwa 38 m unter Geländeoberkante grenzen die Grundwasser stauenden Feinsedimente an (Abbildung 5-2: b). Charakteristisch für den Standort ist der hohe Grundwasserflurabstand von etwa 22 m unter Geländeoberkante (Abbildung 5-2: c). Bedeckt wird der sandig kiesige Grundwasserleiter von einer circa 10 m mächtigen, bindigen Deckschicht aus Löß und Auesedimenten. Der lokale hydraulische Gradient von etwa $7E-4$ und die mittlere hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters von $7E-4 \text{ ms}^{-1}$ ergeben eine durchschnittliche Grundwasserfließgeschwindigkeit von circa $0,04 \text{ md}^{-1}$. Wie Stichtagsmessungen der Grundwasserflurabstände zeigen, strömt das Grundwasser im Untersuchungsgebiet von West nach Ost in Richtung des Vorfluters Rhein.

a)



b)



c)

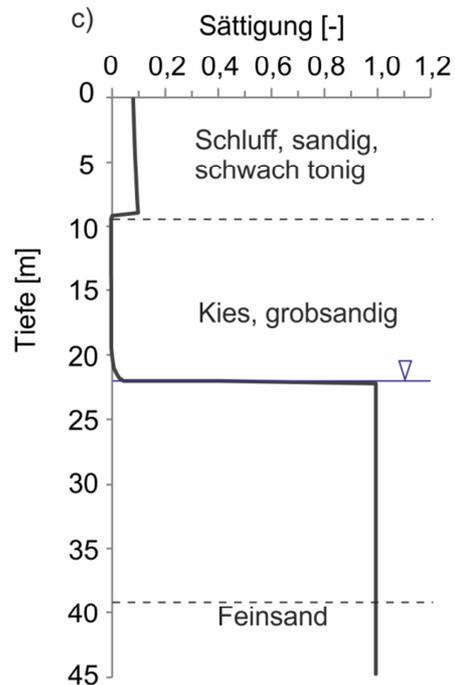


Abbildung 5-2: Untersuchungsgebiet Köln Junkersdorf: a) Lage des Untersuchungsgebietes westlich des Vorfluters Rhein (geändert nach Google Maps, 2016a); b) Geologisches Profil, das bei der Installation von Erdwärmesonden aufgenommen wurde (Stadt Köln, Umwelt- und Verbraucherschutzamt, 2013; Vienken et al., 2015); c) Vertikales Profil der Grundwassersättigung aus Modellsimulationen.

5.3 Durchführung

Ziel der modellbasierten Analyse ist der Vergleich der thermischen Auswirkungen der intensiven oberflächennahen geothermischen Nutzung unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen. Ergänzend zu den in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungen werden verschiedene Grundwasserfließgeschwindigkeiten für die Szenarien mit Voll- und Teilsättigung gegenübergestellt. Thermische Wechselwirkungen zwischen zwei benachbarten Systemen im urbanen Raum werden in Abhängigkeit von verschiedenen Untergrundbedingungen untersucht. Die Untersuchungen gliedern sich in folgende drei Kernpunkte:

- 1) Untersuchung des Einflusses der ungesättigten Zone durch die Gegenüberstellung der Temperaturanomalien unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen ohne Grundwasserströmung, d. h. bei ausschließlich konduktivem Wärmetransport,
- 2) Betrachtung des Einflusses der Advektion auf die Nutzung eines Erdwärmesondensystems unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen bei variierender Grundwasserfließgeschwindigkeit,
- 3) Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen benachbarten geothermischen Systemen in 10 bzw. 20 m Abstand zueinander unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen und verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten.

Die Durchführung basiert auf numerischen Modellen, deren Aufbau und Parametrisierung an die Untergrundverhältnisse im Untersuchungsgebiet in Köln Junkersdorf angelehnt sind. Die Daten zur Parametrisierung des Untergrundes wurden im Rahmen mehrerer Feldkampagnen des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ erhoben. Die Datenerhebung und Auswertung sind dabei nicht Teil der hier vorgestellten Arbeit. Der Aufbau des konzeptionellen Modells und die Parametrisierung des Untergrundes erfolgen anhand der in Tabelle 5-1 zusammengefassten Messdaten und Literaturangaben. Dabei werden drei Schichten aus Geschiebemergel, grobsandigem Kies und Feinsand unterschieden (Abbildung A-2 des Anhangs). Charakteristisch für den Standort ist eine ausgeprägte ungesättigte Zone, die sich bis in die Schicht des grobsandigen Kieses erstreckt. Der gemessene Grundwasserflurabstand liegt bei etwa 22 m Tiefe unter Geländeoberkante (Abbildung 5-2: c).

Tabelle 5-1: Parametrisierung des Untergrundes im Untersuchungsgebiet in Köln Junkersdorf.

	Sandig toniger Schluff	Grobsandiger Kies	Feinsand
Wärmeleitfähigkeit [Wm⁻¹K⁻¹]	1,1 ²⁾	2,0 ²⁾	2,5 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [MJm⁻³K⁻¹]	2,4 ¹⁾	2,4 ¹⁾	2,5 ¹⁾
Hydraulische Leitfähigkeit ³⁾ [ms⁻¹]	8,5E-8	7,0E-4	1,0E-8
Porosität ³⁾ [-]	0,40	0,30	0,37
Van Genuchten-Parameter ⁴⁾ α [cm⁻¹]	0,036	0,145	0,033
Van Genuchten-Parameter ⁴⁾ n [-]	1,56	2,68	1,22

¹⁾ VDI 4640-1 (2010), ²⁾ Messwert, ³⁾ Hölting und Coldewey (2013), ⁴⁾ Simunek et al. (2008)

Für die Simulationen wurde die Finite Elemente Software Feflow mit dem speziell für die Untersuchung von Erdwärmesonden implementierten Tool angewendet (DHI-WASY, 2013; DHI-WASY, 1979 - 2016; Diersch et al., 2011a, 2011b). Die Software repräsentiert den gegenwärtigen Stand der Technik in der Simulation von geothermischen Systemen. Für die Untersuchung realer Systeme erfolgt nach Angaben des Feflow-Supports (MIKE, 2016) die Definition der Erdwärmesonden anhand der Eingabe jährlicher oder monatlicher Heizlasten, die zur Deckung eines vorgegebenen Wärmebedarfes des Gebäudes benötigt werden.

Für die Umsetzung der Analysen werden insgesamt 48 Szenarien definiert, wovon jeweils 24 Szenarien gesättigte und teilgesättigte Bedingungen abbilden (Abbildung 5-3). Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 4 werden ergänzend zum Einfluss der ungesättigten Zone auch variierende Grundwasserfließgeschwindigkeiten untersucht. In acht Stufen erhöht sich die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers von v_1 bis v_8 wie folgt:

- $v_1 = 0 \text{ md}^{-1}$,
- $v_2 = 5\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$,
- $v_3 = 9\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$,
- $v_4 = 1,5\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$,
- $v_5 = 3,1\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$,
- $v_6 = 6,3\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$,
- $v_7 = 10,4\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$ sowie
- $v_8 = 13,6\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$.

Es wird angenommen, dass auf Grund der Flächenversiegelung im urbanen Raum und der gering durchlässigen Deckschicht keine vertikale Strömung in der ungesättigten Zone stattfindet. Um die Intensität der geothermischen Nutzung zu variieren, werden Szenarien mit einem oder zwei identischen Erdwärmesondensystemen untersucht. Die Erdwärme-

sondensysteme wurden in Anlehnung an ein im Wohngebiet real existierendes Erdwärmesondensystem implementiert. Um einen Wärmebedarf von 8,2 kW zu decken, sind fünf Doppel-U-Erdwärmesonden mit je 38 m Tiefe (Gesamtlänge 190 m) installiert. Die Begrenzung der Installationstiefe der Erdwärmesonden auf den oberen Grundwasserleiter erfolgte nach den Vorgaben des Umweltamtes der Stadt Köln. Die jährliche Betriebsdauer des Systems beträgt 2.400 Stunden, sodass eine jährliche Heizlast von 19.680 kWh anzusetzen ist. Die Heizlast verteilt sich auf Grundlage der für die Stadt Düsseldorf (Köln nicht verfügbar) charakteristischen monatlichen Heizgradtage im Jahreszyklus (DWD, 2014). Die Untersuchungen werden nach einer Betriebsdauer des Systems von zehn Jahren ausgewertet. Die ungestörte Untergrundtemperatur und die Temperatur an der Erdoberfläche betragen 11,3 °C.

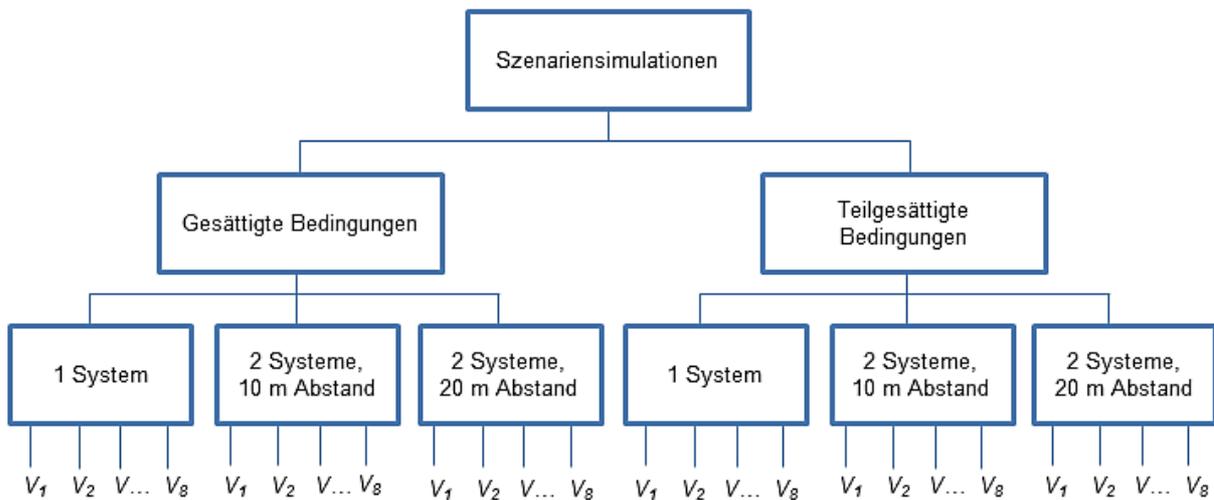


Abbildung 5-3: Übersicht über die analysierten Szenarien mit Variation der Grundwasserfließgeschwindigkeiten von v_1 bis v_8 .

Die Randbedingung der Grundwasserströmung ist für den mit Grundwasser gesättigten Bereich des dreidimensionalen Modells über ein konstantes hydraulisches Potential (Dirichlet-Randbedingung) definiert. Die Strömung ist über die Richards-Gleichung (1931) im Modell implementiert. Die ungesättigte Strömung wird über den Ansatz nach Van Genuchten im Feflow Modell eingebunden (DHI-WASY, 1979 - 2016). Es gelten die Gleichungen 5-1 bis 5-3, wobei die rot markierten Parameter in Abhängigkeit der Sedimente der einzelnen Schichten mit dem Computerprogramm Rosetta abgeschätzt wurden (Schaap et al., 2001; Vergleich Gl. 3-19, Vergleich Kapitel 3.2.2):

$$(Gl. 5-1) \quad s_e = \frac{(s-s_r)}{(s_s-s_r)} = \begin{cases} \left[1 + (-\alpha\psi)^{n_v} \right]^{-3} & , \psi < 0 \\ 1 & , \psi \geq 0 \end{cases}$$

$$(Gl. 5-2) \quad K_r = s_e^{0,5} \left[1 - (1 - s_e^{1/m})^m \right]^2$$

$$(Gl. 5-3) \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

Wobei gilt: s ist die dimensionslose Sättigung, s_r ist die residuale, s_s die maximale und s_e die effektive Sättigung. Ψ ist das Druckpotential in m, K_r ist die dimensionslose relative Leitfähigkeit, und m und n sind dimensionslose Anpassungsparameter. Der Wert für n ist immer größer als eins. α ist ein Anpassungsparameter in m, der einen Wert über Null annimmt (DHI-WASY, 1979 - 2016).

Die Definition der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität der einzelnen Schichten erfolgt in Abhängigkeit von der Porosität der Sedimente. Sie werden wie folgt berechnet (Gl. 5-4 und 5-5; DHI-WASY, 1979 - 2016; DHI-WASY, 2010):

$$(Gl. 5-4) \quad \lambda = n \lambda_f + (1 - n) \lambda_s$$

$$(Gl. 5-5) \quad c = n \rho_f c_f + (1 - n) \rho_s c_s$$

Wobei gilt: n ist die dimensionslose Porosität, λ ist die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, λ_f und λ_s sind die Wärmeleitfähigkeiten des Fluides und der festen Matrix des Untergrundes. $\rho_f c_f$ und $\rho_s c_s$ bilden die spezifischen Wärmekapazitäten der Festphase und des Fluides ab.

5.4 Ergebnisse und Diskussion

5.4.1 Einfluss der Wassersättigung

Der Einfluss der Wassersättigung auf die Ausbreitung von Temperaturanomalien als Folge des oberflächennahen Wärmeentzuges ist im ersten Schritt für ein einzelnes geothermisches System und ohne Einfluss der Grundwasserströmung dargestellt. Als Wärmetransportprozess tritt ausschließlich Konduktion auf, die wesentlich von der Wärmeleitfähigkeit der Untergrundmatrix bestimmt wird. Je höher die Wassersättigung eines Sedimentes ist, desto höher ist die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes.

Im Ergebnis sind die Temperaturanomalien, die für die Szenarien mit Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen resultieren, gegenübergestellt. Die simulierten Temperaturänderungen, die sich am Ende einer fünfjährigen saisonalen Heizaktivität ausbilden, unterscheiden sich für beide Szenarien. Während die minimale Untergrundtemperatur im Nahbereich der Erdwärmesonden unter Vollsättigung $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt

(Abbildung 5-4: a), kühlt sich die Matrix bei Teilsättigung auf Grund der geringeren Wärmeleitfähigkeit im Bereich der ungesättigten Zone auf $1,4\text{ °C}$ ab (Abbildung 5-4: c). Insgesamt ist der Unterschied der minimalen Temperaturen der beiden Szenarien mit einer Differenz von $1,2\text{ K}$ vergleichsweise gering. Die maximale Abkühlung zeigt sich bei beiden Szenarien im Bereich der mittleren Tiefe der geothermisch erschlossenen Mächtigkeit. Der Übergang zwischen der mit Grundwasser gesättigten und ungesättigten Zone ist im Szenario mit Teilsättigung angedeutet. Er wird jedoch durch den Einfluss der Temperatur-Randbedingung an der Erdoberfläche abgeschwächt. Um den Unterschied im geothermischen Potential der gesättigten und ungesättigten Zone zu verdeutlichen, zeigt ein drittes Szenario die Temperaturanomalien ohne Einfluss der Temperatur-Randbedingung (Abbildung 5-4: b). Es wird zudem deutlich, dass der Wärmeeintrag von der Erdoberfläche insbesondere in den oberen 5 bis 10 m unter Geländeoberkante zu einer Erhöhung der minimalen Grundtemperaturen um $0,5\text{ °C}$ beiträgt. Die Temperatur der Erdoberfläche ist daher als Temperatur-Randbedingung in dem Modell nicht zu vernachlässigen.

Auch die Gegenüberstellung der vertikalen Temperaturprofile des Sondenfluides und des Verfüllmaterials bestätigen einen geringen Unterschied zwischen den Szenarien mit Teil- und Vollsättigung. Die mittlere Temperatur des Erdwärmesondenfluides ist unter Teilsättigung $0,7\text{ K}$ geringer als die mittlere Fluidtemperatur unter Vollsättigung (Abbildung 5-5: a). Ein Übergang zwischen dem mit Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bereich ist im Verlauf des Vertikalprofils nicht zu erkennen. Dagegen deutet sich im Vertikalprofil der Temperatur des Verfüllmaterials eine Abstufung zwischen Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Sedimenten an. Die absolute Differenz der mittleren Temperatur des Verfüllmaterials beträgt $0,9\text{ K}$. Im oberen und unteren Randbereich des Verfüllmaterials zeigen sich auch die Einflüsse der Umgebungstemperaturen. In den oberen 5 m unter Geländeoberkante erwärmt sich das Verfüllmaterial durch den Einfluss der vereinfacht als konstant betrachteten Temperatur-Randbedingung an der Erdoberfläche deutlich. In den unteren 2 bis 5 m am Ende der Erdwärmesonden wiederum führt der Wärmezustrom aus den Tiefen unterhalb der Erdwärmesonden zu einem leichten Temperaturanstieg.

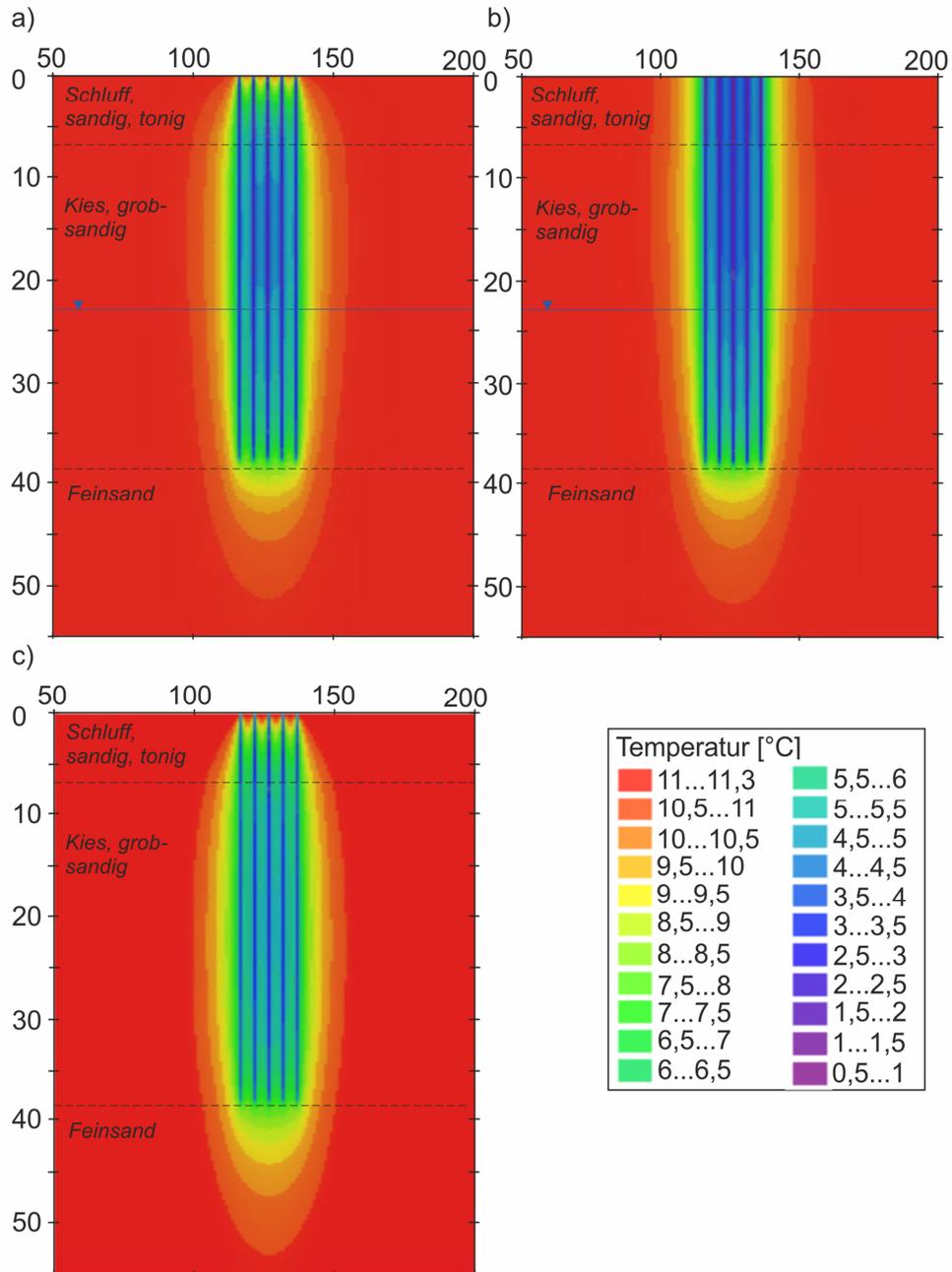


Abbildung 5-4: Vergleich der Temperaturanomalien im vertikalen Schnitt durch den Untergrund im Bereich der installierten Erdwärmesonden am Höhepunkt der fünften Heizperiode (1.825 d bzw. 5 a) bei Grundwasser teilgesättigten Bedingungen a) mit und b) ohne Temperatur-Randbedingung an der Erdoberfläche sowie c) bei vollständiger Grundwassersättigung.

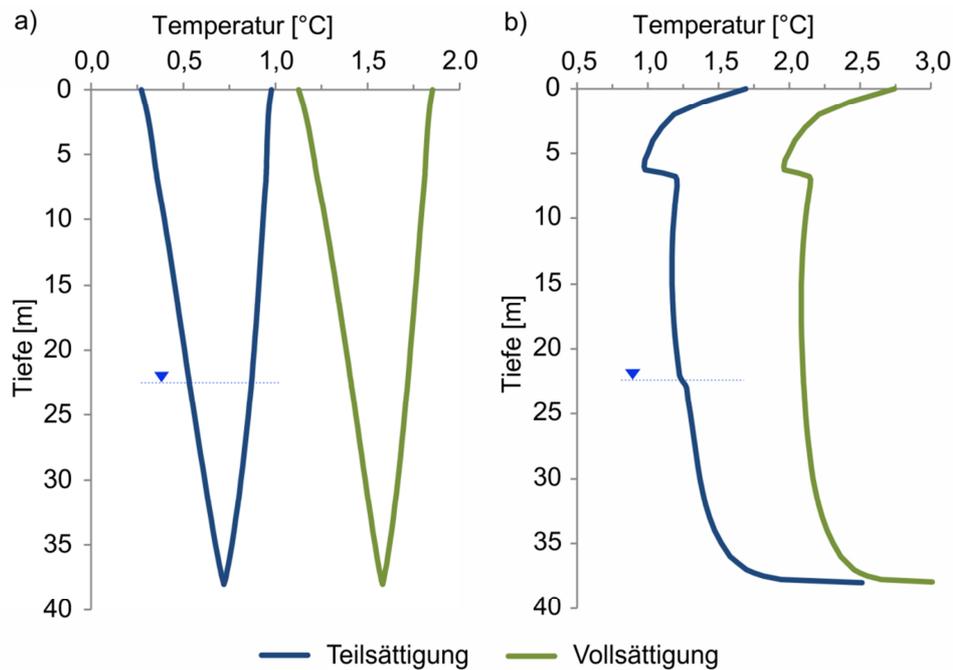


Abbildung 5-5: Vertikales Profil der Temperatur in a) dem Erdwärmesondenfluid und b) dem Verfüllmaterial der Erdwärmesonde unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen am Höhepunkt der fünften Heizperiode (1.825 d bzw. 5 a).

5.4.2 Einfluss der Grundwasserströmung

Im Folgenden sind die Temperaturanomalien im oberflächennahen Untergrund am Ende einer fünfjährigen saisonalen Heizperiode unter variierenden Fließgeschwindigkeiten für Grundwasser gesättigte und teilgesättigte Bedingungen dargestellt. Anders als bei den Szenarien ohne Grundwasserfluss bildet sich bei geringer Grundwasserströmung von $5E-3 \text{ md}^{-1}$ bereits eine deutliche Abgrenzung zwischen gesättigter und ungesättigter Zone (Abbildung 5-6: 1a und 2a). In diesen Szenarien formt sowohl der konduktive als auch der advective Wärmetransport die Geometrie der Temperaturfahnen. Unter Vollsättigung entwickelt sich eine nahezu gleichmäßige Abkühlung entlang der Erdwärmesonde (Abbildung 5-6: 2a bis 2c). Die minimalen Untergrundtemperaturen der Szenarien mit vollständig Grundwasser gesättigtem Untergrund liegen je nach Grundwasserfließgeschwindigkeit zwischen 5,0 und 9,2 °C im Geschiebemergel und zwischen 5,7 und 10,7 °C im sandigen Kies (Tabelle 5-2). Dagegen resultiert der Wärmeentzug unter teilgesättigten Bedingungen in einer stärkeren Abkühlung, die sich auf den ungesättigten Bereich konzentriert. Hier liegen die minimalen Untergrundtemperaturen je nach Grundwasserfließgeschwindigkeit im Bereich von 4,8 und 7,9 °C im Geschiebemergel sowie 5,2 und 8,2 °C im sandigen Kies (Abbildung 5-6: 1a bis 1c, Tabelle 5-2).

In Übereinstimmung mit den in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungen gilt für die Szenarienanalysen: Je stärker die Grundwasserströmung ist, desto geringer sind die

Temperaturänderungen im Untergrund. Einhergehend mit dem wachsenden Einfluss der Advektion auf die Untergrundtemperatur erhöht sich mit zunehmender Fließgeschwindigkeit der Unterschied zwischen den Minimaltemperaturen in der Grundwasser gesättigten und ungesättigten Zone (ΔT_{gz-uz} ; Tabelle 5-2). Bei Fließgeschwindigkeiten von $5E-3 \text{ md}^{-1}$ kühlt sich der sandige Kies unter Teilsättigung etwa 0,5 K stärker ab als unter Vollsättigung. Erhöht sich die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers auf $0,136 \text{ md}^{-1}$, verfünffacht sich die Differenz zwischen ungesättigten und teilgesättigten Bedingungen auf eine Temperaturdifferenz von 2,5 K. In dem Szenario mit Grundwassersättigung und maximaler Fließgeschwindigkeit sind die Temperaturänderungen unter vollständig Grundwasser gesättigten Bedingungen so gering, dass nahezu keine Kältefahne mehr erfasst wird (Abbildung 5-6: 2c).

Tabelle 5-2: Simulierte minimale Untergrundtemperaturen T_{min} im sandigen Schluff (Schicht 1) und im sandigen Kies (Schicht 2) unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen sowie Differenzen der minimalen Untergrundtemperaturen der Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen ΔT_{gz-uz} bei verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten am Höhepunkt der fünften Heizperiode.

Schicht	Szenario	$v \text{ [md}^{-1}\text{]}$	$T_{min} \text{ [}^\circ\text{C]}$		$\Delta T_{gz-uz} \text{ [K]}$
			Teilsättigung	Vollsättigung	
1	A1	5,0E-3	4,84	5,02	0,18
	B1	3,1E-2	6,58	8,03	1,45
	C1	13,6E-2	7,92	9,19	1,27
2	A1	5,0E-3	5,21	5,71	0,50
	B1	3,1E-2	6,87	9,22	2,35
	C1	13,6E-2	8,16	10,67	2,51

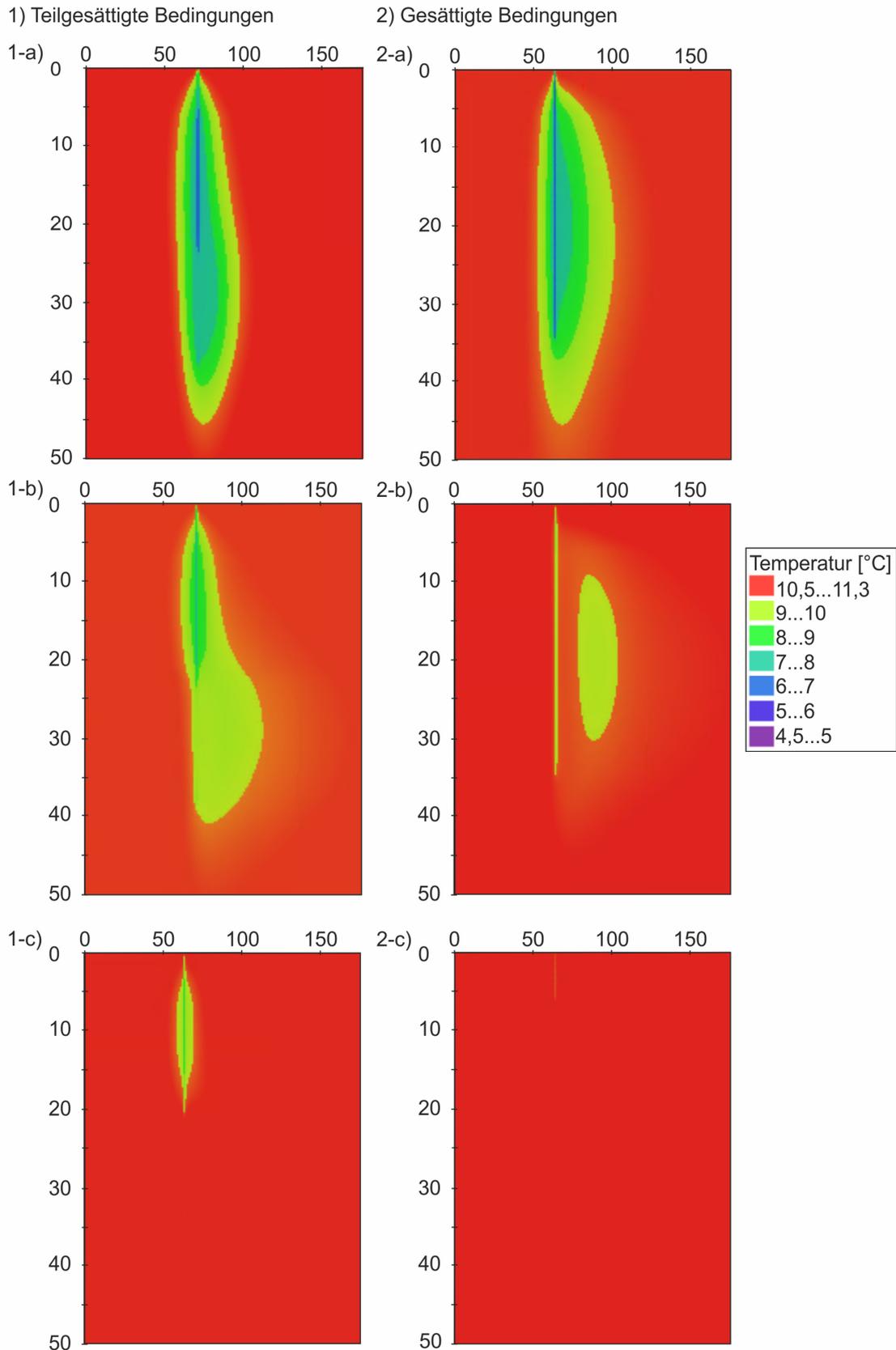


Abbildung 5-6: Vergleich der Temperaturanomalien im vertikalen Schnitt durch den Untergrund im Bereich der installierten Erdwärmesonden und entlang der Grundwasserfließrichtung bei 1) Grundwasser teilgesättigten und 2) vollständig gesättigten Bedingungen am Höhepunkt der fünften Heizperiode (1.825 d bzw. 5 a) bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von a) $5E-3 \text{ md}^{-1}$, b) $3,1E-2 \text{ md}^{-1}$ und c) $13,6E-2 \text{ md}^{-1}$.

Die Ergebnisse der Szenarienanalysen verdeutlichen, dass die erhöhten Grundwasserfließgeschwindigkeiten in geringeren Abkühlungen im oberflächennahen Untergrund resultieren. Dieser Trend spiegelt sich auch in den mittleren Temperaturen des Erdwärmesondenfluides wider. Je größer die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers ist, desto höher ist die mittlere Fluidtemperatur im Inneren der Erdwärmesonde (Abbildung 5-7). Der Unterschied zwischen Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen nimmt dabei mit steigender Fließgeschwindigkeit zu.

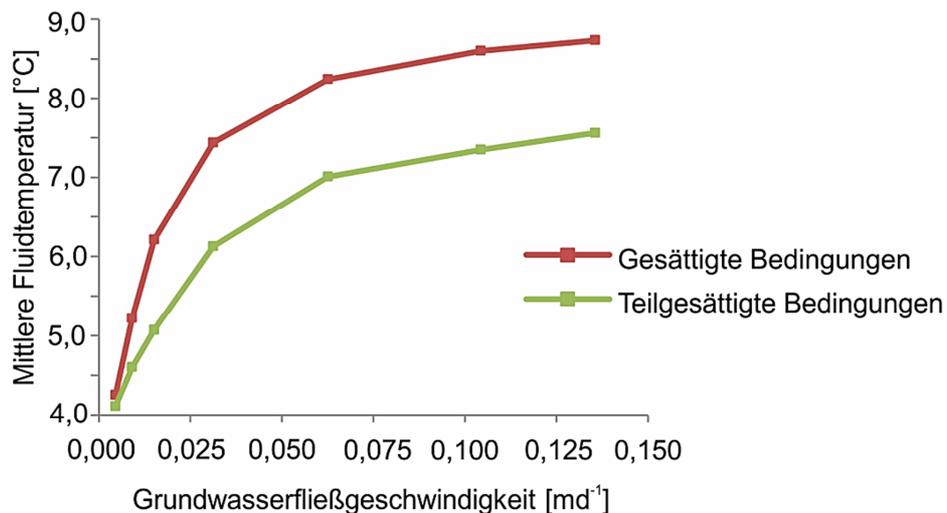


Abbildung 5-7: Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die mittlere Temperatur des Erdwärmesondenfluides unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen.

Vergleicht man die vertikalen Temperaturprofile der Wärmeträgermedien im Inneren der Erdwärmesonden, hebt sich das Szenario mit den besten Wärmetransportbedingungen, d. h. Grundwassersättigung und maximale Fließgeschwindigkeit, hervor. Bei der maximalen Fließgeschwindigkeit von $0,136 \text{ md}^{-1}$ ist die Vorlauftemperatur des Fluides, das aus der Erdwärmesonde zum Wärmetauscher der Wärmepumpe strömt, unter Grundwassersättigung mit $9,1 \text{ °C}$ um $1,2 \text{ K}$ höher als unter Teilsättigung (Abbildung 5-8). Dagegen ist der Unterschied der Vorlauftemperaturen zwischen den Szenarien mit Grundwasser gesättigtem und teilgesättigtem Bedingungen bei einer geringeren Fließgeschwindigkeit des Grundwassers im Grundwasserleiter von $5\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$ mit $0,2 \text{ K}$ minimal.

Trotz der Unterschiede in den induzierten Temperaturänderungen der untersuchten Szenarien sind die Differenzen zwischen Vor- und Rücklauftemperatur der Erdwärmesonden mit etwa $0,9 \text{ K}$ vergleichbar. Folglich liegen auch die für die Szenarien angegebenen thermischen Entzugsleistungen in der gleichen Größenordnung und werden im Modell unabhängig von den Untergrundbedingungen angewendet. Grund dafür ist die Art der in Feflow implementierten Randbedingung für das Erdwärmesondensystem. Die

Energie, die zur Deckung der eingegebenen jährlichen Heizlasten der Gebäude benötigt wird, kann unabhängig von den definierten Untergrundparametern aus dem Untergrund entnommen. Das geothermische Potential kann dabei nicht direkt quantifiziert, sondern vielmehr abgeschätzt werden (Vergleich Kapitel 4). Je geringer die induzierten Temperaturänderungen sind, desto höher ist das geothermische Potential des Untergrundes. Bei identischem Energieentzug wird mehr Energie nachgeliefert, sodass sich das entstandene Defizit ausgleicht.

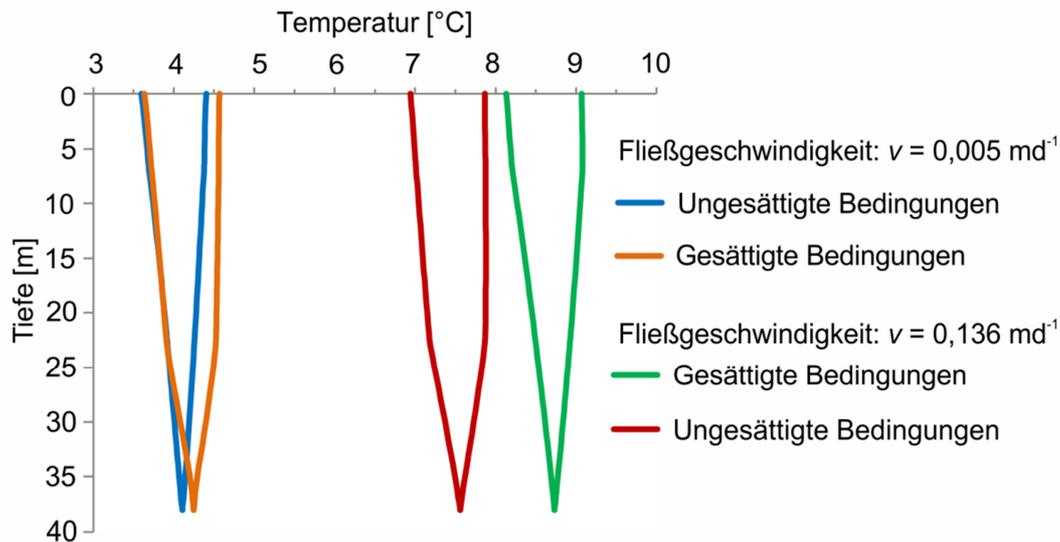


Abbildung 5-8: Vertikale Profile der Temperatur des Erdwärmesondenfluides im Inneren der Sonde bei Voll- und Teilsättigung des Untergrundes und Grundwasserfließgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter von $5\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$ sowie $13,6\text{E-}2 \text{ md}^{-1}$.

Die Gegenüberstellung der Temperaturanomalien, die sich unter Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen ausbilden, verdeutlicht den Einfluss relevanter Wärmetransportparameter auf die geothermische Untergrundnutzung. Nicht nur die Bedeutung der Grundwasserströmung wird bestärkt, auch die Mächtigkeit der ungesättigten Zone ist ein wichtiger Parameter, der bei der Planung oberflächennaher geothermischer Systeme Berücksichtigung finden muss. Wie bereits in Kapitel 4 dargestellt, erhöht der advective Wärmetransport das geothermische Potential eines Standortes, da mit der Grundwasserströmung stetig Energie nachgeliefert wird. Folglich stellt das Szenario mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten und vollständiger Grundwassersättigung das vergleichsweise größte Energiepotential für den Wärmeentzug durch Erdwärmesonden bereit. Dagegen ist bei teilgesättigten Bedingungen und geringer Grundwasserströmung weniger Energie zur geothermischen Nutzung verfügbar. Eine Vernachlässigung der ungesättigten Zone führt insbesondere bei geringen bis mittleren Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu einer Überschätzung des geothermischen Potentials eines Standortes und damit zu einer Unterschätzung der induzierten Temperaturänderungen. Folglich wird auch das Risiko von

Frost-Tau-Wechseln im Nahbereich der Erdwärmesonde, die vor allem im ungesättigten Bereich mit vergleichsweise schlechten Wärmetransportbedingungen auftreten können, nicht berücksichtigt.

5.4.3 Thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen

Sind die Erdwärmesonden zweier oberflächennaher geothermischer Systeme entlang der Grundwasserströmung angeordnet, wie in den folgenden Szenarien untersucht wird, ist unabhängig von der Grundwasserfließgeschwindigkeit eine Überlagerung der Temperaturfahnen festzustellen. Auch bei einer Verdopplung des Abstandes zwischen den installierten Systemen von 10 auf 20 m treten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemen auf, die aus jeweils fünf senkrecht zur Grundwasserströmung installierten Erdwärmesonden bestehen (Tabelle 5-3, Abbildung 5-10). Zu erkennen sind diese Wechselwirkungen an den niedrigeren minimalen Untergrundtemperaturen bei der Nutzung zweier benachbarter geothermischer Systeme im Vergleich zu der Nutzung eines einzelnen Systems. Durch die Überlagerung der Temperaturfahnen liegen die Minimaltemperaturen am Ende der fünften Heizperiode bei Teilsättigung je nach Grundwasserfließgeschwindigkeit zwischen 0,2 und 2,2 K unterhalb der minimalen Temperatur, die sich bei der Nutzung eines einfachen Systems ausbilden (Tabelle 5-3). Die größte Temperaturdifferenz bildet sich unter den Untergrundbedingungen mit dem geringsten geothermischen Potential, d. h. bei Teilsättigung, bei rein konduktivem Wärmetransport und bei einem Systemabstand von 10 m. Dieser Abstand von 10 m entspricht dem in der VDI 4640 -1 (2010) vorgegebenen Mindestabstand zwischen zwei benachbarten Systemen. Die Erweiterung des Abstandes von 10 auf 20 m führt ohne Grundwasserströmung zu einer um 1,4 K (Teilsättigung) bzw. 0,8 K (Vollsättigung) geringeren Abkühlung als bei 10 m Abstand (Tabelle 5-3, Abbildung 5-9).

Mit zunehmender Grundwasserfließgeschwindigkeit minimiert sich der Unterschied zwischen den Szenarien mit 10 und 20 m Abstand. Durch die Grundwasserströmung wird die Ausbreitung und Intensität der Temperaturfahne beeinflusst. Die zusätzliche Abkühlung durch die Nutzung eines zweiten benachbarten Systems beträgt bei einem Installationsabstand von 10 bzw. 20 m etwa 0,6 K (Teilsättigung) bzw. 0,2 K (Vollsättigung; Tabelle 5-3, Abbildung 5-9). Je höher die Grundwasserfließgeschwindigkeit ist, desto geringer ist die zusätzliche Abkühlung, die durch das zweite geothermische System hervorgerufen wird (Abbildung 5-9). Das Fazit aus Kapitel 4, wonach das geringste Risiko für thermische Interaktionen zwischen benachbarten Erdwärmesonden bei maximaler Grundwasserströmung auftritt, wird dabei bestätigt. Durch den advektiven Wärmetransport mischt sich das

thermisch beeinflusste Grundwasser stärker mit dem unbeeinflussten Grundwasser, sodass die induzierte Temperaturänderung begrenzt ist. Zudem verringert sich die Kontaktzeit zwischen der Erdwärmesonde und dem an ihr vorbeiströmenden Grundwasser, sodass gleichen Volumenanteilen weniger Energie pro Zeiteinheit entzogen werden kann. Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass die Mischung neben der Verringerung der absoluten Temperaturänderung auch zu einer Erhöhung des thermisch beeinflussten Volumens im Untergrund führt.

Im Ergebnis der Szenarienanalysen wird zudem deutlich, dass durch die Ausbreitung der Temperaturanomalie unter rein konduktivem Wärmetransport das Umfeld der Erdwärmesonden so stark beeinflusst wird, dass Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen nicht ausgeschlossen werden können. Auf Grund der vergleichsweise langsamen thermischen Regeneration des Untergrundes konzentriert sich die Abkühlung auf die Grundwasser ungesättigte Zone.

Tabelle 5-3: Simulierte minimale Untergrundtemperaturen T_{min} im Grundwasserleiter nach fünf Jahren saisonalem Heizen bei verschiedenen Grundwasserfließgeschwindigkeiten (v) und unter Nutzung von einem oder zwei geothermischen Systemen in 10 bzw. 20 m Abstand.

Sze- nario	v [md^{-1}]	T_{min} [°C]					
		Teilsättigung			Vollsättigung		
		1 System	2 Systeme 10 m	2 Systeme 20 m	1 System	2 Systeme 10 m	2 Systeme 20 m
A0	0	2,76	0,53	1,94	3,98	2,32	3,10
A1	5E-3	5,21	2,34	2,62	5,71	3,51	3,90
A2	9E-3	5,51	2,82	3,26	6,86	4,80	4,89
B0	1,5E-2	5,94	3,54	3,95	7,74	6,03	5,75
B1	3,1E-2	6,87	5,11	5,25	9,22	8,11	8,01
B2	6,3E-2	7,66	6,55	6,55	10,10	9,62	9,62
C0	10,4E-2	7,87	7,13	7,28	10,51	10,23	10,26
C1	13,6E-2	8,16	7,54	7,57	10,67	10,46	10,50

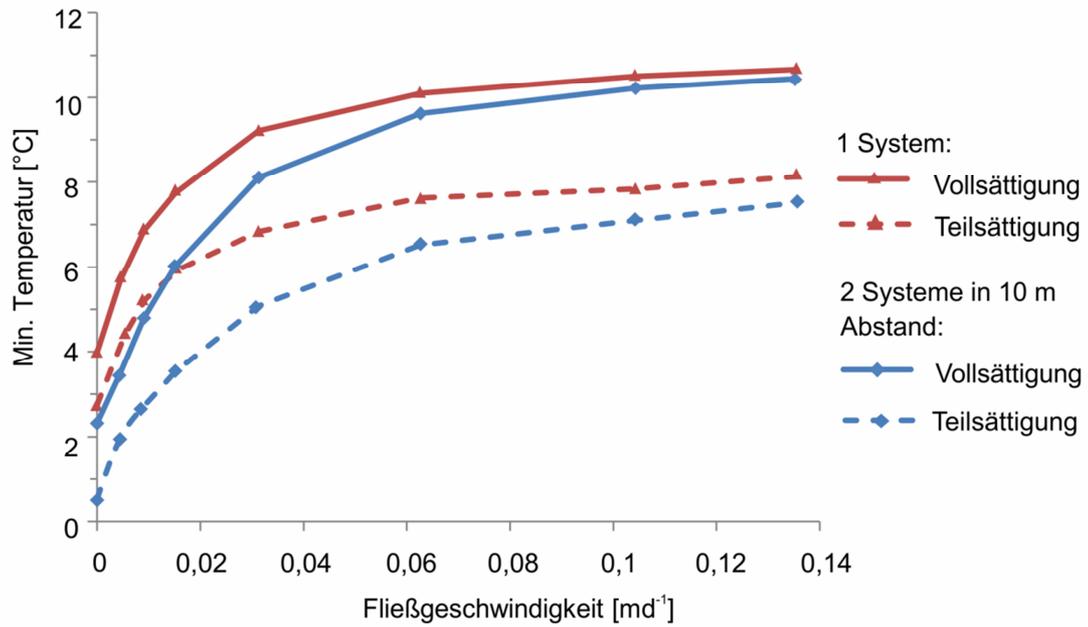


Abbildung 5-9: Zusammenhang zwischen der minimalen Untergrundtemperatur und der Grundwasserfließgeschwindigkeit am Ende der fünften Heizperiode bei der Nutzung von einem und zwei oberflächennahen geothermischen Systemen aus jeweils fünf Erdwärmesonden bei variierender Grundwasserfließgeschwindigkeit.

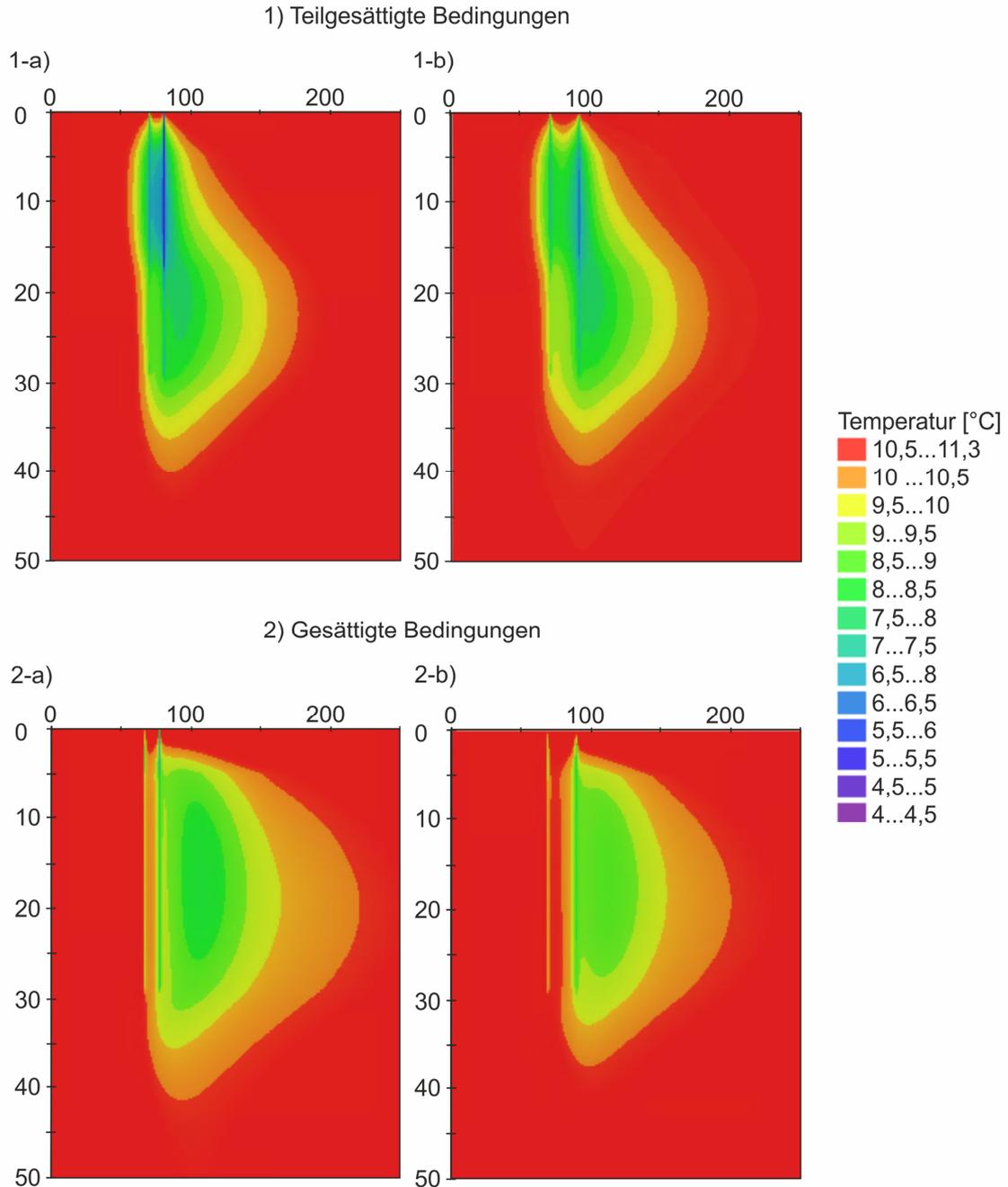


Abbildung 5-10: Vergleich der Temperaturanomalien im vertikalen Schnitt durch den Untergrund im Bereich von zwei installierten Erdwärmesondensystemen mit je fünf Erdwärmesonden in a) 10 m Abstand und b) 20 m Abstand entlang der Grundwasserfließrichtung bei 1) Grundwasser teilgesättigten und 2) vollständig Grundwasser gesättigten Bedingungen am Ende der zehnten Heizperiode (3.390 d bzw. 9,3 a) bei Grundwasserfließgeschwindigkeiten von $0,031 \text{ m d}^{-1}$.

5.5 Schlussfolgerung und Ausblick

Wie in der VDI 4640-1 (2010) anhand der thermischen Entzugsleistungen für gesättigte und trockene Sedimente zu erkennen ist, ist das oberflächennahe geothermische Potential eines Standortes entscheidend von den lokalen Untergrundbedingungen abhängig. Neben der Grundwasserströmung (Vergleich Kapitel 4) spielt insbesondere bei flachen Erdwärmesonden auch die Ausprägung der ungesättigten Zone eine entscheidende Rolle. Ihr Einfluss auf das geothermische Potential ist dabei umso deutlicher, je stärker die Grundwasserströmung an einem Standort ist.

Als ein Maß für das geothermische Potential eines Standortes kann beispielsweise die minimale Untergrundtemperatur in Folge des geothermischen Wärmeentzuges, die sich im Umfeld der Erdwärmesonde ausgebildet hat, betrachtet werden. Je geringer die Minimaltemperatur bei sonst gleichen Randbedingungen ist, desto kleiner ist das geothermische Potential eines Standortes. Bei rein konduktivem Wärmetransport unterscheiden sich die Minimaltemperaturen des Untergrundes bei Grundwasser gesättigten und teilgesättigten Bedingungen nur geringfügig um 1,2 K. Demnach ist der Einfluss der ungesättigten Zone auf das geothermische Potential vergleichsweise gering. Betrachtet man im Rahmen der Planung eines geothermischen Systems Standorte, bei denen der Anteil der ungesättigten Zone an der geothermisch erschlossenen Mächtigkeit minimal ist, ist anzunehmen, dass der Einfluss der Wassersättigung vernachlässigbar gering ist. Diese Annahme liegt auch dem in der Praxis üblichen Planungstool Earth Energy Designer zu Grunde, weshalb die ungesättigte Zone nicht in den Modellen abgebildet wird (Buildingphysics, 2008; Eskilson, 1987).

Mit zunehmendem Einfluss der Grundwasserströmung steigt der Unterschied zwischen den Minimaltemperaturen der Grundwasser ungesättigten und gesättigten Szenarien auf bis zu 2,5 K an. Auch die Temperaturprofile des Erdwärmesondenfluides zeigen eine deutliche Abhängigkeit von dem advektiven Wärmetransport. Bei hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten und Vollsättigung sind die Abkühlungen am geringsten. Es ergibt sich die vergleichsweise beste Systemeffizienz. Der Temperaturunterschied zwischen dem Wärmeträgermedium, das von dem Wärmepumpenkreislauf in die Erdwärmesonde strömt, und der Untergrundtemperatur ist am höchsten. Dieser Einfluss wird bei Annahme vereinfachter Untergrundbedingungen für die Planung geothermischer Systeme in der Regel nicht berücksichtigt. Für Standorte, wie das in Köln Junkersdorf exemplarisch untersuchte Wohngebiet, mit einem vergleichsweise hohen Anteil der ungesättigten Zone an der geothermisch erschlossenen Mächtigkeit ist daher die Anwendung von Tools wie dem Earth Energy Designer nicht geeignet. Das bestätigt sich auch in der Anwendung des in Kapitel 4 vorgestellten Ansatzes zur Bewertung des Einflusses der Advektion. Mit einer

mittleren Péclet Zahl des Untergrundes im Kölner Wohngebiet von 3,2 wird der Standort der Klasse 2 zugeordnet. Damit ist sowohl der konduktive als auch advective Wärmetransport bei der Planung der geothermischen Nutzung des Untergrundes relevant. Bezogen auf die Bewertung des standortspezifischen geothermischen Potentials ist der Standort in Köln Junkersdorf vergleichsweise kompliziert. Im Gegensatz zu den Grundwasserleitern, die je nach Fließgeschwindigkeit thermische Entzugsleistungen (berechnet nach Gl. 4-4) zwischen 24 Wm^{-1} (für $v_2 = 5\text{E-}3 \text{ md}^{-1}$) und 56 Wm^{-1} (für $v_3 = 13,6\text{e-}2 \text{ md}^{-1}$) aufweisen, zeigt die ungesättigte Zone ein noch geringeres Potential. Da sich in ihr die maximale Abkühlung zeigt, stellt sie für die Prüfung der genehmigungsrechtlich vorgeschriebenen maximalen Temperaturänderungen die relevante Schicht dar. Oberflächennahe geothermische Systeme sollten daher statt auf der Basis vereinfachter Softwaretools anhand numerischer Modelle geplant und an die standortspezifischen Bedingungen angepasst werden. So können auch an Standorten mit vergleichsweise hoher Mächtigkeit der ungesättigten Zone ein optimiertes Systemdesign und eine belastbare Vorhersage induzierter Temperaturanomalien erfolgen.

Wie die Untersuchung der einzelnen Systeme unter verschiedenen Untergrundbedingungen zeigen, sind die induzierten Temperaturanomalien im ungesättigten Bereich (bei gleichem Energieentzug) stärker ausgeprägt als in den mit Grundwasser gesättigten Schichten. Bedingt durch die verglichen mit dem advectiven Wärmetransport langsamer ablaufende Konduktion charakterisiert die ungesättigte Zone ein geringeres thermisches Regenerationspotential. Daher birgt sie ein höheres Risiko für eine unerwünschte intensive Abkühlung des Untergrundes. Breiten sich diese Abkühlungsbereiche durch konduktiven Wärmetransport bis zu benachbarten Systemen aus, sind die Folgen der Überlagerung der Temperaturfahnen vergleichsweise stark. Eine Überlagerung der Temperaturanomalien kann unter Annahme der Mindestabstände von 10 bis 20 Metern zwischen den Erdwärmesondensystemen unabhängig von der Fließgeschwindigkeit im Grundwasserleiter nicht sicher ausgeschlossen werden. In den Szenarien, in denen sich die Temperaturfahnen entlang der Grundwasserfließrichtung bis zu dem stromabwärts installierten System ausdehnen, verschlechtern sich die Randbedingungen für den geothermischen Wärmeentzug durch das zweite System. Die Ausgangstemperatur des Untergrundes für den geothermischen Wärmeentzug und damit auch die in Form von Wärme im Untergrund gespeicherte Energie an diesem stromabwärts gelegenen System sind geringer als an dem Standort der oberstromig platzierten Systems.

Aus den Ergebnissen der Szenarienanalysen ist abzuleiten, dass die genehmigungsrechtlich vorgeschriebenen Mindestabstände zwischen benachbarten Systemen nicht ausreichen, um einer wechselseitigen thermischen Beeinflussung vorzubeugen. Für die

Sicherstellung einer nachhaltigen und effizienten thermischen Untergrundbewirtschaftung sollten daher folgende zwei Aspekte bei einer intensiven geothermischen Nutzung berücksichtigt werden:

- 1) Die Mindestabstände zwischen benachbarten Erdwärmesondensystemen sollten auf Basis numerischer Simulationen an die standortspezifischen Untergrundbedingungen angepasst werden. Dabei sind insbesondere die Ausprägung der ungesättigten Zone zur Bewertung der zu erwartenden maximalen Temperaturänderungen sowie der Grundwasserfließgeschwindigkeit und Fließrichtung im Modell anhand standortspezifischer Messdaten abzubilden.
- 2) Die Ausbreitung der Temperaturfahnen über die Grundstücksgrenzen hinaus geht mit genehmigungsrechtlichen Schwierigkeiten einher (vergleiche Kapitel 3). Folglich sollte zur Überwindung der Probleme, die mit einer grundstücksbasierten Planung einzelner geothermischer Systeme einhergehen, ein Wechsel der Betrachtungsskala erfolgen. Statt individueller Planungen sollten gerade bei einer intensiven thermischen Untergrundnutzung im urbanen Raum grundstücksunabhängige Erschließungskonzepte Anwendung finden, die andere geothermische Systeme sowie andere Untergrundnutzungen berücksichtigen (Vergleiche Kapitel 7).

Wie bereits in Kapitel 4 diskutiert, belegen die Ergebnisse der Szenarienanalyse, dass die Anwendung der vereinfachten Planungstools nicht in jedem Fall geeignet ist, um die mitunter komplexen Standortbedingungen in das Systemdesign einzubeziehen. Allerdings stellt auch die Anwendung von dreidimensionalen numerischen Modellen zumindest bei der Planung kleinerer geothermischer Systeme aus Zeit- und Kostengründen nicht in jedem Fall eine Alternative zu den in der Praxis üblichen Tools dar. Daher bedarf es der Entwicklung neuer Planungstools zum Design geothermischer Systeme unter Beachtung der Grundwasserdynamik und der ungesättigten Zone. Die Erhebung hochaufgelöster Daten real existierender geothermischer Systeme kann dabei einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung derartiger Tools leisten.

6 Die Bedeutung einer standortspezifischen Untergrund- erkundung für die optimierte thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes – eine Fallstudie

6.1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten formte die anhaltende Verstädterung Europas das Bild einer überwiegend urban geprägten Landschaft. Im Jahr 2014 lebten etwa 359 Millionen Menschen, 72 % der gesamten EU-Bevölkerung, in Großstädten, Kleinstädten oder Vororten (European Commission, 2014). Zeitgleich stieg der Bedarf an Wohnquartieren mit vergleichsweise geringer Bebauungsdichte, sodass die beanspruchte Fläche ungleich stärker zunahm als das urbane Bevölkerungswachstum. Als Folge wächst bis heute der Druck auf die Nutzung der Ressourcen wie Land, Grundwasser und Energie.

In Zusammenhang mit diesem Urbanisierungstrend hat sich die thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes im Neubausektor als geeignete Alternative zu den konventionellen Energieträgern wie Kohle, Erdgas und Erdöl bewiesen. Beispielsweise können Boden und Grundwasser zur Wärme- bzw. Kältebereitstellung oder Wärmespeicherung genutzt werden (Bauer et al., 2013; Bayer et al., 2012; Huenges et al., 2013; Sanner et al., 2003, Vergleich Kapitel 3). Daraus resultiert gerade in neu erschlossenen oder sanierten Wohngebieten oft eine erhöhte Dichte an thermischen Untergrundnutzungen, die mit anderen thermischen oder nicht-thermischen Untergrundnutzungen konkurrieren können. Diese Konkurrenz zwischen benachbarten Systemen steht im Widerspruch zur Gesetzeslage in Europa. Demnach sind geothermische Systeme nur genehmigungsfähig, wenn ihre thermischen Auswirkungen auf Grundwasser und Boden (wie beispielsweise die Ausbreitung von Kältefahnen als Folge des Wärmeentzuges) die Grundstücksgrenzen nicht überschreiten (Hähnlein et al., 2013). Auf Grundlage dieser grundstücksbezogenen Genehmigungspraxis werden auch die Vorerkundung und Planung von geothermischen Systemen nur mit Bezug zum jeweiligen Grundstück umgesetzt. Daraus resultierend wurde eine Vielzahl von Erdwärmesondenanlagen in geringem Abstand voneinander, teilweise Dekametern oder weniger, installiert. Auch wenn von diesen intensiv geothermisch genutzten Flächen potentiell ein höheres Risiko für thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen ausgehen kann, bietet sich zeitgleich die Option, die thermische Untergrundnutzung grundstücksübergreifend zu koordinieren. Damit verbunden besteht die Möglichkeit, eine in Bezug auf den Gesamtpreis des Systems finanzierbare standortspezifische Vorerkundung des Untergrundes umzusetzen.

Im Rahmen dieser Studie wird gezeigt, welchen Vorteil eine grundstücksübergreifende Vorerkundung zur standortspezifischen Untergrundparametrisierung gegenüber der in der Praxis üblichen vereinfachten und grundstücksbezogenen Parametrisierung bietet. Dabei finden insbesondere die Bedingungen der intensiven thermischen Nutzung im urbanen Raum Beachtung. Eine individuelle Untergrunderkundung übersteigt in der Regel die finanziellen Möglichkeiten eines einzelnen Grundstücksinhabers, sodass vereinfacht auf die verfügbaren Informationen aus Karten, Literaturangaben und Bohrdatenbanken zurückgegriffen werden muss. Potentielle Folgen dieser vereinfachten Untergrundcharakterisierung sind erhöhte Investitions- und Betriebskosten durch über- oder unterdimensionierten Systemen, die den benötigten Wärme- bzw. Kältebedarf nicht decken können.

Als typisches Beispiel wurde im Rahmen dieser Studie ein städtisches Wohngebiet mit mehreren Einfamilienhäusern untersucht, das in der Stadt Taucha im Nordosten Leipzigs geplant wurde. Zur Charakterisierung aller relevanten Strömungs- und Wärmetransportparameter wurden auf dem Gebiet umfangreiche Erkundungsuntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser standortspezifischen Parametrisierung werden im Folgenden dem vereinfachten Vorgehen der Untergrundparametrisierung verglichen. Die vereinfachte Parametrisierung beinhaltet die Bestimmung der relevanten Untergrundbedingungen anhand von geologischen oder geothermischen Karten, Bohrdatenbanken und Literaturangaben. Konkret werden folgende zwei Szenarien zur Planung von geothermischen Systemen gegenübergestellt:

- 1) Planung eines geothermischen Systems auf Grundlage der vereinfachten Parametrisierung,
- 2) Planung eines geothermischen Systems auf Grundlage einer standortspezifischen Vorerkundung des Untergrundes zur Charakterisierung relevanter Strömungs- und Wärmetransportparameter.

Für beide Szenarien wird der Einfluss der Untergrundparametrisierung auf zwei Kernpunkte gezeigt. Der erste Kernpunkt fokussiert das Systemdesign. Dabei werden die berechneten thermischen Entzugsleistungen und Installationslängen der Erdwärmesonde zur Versorgung eines typischen Einfamilienhauses mit einem Heizbedarf von 10 kW betrachtet. Bei einer Jahresarbeitszahl von 4,5 werden etwa 7,8 kW aus dem Untergrund entzogen. Der zweite Kernpunkt thematisiert die Vorhersage der langfristig induzierten Umweltauswirkungen. Dafür werden die in Modellsimulationen ermittelten Temperatur-anomalien im Untergrund der zwei Parametrisierungsszenarien gegenübergestellt.

6.2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist ein neu erschlossenes städtisches Wohngebiet in der Stadt Taucha, Sachsen. Auf einer Fläche von 4,5 ha bietet es Platz für die Errichtung von 53 Einfamilienhäusern (Abbildung 6-1: 1). Dieses Untersuchungsgebiet wurde gewählt, da die Nutzung oberflächennaher Geothermie als eine Option zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser bereits im Bebauungsplan erwähnt wurde. Außerdem war das Gebiet bis zur geplanten Wohngebietserschließung eine Brachfläche und wurde als Parkplatz für die benachbarten Kleingartensiedlungen genutzt. Daher kann eine anthropogene Beeinflussung der Untergrundtemperaturen ausgeschlossen und der Einfluss möglicher städtischer Wärmeinseln hier vernachlässigt werden. Alle durchgeführten Vor-Ort-Untersuchungen wurden zeitgleich mit der Erschließung der Infrastruktur durch den Grundstücksentwickler in der Zeit von Juni bis August 2013 durchgeführt.

Die im Folgenden dargestellten Informationen über die regionale Geologie stammen aus:

- geologischen Karten der glazial geprägten Landschaft Sachsens (Deutschland) im Maßstab 1:50.000 (LfULG, 1996),
- Bohrprofilen bereits abgeteuffer Bohrungen aus der Bohrdatenbank des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG, 2014),
- Literatur über die regionale Geologie (Eissmann, 1975; Pälchen und Walter, 2008) sowie
- standortspezifischen Messungen, die im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden.

Im oberflächennahen Bereich besteht der Untergrund aus quartären Sedimenten mit wechselnd gelagerten Schichten aus Tonen, Sanden und Kiesen der Grundmoräne und den glaziofluvialen Einheiten der Saale-Eiszeit. Darauf folgend schließt sich eine Schicht aus Rhyolith an, die über eine Quarz und Ton dominierte Verwitterungsschicht (Tertiär) vom Quartär getrennt ist (Eissmann, 1975; LfULG, 2014; Abbildung 6-1: 2). In der Region des Untersuchungsgebietes ist diese eiszeitlich geprägte Landschaft durch eine lokale Variabilität der Schichtmächtigkeiten charakterisiert. Für eine potentielle geothermische Nutzung kann diese Variabilität mitunter zu einer erhöhten Unsicherheit bei der Bewertung des geothermischen Potentials führen, da das Potential wesentlich von den Wärmetransporteigenschaften der erschlossenen Schichten abhängt. Grundsätzlich sind die quartären Sedimente des Untersuchungsgebietes als Zielhorizonte für eine potentielle geothermische Nutzung am Standort zu bewerten. Weitere Details zu den gegebenen Untergrundeigenschaften sind im Abschnitt 6.4 dargestellt.

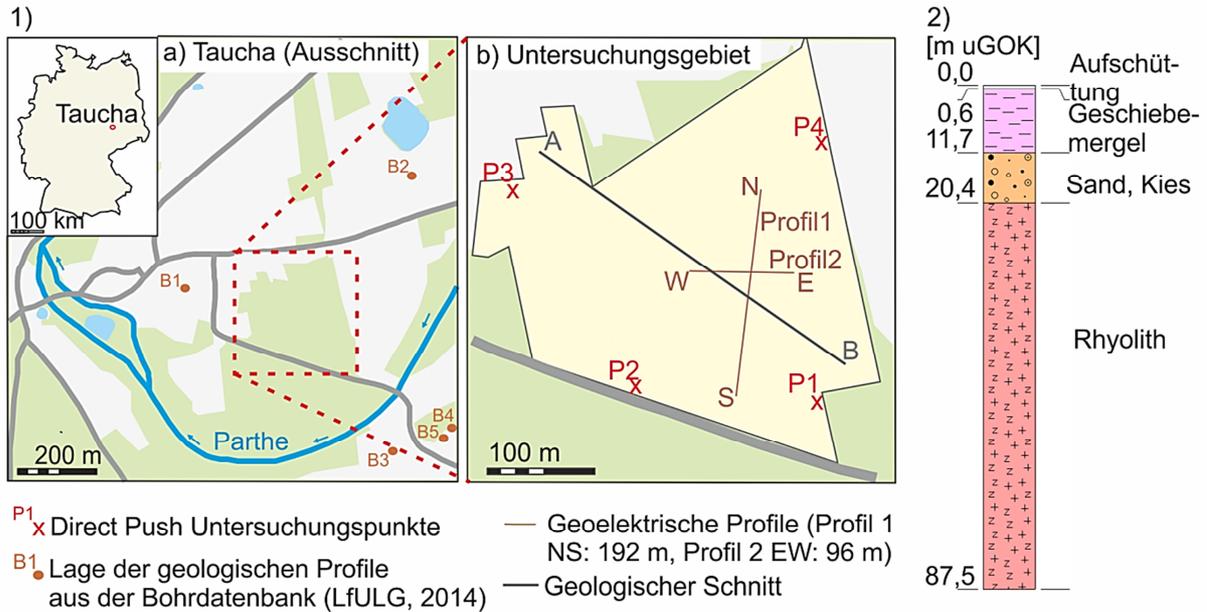


Abbildung 6-1: Untersuchungsgebiet: 1a) Lage des Wohngebietes in der Stadt Taucha und Lage der Bohrpunkte B1 bis B5 der Bohrdatenbank des LfULG (2014), 1b) Detailansicht mit Lage der Ansatzpunkte der Direct Push Sondierungen, geoelektrischen Profile und des geologischen Schnittes aus Abbildung 6-3 (geändert nach Google Maps, 2016b); 2) Geologisches Profil abgeleitet aus den Ergebnissen der standortspezifischen Messungen und den Einträgen der Bohrdatenbank des LfULG (2014).

6.3 Parametrisierung des Untergrundes

Die Charakterisierung und Parametrisierung der (hydro-) geologischen Untergrundbedingungen ist notwendig, um die thermischen Entzugsleistungen sowie die mögliche Ausdehnung induzierter Temperaturanomalien zu bewerten. Die zur Beschreibung der konduktiven Wärmetransportprozesse relevanten Parameter sind die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität (Di Sipio et al., 2013; Vandenbohede et al., 2011). Zur Charakterisierung des advektiven Wärmetransportes muss zusätzlich die Grundwasserfließgeschwindigkeit bekannt sein (Lo Russo et al., 2012; Pannike et al., 2006, Vergleich Kapitel 4). Wärmetransportprozesse in der ungesättigten Zone, wie beispielsweise der Wärmeeintrag durch infiltrierendes Regenwasser, werden in dieser Studie auf Grund der lateralen Ausdehnung der Deckschicht aus geringdurchlässigem Geschiebemergel vernachlässigt. Um den Einfluss von Advektion und Konduktion am Wärmetransport im Untergrund zu bewerten, müssen die für die geothermische Erschließung relevanten Schichtmächtigkeiten bekannt sein. Insbesondere die Mächtigkeit des Grundwasserleiters und der ungesättigten Zone sind im Rahmen einer standortspezifischen Vorerkundung zu bestimmen. Wie die Untersuchungsergebnisse der Kapitel 4 und 5 belegen, unterscheiden sich gerade Grundwasser durchströmte und ungesättigte Sedimente stark in ihren thermischen Entzugsleistungen. Nur auf Grundlage der lokalen Schichtmächtigkeiten kann

die verfügbare thermische Energie zuverlässig bewertet und geothermische Systeme nachhaltig geplant werden. Des Weiteren muss die initiale Grundwassertemperatur bekannt sein, um die absoluten Temperaturänderungen im Untergrund gegenüber der natürlichen und unbeeinflussten Untergrundtemperatur zu bestimmen. Im Folgenden werden die Methoden vorgestellt, die zur Umsetzung der vereinfachten und der standortspezifischen Untergrundparametrisierung im Untersuchungsgebiet in Taucha angewendet wurden.

6.3.1 Vereinfachte Parametrisierung

In der Regel wird der vereinfachte Ansatz der Untergrundparametrisierung zur Planung und Dimensionierung von geothermischen Systemen mit Heizleistungen unter 30 kW angewendet (Hähnlein et al., 2011; VDI 4640-1, 2010). Der Begriff vereinfachte Parametrisierung bezeichnet im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen die Charakterisierung des Untergrundes anhand von geologischen und geothermischen Karten, Einträgen aus Bohrdatenbanken sowie Literaturwerten. Die zu erwartende Untergrundstruktur wird anhand der Einträge aus Bohrdatenbanken sowie (hydro-) geologischer und geothermischer Karten bewertet. Letztere wurden auf Grundlage geologischer Karten im Maßstab 1:50.000 erstellt und geben einen Überblick über die zu erwartenden geothermischen Entzugsleistungen in 40 m, 70 m, 100 m bzw. 130 m Tiefe. Fünf Bohrprofile, die für die Umgebung des Standortes aus der Datenbank des LfULG (2014) verfügbar sind, sind in Abbildung A-1 und A-2 im Anhang dargestellt. Informationen über den Grundwasserflurabstand sind in diesen Bohrprofilen nicht gegeben. Allerdings stellt das LfULG eine interaktive Online-Karte zur Verfügung, die Grundwasserflurabstände darstellt (GeoSN, 2015, Vergleich Kapitel 5). Anhand dieser Karten kann die absolute Tiefe und lokale Variabilität der Mächtigkeit der ungesättigten Zone sowie die Grundwasserfließrichtung abgeschätzt werden. Auf Grundlage der Bohrprofile werden die lokalen geologischen Bedingungen abgeleitet. Jeder stratigraphischen Einheit werden die entsprechenden Wärmetransportparameter, d. h. Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten, hydraulische Leitfähigkeiten und absolute Porositäten zugeordnet. Diese Werte entstammen verschiedenen Literaturangaben wie beispielsweise der nationalen Richtlinie VDI 4640-1 (2010) zur thermischen Nutzung des Untergrundes.

6.3.2 Standortspezifische Parametrisierung

Die standortspezifische Parametrisierung des Untergrundes basiert auf drei aufeinanderfolgenden Punkten:

- 1) Charakterisierung der Untergrundstruktur,
- 2) Bestimmung relevanter hydraulischer Parameter und
- 3) Messung relevanter thermo-physikalischer Parameter.

Um diese drei Punkte im Untersuchungsgebiet in Taucha umzusetzen, wurden im Rahmen des angewendeten Erkundungsansatzes nicht-invasive geophysikalische mit minimal-invasiven Direct Push Technologien kombiniert (u. a. Hoffmann et al., 2008; Vienken et al., 2014 und Werban und Leven 2007). Diese Kombination, die auch als MOSAIC-Ansatz (Model-Driven Site Assessment, Information and Control) bezeichnet wird, wurde ursprünglich für die Erkundung kontaminierter Standorte entwickelt. Vienken et al. (2014) zeigen am Beispiel der Erkundung eines Altarms in einer Flussaue, wie durch die Kombination von nicht-invasiven und minimal-invasiven Messungen heterogene Strukturen identifiziert und gezielt erkundet werden können. Dieser Ansatz kann für verschiedene (hydro-) geologische Fragestellungen wie für die geothermische Vorerkundung adaptiert werden (Vienken et al., 2015).

Ein entscheidender Vorteil von nicht-invasiven und minimal-invasiven Methoden ist die Anpassung des Untersuchungsumfangs an die lokale Komplexität der Untergrundstruktur. Werden im Rahmen der geophysikalischen Messungen Unregelmäßigkeiten in der Struktur des Untergrundes deutlich, werden diese gezielt mittels Punktmessungen untersucht. Zeigen die geophysikalischen Messungen dagegen eine für natürliche Systeme gleichmäßige Schichtung, reduziert sich die Zahl der Ansatzpunkte für Bohrungen oder Sondierungen. Somit passen sich auch die Erkundungskosten an die Komplexität des Standortes an. Wo genau das Optimum zwischen der mindestens notwendigen Anzahl an Bohrungen liegt, ist nicht pauschal festzulegen. Es hängt sowohl von der Komplexität des Untergrundes als auch der Verfügbarkeit von Bohrdaten ab. Grundsätzlich erlauben größere Gebiete umfangreichere Erkundungsuntersuchungen, da sich die Kosten der standortspezifischen Erkundung auf die Zahl der Grundstücke im Wohngebiet verteilt (Vergleich Kapitel 7.3).

Da diese Studie die Untersuchung des oberflächennahen Untergrundes fokussiert, eignen sich die Direct Push Technologien für die Untergrunderkundung. Dabei ist ihre Anwendung auf unverdichtete bzw. schwach verdichtete Sedimente, deren Schichtmächtigkeit je nach Standort mehrere Dekameter betragen kann, begrenzt. Für oberflächennahe geothermische Systeme, die diese Tiefen überschreiten, muss die Anwendung der Direct Push Technologien durch Erkundungsmethoden mit höheren Eindringtiefen erweitert oder substituiert werden. Alternative Methoden sind beispielsweise Erkundungsbohrungen, brunnenbasierte Messungen wie Pumpversuche oder Thermal Response Tests bzw. Enhanced Thermal Response Tests (u. a. Heidinger et al., 2004; Luo et al., 2015). Eine Zusammenfassung geeigneter Erkundungsmethoden enthält Tabelle A-2 im Anhang.

Charakterisierung der Untergrundstruktur

Um Informationen über die allgemeine Struktur des Untergrundes im Untersuchungsgebiet zu erhalten, wurde die Methode der elektrischen Widerstandstomographie an zwei rechtwinklig zueinander gelegenen Profilen angewendet. Das Profil mit Nord-Süd-Ausdehnung erstreckt sich über eine Länge von 192 m, und das Profil mit Ost-West-Ausdehnung zeigt eine Länge von über 96 m (Abbildung 6-1: 1b). Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich mit zunehmender Länge bzw. Anzahl der geoelektrischen Profile die Aussagefähigkeit der Messungen verbessert. Da in Taucha parallel zu der Durchführung der Erkundungsuntersuchungen auch die Erschließung der Infrastruktur für die geplante Wohnbebauung erfolgte, war die Messung eines weiteren geoelektrischen Profils bzw. die Verschiebung der Profile in den westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes nicht möglich. Für eine hohe vertikale Auflösung wurde die Wenner- α -Elektronenkonfiguration mit gleichmäßigem Abstand zwischen Spannungs- und Potentialelektroden gewählt. Die Inversion der gemessenen scheinbaren Widerstände der Pseudo-Sektion erfolgte unter Anwendung des Softwaretools BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography: Günther et al., 2006). Ausführliche Informationen zur elektrischen Widerstandstomographie sind beispielsweise in Knödel et al. (1997), Militzer und Weber (1985) sowie Telford (2010) gegeben.

Da die Auswertung der geophysikalischen Messungen in einer gleichmäßigen Verteilung der oberflächennahen Schichten des Untergrundes resultiert, wurde die Zahl der Ansatzpunkte für die Direct Push Sondierungen mit maximalem Abstand zueinander am Rand des Untersuchungsgebietes angeordnet (Abbildung 6-1: 1b). Diese Anordnung ist zudem geeignet, um den hydraulischen Gradienten und die Grundwasserfließrichtung des Untersuchungsgebietes zu bestimmen.

Generell wird bei Direct Push Sondierungen ein Stahlhohlgestänge mit geringem Durchmesser in den Untergrund gedrückt und/oder gehämmert. Während des Vortriebes messen verschiedene Sensoren am tiefsten Ende des Gestänges kontinuierlich oder semikontinuierlich vertikal hochaufgelöste Profile verschiedener (hydro-) geologischer, geophysikalischer, geochemischer oder auch geotechnischer Zielparameter (Butler, 2005; Butler et al., 2002b; Dietrich und Leven, 2006; McCall et al., 2006). Insgesamt wurden im Randbereich des Untersuchungsgebietes vier Ansatzpunkte für die im Folgenden erläuterten Direkt Push Untersuchungen festgelegt (Abbildung 6-1: 1b). An diesen Ansatzpunkten wurden nach Durchführung der entsprechenden Untersuchungen temporäre Direct Push Grundwassermessstellen installiert. Die Messstellen reichen in Tiefen von 19,1 bis 23,3 m unter Geländeoberkante und haben einen Filterinnendurchmesser von 20 mm und eine Filterlänge von 1,06 m.

Um die Schichtübergänge im Untergrund des Untersuchungsgebietes zu bestimmen, wurden drei Vertikalprofile der elektrischen Leitfähigkeit (Direct Push Electrical Conductivity Logs) bis zu einer Tiefe von 19,3 bzw. 23,4 m gemessen (P1 bis P3; Abbildung 6-1: 1b).

Das Direct Push Electrical Conductivity Logging dient der Messung von vertikalen Profilen der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes. An diesen Profilen können die Lage und die Mächtigkeit der Grundwasser gering durchlässiger oder Grundwasser stauender Schichten bestimmt werden. Dabei werden Ton bzw. Schluff dominierte Schichten, die unter nicht-salinaren Bedingungen durch erhöhte elektrische Leitfähigkeiten auf Grund des erhöhten Anteils an Tonmineralen gekennzeichnet sind, identifiziert. Während ein Sensor mit vier gleichmäßig angeordneten Elektroden in den Untergrund gedrückt wird, induzieren die zwei äußeren Elektroden einen elektrischen Strom. Die zwei inneren Elektroden messen die daraus resultierende Spannung. Weiterführende Informationen zu dieser Messmethode sind in Beck et al. (2000), Butler et al. (2002b), Christy et al. (1994) und Schulmeister et al. (2003) aufgeführt.

Bestimmung der hydraulischen Untergrundparameter

Zur Bestimmung vertikaler Profile der relativen hydraulischen Durchlässigkeit wurden im Tauchaer Untersuchungsgebiet Direct Push Injection Logs gemessen. Die Sondierungen an den Punkten P2, P3 und P4 (Abbildung 6-1: 1b) erreichten eine Endteufe von 19,5 bzw. 22,0 m unter Geländeoberkante. Ziel der Messung war die Charakterisierung von Schichten mit verschiedenen hydraulischen Durchlässigkeiten. Die Messung erfolgt semi-kontinuierlich, wobei das Stahlhohlgestänge mit dem Sensor am Kopf des Gestänges zur Erfassung der Messwerte in definierten Tiefenintervallen stoppt (hier 0,5 m). Beim Messvorgang wird über einen Filter am Kopf des Gestänges Wasser in den Untergrund eingebracht und zeitgleich die Injektionsrate sowie der Injektionsdruck gemessen. Der Quotient aus Injektionsdruck und Injektionsrate beschreibt den Injektionswiderstand. Das Reziproke aus diesem Widerstand und dem Rohrwiderstand ergibt die relative hydraulische Leitfähigkeit als Maßstab für den Durchlässigkeitsbeiwert K . Weitere Details zu dieser Messmethode sowie eine Beschreibung der entsprechenden Datenanalysen sind in Dietrich et al. (2008) zu finden.

Zur Ermittlung absoluter hydraulischer Leitfähigkeiten in spezifischen Tiefenintervallen wird der Direct Push Slug Test angewendet. Die angestrebten Tiefenintervalle mit abweichender Sedimentzusammensetzung wurden vorab mit dem Direct Push Electrical Conductivity Logging und dem Direct Push Injection Logging identifiziert. Das detaillierte Vorgehen bei der Installation der Messstellen ist in McCall et al. (2006) und Sellwood et al. (2005) erläutert. Mit einer pneumatischen Slug Test Messapparatur wird in dem Brunnen ein vorbe-

stimmter Druck aufgebaut, der mit der Zeit zu einer stationären Absenkung des Wasserspiegels führt. Anschließend wird der Druck schlagartig aus der Messstelle entlassen, sodass sich die initiale Wasserspiegelhöhe in der Messstelle wieder einstellt. Die Aufzeichnung des Wiederanstieges der Wassersäule erfolgt über einen Druckaufnehmer. Die Messdaten werden nach den Vorgaben von Butler und Garnett (2000) sowie Zlotnik und McGuire (1998) analysiert. Butler (2002a) berücksichtigt dabei den Einfluss von Direct Push Messstellen mit geringem Durchmesser. Um die von Butler (1997) vorgegebenen Qualitätsrichtlinien umzusetzen, wurden in jeder Messtiefe sechs Messungen für drei verschiedene Druckstufen (20, 40 und 60 mbar) durchgeführt (insgesamt 18 Einzelmessungen je Tiefenintervall). Die erste Messung erfolgte in größter Tiefe. Für die darauffolgenden Messungen wurde das Gestänge mit der Messapparatur in die entsprechende Zieltiefe hochgezogen. Jeder Messwert repräsentiert einen Integral über die Filterlänge von 1,06 m bestimmten Wert, wodurch an jeder Messstelle eine hohe vertikale Auflösung bei vergleichsweise geringem horizontalen Einflussradius (z. B. gegenüber eines Pumpversuches) erreicht wird. Diese hochaufgelöste Messung bildet die natürliche Schwankungsbreite des Zielparameters ab und ermöglicht eine für diese Studie relevante Bewertung der zu erwartenden Heterogenität des Parameters.

Ergänzend zu der Bestimmung vertikaler Schichtübergänge können mit der Direct Push Technologie auch Bodenproben entnommen und temporäre oder permanente Grundwassermonitoringbrunnen installiert werden. Die vier im Randbereich des Untersuchungsgebietes installierten temporären Direct Push Grundwassermessstellen wurden zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und des hydraulischen Gradienten genutzt. Über einen zweimonatigen Zeitraum von Juli bis August 2013 wurden die Grundwasserflurabstände mit einem Kabellichtlot gemessenen (Standard Logger mit automatischer Datenaufzeichnung waren auf Grund des geringen Innendurchmessers der Messstellen nicht anwendbar). Insgesamt wurden bis zu 12 Stichtagsmessungen (nicht in allen Grundwassermessstellen war zu jedem Zeitpunkt eine Messung möglich) im Abstand von drei bis vier Tagen durchgeführt, um Messungenauigkeiten in der Anwendung des Lichtlots und kurzfristige Grundwasserschwankungen zu berücksichtigen.

Bestimmung der thermo-physikalischen Untergrundeigenschaften

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Schlüsselparameter für das Design von oberflächennahen geothermischen Systemen, da sie den konduktiven Wärmetransport im Untergrund beeinflusst (Eskilson, 1987). Durch kleinskalige Heterogenität in der Untergrundstruktur und den Einfluss des advektiven Wärmetransportes können die Wärmetransporteigenschaften lokal variieren. Erhöhte Grundwasserfließgeschwindigkeiten beeinflussen die Messung von Thermal Response Tests und können mitunter zur Überschätzung der thermischen Ent-

zugleistungen des Untergrundes führen (Raymond et al., 2011; Vergleich Kapitel 3.1.4). Thermal Response Tests liefern Wärmeleitfähigkeiten, die integral über die gesamte Bohrtiefe gemittelte Werte repräsentieren. In dieser Studie wurden, abweichend von den in der Praxis üblichen Methoden, standortspezifische und tiefenorientierte Bodenproben mit dem Direct Push Soil Sampling Tool entnommen, um die lokale, tiefenorientierte Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten zu bestimmen. Drei Zielhorizonte wurden am Punkt P3 untersucht, um durch die Bodenansprache ein Standardprofil abzuleiten und die aus der Literatur bekannten Informationen zu den zu erwartenden Schichten zu erweitern (Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2). Die Messung der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Bodenproben erfolgte mit einem Handmessgerät (KD2Pro: Decagon Devices, 2011), das über eine Nadel Wärme in die Probe injiziert und die resultierenden Temperaturen misst. Zum Zeitpunkt der Messung befinden sich die Bodenproben in vorgefertigten Plastikrohren mit einer Länge von 12,0 cm und einem Durchmesser von 4,2 cm. Um den Einfluss des Wassergehaltes auf die Wärmeleitfähigkeiten zu bestimmen, wurden die Bodenproben sowohl unter wassergesättigten und trockenen Bedingungen (24 h bei 105 °C im Trockenofen) als auch unter geringer und hoher Verdichtung untersucht. Da eine Entnahme völlig ungestörter Proben in der Regel nicht möglich ist, wurden die Bodenproben in den Versuchen unter variierender Verdichtung (lockerste und dichteste Lagerung) durchgeführt. Die lockerste Lagerung repräsentiert die geringste betrachtete Verdichtung und entspricht der Schüttdichte, die aus dem Einfüllen des Sediments in den Probetrichter resultiert. Die dichteste Lagerung stellt die höchste untersuchte Verdichtung dar und wird durch die zehnfach wiederholte Verdichtung mit einem Fallgewicht aus 2 bzw. 4 cm Höhe auf den Probezylinder erreicht (Vergleich DIN 18126). Da mit dem Direct Push Soil Sampling Tool keine Proben der verhärteten Festgesteinsschicht bzw. dessen Verwitterungsschicht entnommen werden konnten, basieren die für diese Tiefenabschnitte angenommenen Wärmeleitfähigkeiten auf Literaturangaben.

Eine Alternative zu der dargestellten Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten ist die Durchführung eines Thermal Response Tests. Allerdings ist das Ergebnis dieses in-situ Tests von der Grundwasserströmung, der Konvektion im Bohrloch sowie des Einbaus der Erdwärmesonde abhängig (Lage der Sonde im Bohrloch, Qualität des Verfüllmaterials u. ä.). Zudem resultiert die Messung in einem integral über die Tiefe des Bohrlochs bestimmten Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes (z. B. in Gehlin, 2002). Um die Spannbreite der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten abzubilden und den Einfluss der Advektion auszuschließen, wurden in der hier vorgestellten Studie Labormessungen durchgeführt. Die Variabilität, die aus der Entnahme der gestörten Proben

resultiert, wird durch die Variation der Lagerungsdichte und des Wassergehaltes berücksichtigt.

Im gleichen Messrhythmus wie die Messung der Grundwasserflurabstände erfolgte die Bestimmung der Grundwassertemperaturen. Dafür wurden in den vier Direct Push Messstellen Temperaturmessketten mit PT100 Temperatursensoren (16 Sensoren im Abstand von 0,5 m) installiert. Nach Erreichen der stationären Bedingungen (Ausgleich der Grundwassertemperatur) wurden die Grundwassertemperaturen bestimmt. Auch wenn der Messzeitraum auf Grund der zeitlich begrenzten Zugänglichkeit des Untersuchungsgebietes vergleichsweise kurz war, sind mögliche anthropogene Beeinflussungen der Untergrundtemperatur auszuschließen.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Vereinfachte Parametrisierung

Die geologische Karte der eiszeitlich geprägten Landschaft in Sachsen (LfULG, 1996) zeigt die regionalen geologischen Bedingungen im Maßstab 1:50.000, die auf Grund ihrer räumlichen Auflösung stark in ihrer standortspezifischen Aussagekraft eingeschränkt sind. Lokale, grundstücksbezogene Informationen zum Aufbau des Untergrundes sind in den Einträgen der Bohrdatenbank des LfULG (2014) mit etwa 36 Bohrprofilen im Umfeld von 1,4 km² um das Untersuchungsgebiet in Taucha verfügbar. Von den 36 verfügbaren Profilen sind drei Bohrungen tiefer als 17 m und zwei Bohrungen überschreiten eine Tiefe von 70 m. Diese zwei tieferen Bohrungen liegen in einem Abstand von etwa 500 m nordöstlich bzw. 700 m nordwestlich des Untersuchungsgebietes und erreichen Zieltiefen von 76 m bzw. 80 m unter Geländeoberkante. Die Lage der Bohrungen der Datenbank des LfULG zeigt Abbildung 6-1:a. Die geologischen Profile sind in Abbildung A-1 und A-2 des Anhangs dargestellt. Je nach Zweck der in der Datenbank eingetragenen Bohrprofile können diese sehr in Informationsgehalt und Verfügbarkeit (insbesondere für größere Tiefen) variieren. Zur Charakterisierung des Untersuchungsgebietes wird auf Grund fehlender standortspezifischer Daten angenommen, dass die etwa 500 bis 700 m vom Untersuchungsgebiet entfernten Profile die standortspezifischen Gegebenheiten abbilden. Die (hydro-) stratigraphischen Schichten können wie folgt unterteilt werden: Die oberste Schicht repräsentiert den Geschiebemergel, die zweite Schicht besteht aus Sand und Kies, und die dritte Schicht setzt sich aus Rhyolith (bzw. dessen tertiären Verwitterungen) zusammen. Die Unsicherheit in der Parametrisierung der Schichtmächtigkeiten, die aus der Übertragung der Daten der etwa 500 bis 700 m vom Untersuchungsgebiet entfernten Bohrungen resultiert, ist schwer einzuschätzen und muss bei der Ermittlung der benötigten

Installationslängen in Form eines Sicherheitszuschlages berücksichtigt werden. Auf Grundlage der in Abbildung A-1 und A-2 im Anhang dargestellten Profile ergibt sich eine Mächtigkeit des Geschiebemergels zwischen 0 (B1) und 12 m (B3 und B5). Die Mächtigkeit der Grundwasser leitenden Schicht liegt zwischen 5 m (B3) und 33 m (B1). Welche genauen Schichtmächtigkeiten insbesondere für den Grundwasserleiter und die ungesättigte Zone im Untersuchungsgebiet anzusetzen sind, ist daher ohne standortspezifische Messungen nicht festzulegen. Folglich ist die Bewertung des Einflusses der Advektion in der Grundwasser leitenden Schicht auf die thermische Untergrundnutzung nicht möglich.

Zur Charakterisierung der Grundwasserströmungs- und Wärmetransportbedingungen der drei im Untersuchungsgebiet identifizierten Schichten werden bei der vereinfachten Parametrisierung zur Planung von kleineren geothermischen Systemen (unter 30 kW) Literaturangaben recherchiert. Um die natürliche Parametervariabilität zu berücksichtigen, sind in Tabelle 6-2 maximale und minimale Werte angegeben, die die Sedimente der jeweiligen Schicht charakterisieren.

Die Unsicherheit in der Bestimmung der standortspezifischen Untergrundbedingungen wird insbesondere bei der Recherche der Grundwasserflurabstände in der interaktiven Online-Karte des LfULG (GeoSN, 2015) deutlich (Vergleich Kapitel 5). Die Grundwasserflurabstände variieren im Untersuchungsgebiet um bis zu 16 m. Während in dem Gebiet nahe des Flusses Parthe minimale Grundwasserflurabstände ausgewiesen sind (kleiner als 4 m unter Geländeoberkante), nehmen die Abstände in Richtung Norden auf Werte von 10 bis 20 m zu (GeoSN, 2015). Daher kann der Grundwasserflurabstand auf Grundlage der verfügbaren Karte abgeschätzt und nicht eindeutig bestimmt werden. In den Gebieten mit minimalem Grundwasserflurabstand, in denen das Grundwasser bis in die oberste Schicht des Geschiebemergels reicht, wird von gespannten Grundwasserbedingungen ausgegangen. Anhand der in der Online-Karte des LfULG gegebenen Grundwasserhöhen kann eine Grundwasserfließrichtung im Untersuchungsgebiet von Nordost nach Süd/Südwest angenommen werden (GeoSN, 2015). Ohne Angabe eines hydraulischen Gradienten ist es jedoch nicht möglich, eine Grundwasserfließgeschwindigkeit für das Untersuchungsgebiet abzuschätzen, sodass der Einfluss der Advektion bei der Dimensionierung der Erdwärmesonden nicht bewertet werden kann (Vergleich Kapitel 4).

Zusätzlich sind keine Informationen über die Mächtigkeit, den Grad der Verwitterung oder die sekundäre Porosität der Rhyolith-Schicht verfügbar. Daher werden zur Charakterisierung Literaturangaben für geklüftete vulkanische Gesteine herangezogen (Diao et al., 2004; Müller et al., 2008; VDI 4640-1, 2010).

6.4.2 Standortspezifische Parametrisierung

Die standortspezifische Parametrisierung basiert auf der Kombination von nicht-invasiven geophysikalischen Methoden mit minimal-invasiven Vertikalmessungen (hier Direct Push Sondierungen). Anders als die vereinfachte Parametrisierung ermöglicht sie die Zuordnung absoluter Schichtmächtigkeiten und die Beurteilung der lokalen Variabilität des Schichtaufbaus im Untersuchungsgebiet. Die Auswertung der elektrischen Widerstandstomographie dient im ersten Schritt der Identifizierung möglicher Ungleichmäßigkeiten im Schichtaufbau des Untergrundes, die bei der weiteren Erkundung gegebenenfalls zu berücksichtigen sind. Die elektrische Widerstandstomographie resultiert in einem gleichmäßigen Aufbau der drei im oberflächennahen Untergrund vorkommenden Schichten (Abbildung 6-2). Daher mussten bei der Festlegung der Ansatzpunkte der Direct Push Untersuchungen keine Unregelmäßigkeiten im Schichtaufbau, wie sie beispielsweise Vienken et al. (2014) untersuchten, berücksichtigt werden. Ergänzend hätten noch weitere geophysikalische Profile im westlichen und mittleren Bereich des Wohngebietes gemessen werden können, um die Übertragbarkeit der Daten auf das gesamte Wohngebiet zu erweitern. Allerdings war dieser Teil der Fläche wegen der parallel durchgeführten Infrastrukturerschließung für die geplante Wohnbebauung zum Zeitpunkt der Untersuchungskampagne nicht zugänglich. So wurde auf Basis der Ergebnisse der zwei geoelektrischen Profile von einer gleichmäßigen Untergrundstruktur ausgegangen und vier Ansatzpunkte für die Direct Push Untersuchungen am Rand des geplanten Wohngebietes festgelegt.

Die Charakterisierung des Drei-Schicht-Systems erfolgt durch die Auswertung der Direct Push Electrical Conductivity Logs und den direkten Vergleich mit den geophysikalischen Profilen (Abbildung 6-2: a bis c). Die oberste Schicht mit 9 bis 12 m Mächtigkeit ist durch geringe elektrische Widerstände bzw. hohe elektrische Leitfähigkeiten charakterisiert, wie sie für tonige Sedimente typisch sind (hier Geschiebemergel; Abbildung 6-1: 2). Im Gegensatz dazu zeigt die darunter liegende Schicht mit einer Tiefe von bis zu 22 m hohe elektrische Widerstände und geringe elektrische Leitfähigkeiten, die auf nicht-bindige Sedimente wie Sand und Kies hindeuten. Die Basis der untersuchten sedimentären Abfolge bildet ein Rhyolith und dessen Verwitterungshorizont. Die Eindringtiefe der elektrischen Widerstandstomographie reicht nicht aus, um die Endtiefe der dritten Schicht aus Rhyolith und dessen Verwitterungsprodukten vollständig abzubilden. Anhand der Einträge der Bohrdatenbanken, deren Auswertung ebenfalls Teil des standortspezifischen Ansatzes ist, wird eine Endtiefe von schätzungsweise 76 bis 95 m unter Geländeoberkante angenommen. Es ist darauf hinzuweisen, dass zwischen den Tiefenangaben des Direct Push Electrical Conductivity Logs und den geophysikalischen Profilmessungen eine leichte Abstufung existiert (Abbildung 6-2: a bis c). Grund dafür sind variierende Geländehöhen

zwischen dem Ansatzpunkt P2 im Süden des Untersuchungsgebietes und der Lage der geoelektrischen Profile weiter nördlich im Untersuchungsgebiet. Die gute Übereinstimmung der ermittelten Schichtmächtigkeiten spiegelt sich auch in dem geologischen Schnitt in Abbildung 6-3 wider. In ihm sind sowohl die Ergebnisse der Electrical Conductivity Logs als auch der geophysikalischen Messungen berücksichtigt.

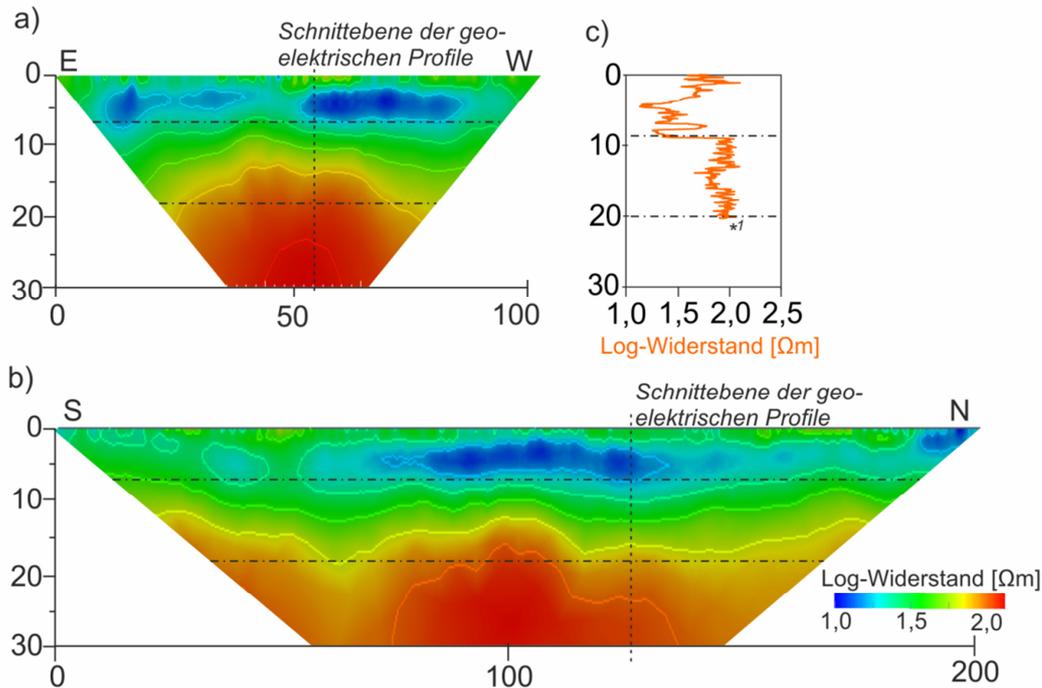


Abbildung 6-2: Vergleich der Messergebnisse: a) und b) 2D-Profile der elektrischen Widerstandstomographie und c) Vertikalprofil der elektrischen Leitfähigkeit (mit dem Direct Push Electrical Conductivity Log am Punkt P2 gemessen); *¹ kein weiterer Sondervortrieb möglich.

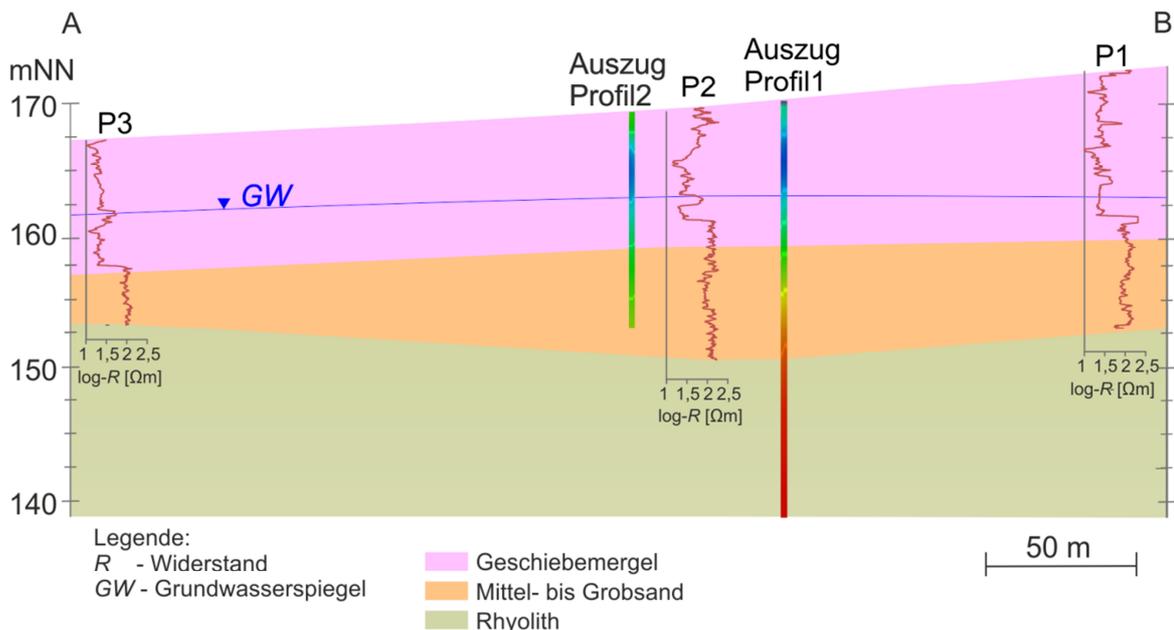
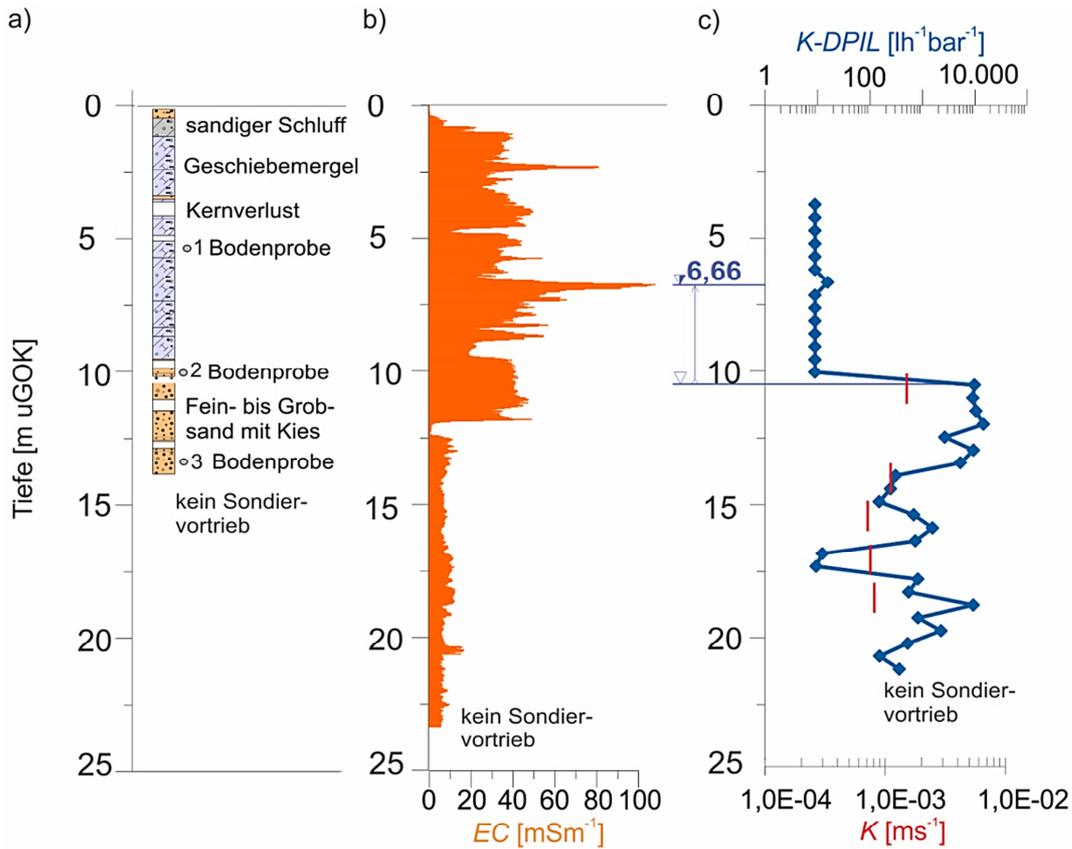


Abbildung 6-3: Geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet (Lage des Schnittes zeigt Abbildung 6-1:1b).

Der Übergang zwischen Ton und sandigem Kies zeigt sich im Vertikalprofil der relativen hydraulischen Leitfähigkeit (Direct Push Injection Log) durch den sprungartigen Anstieg ihres Wertes in 10,0 bis 10,5 m Tiefe (Abbildung 6-4: c). Während die relativen hydraulischen Leitfähigkeiten der obersten Schicht etwa konstant sind, variieren die Werte der zweiten Schicht mit der Tiefe. Die absoluten hydraulischen Leitfähigkeiten der zweiten Schicht sind in den vorab mit dem Direct Push Injection Log identifizierten Tiefenbereichen mit variierenden relativen hydraulischen Leitfähigkeiten bestimmt worden. Die Unsicherheit in der Messung der absoluten hydraulischen Leitfähigkeit wird sowohl durch die Schwankungsbreite der Ergebnisse der Wiederholungsmessungen in den verschiedenen Messstellen als auch die vertikale Parametervariabilität berücksichtigt. Die Werte im gesamten Untersuchungsgebiet (die in allen vier Grundwassermessstellen bestimmt wurden) schwanken zwischen $5,6\text{E-}4$ und $1,3\text{E-}3 \text{ ms}^{-1}$, wobei die in der Messstelle P2 ermittelten Werte zwischen $6,2\text{E-}4$ und $1,3\text{E-}3 \text{ ms}^{-1}$ liegen (Abbildung 6-4: c). Um die effektive hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters im Untersuchungsgebiet zu bestimmen, wurde das geometrische Mittel aller Werte berechnet. Es ergibt sich eine effektive hydraulische Leitfähigkeit von $7,2\text{E-}4 \text{ ms}^{-1}$.

Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (unter Beachtung der Parameterschwankungsbreite) gibt zusammen mit den Messungen der Grundwasserflurabstände Rückschluss auf die Variabilität der Grundwasserfließgeschwindigkeiten. Im Untersuchungsgebiet wurden die Grundwasserflurabstände in vier Grundwassermessstellen bestimmt. Die resultierende Darcy-Fließgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet liegt zwischen $0,21$ und $0,26 \text{ md}^{-1}$. Dabei wurde für die Berechnung eine mittlere hydraulische Leitfähigkeit von $7,2\text{E-}4 \text{ ms}^{-1}$ und hydraulischer Gradienten zwischen $3,4\text{E-}3$ und $4,1\text{E-}3$ angenommen (basierend auf den absoluten Abweichungen der Grundwasserhöhen in Grundwasserfließrichtung zwischen den Punkten P1 und P3 sowie P4 und P3). Der Vergleich der Grundwasserhöhen mit dem Vertikalprofil der hydraulischen Leitfähigkeit deutet auf leicht gespannte Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet.



- Elektrische Leitfähigkeit aus Direct Push Electrical Conductivity Logging (EC in mSm^{-1})
- ◆ Relative hydraulische Leitfähigkeit aus Direct Push Injection Logging ($K-DPIL$ in $lh^{-1}bar^{-1}$)
- Absolute hydraulische Leitfähigkeit aus Direct Push Slug Test (K in ms^{-1})
- ▽ Gespannter Grundwasserspiegel [m uGOK]
- ▽ Gemessene Grundwasserhöhen [m uGOK]

Abbildung 6-4: Ergebnisse der Direct Push Charakterisierung: a) Direct Push Bodenprofil aus Bodenansprache (mit dem Direct Push Soil Sampling Tool an Punkt P3 bestimmt), b) hochaufgelöstes Vertikalprofil der elektrischen Leitfähigkeit (mit dem Direct Push Electrical Conductivity Log an Punkt P1 gemessen) und c) hochaufgelöstes Vertikalprofil der relativen hydraulischen Leitfähigkeit und tiefenorientierte Verteilung der absoluten hydraulischen Leitfähigkeiten (mit dem Direct Push Injection Log und dem Direct Push Slug Test an Punkt P2 gemessen).

Als Ergebnis der Messung der Grundwasserflurabstände wurde zudem ein Grundwasser-gleichenplan erstellt (Abbildung 6-5). Abweichend von dem Ergebnis der vereinfachten Parametrisierung ist die gemessene Grundwasserfließrichtung im Untersuchungsgebiet Nordwest. Die maximale Abweichung der Grundwasserfließrichtung beträgt etwa 45° (Stichtagsmessungen vom 30.07. und 19.07.2013, Abbildung 6-5: b). Bei der Bestimmung der Grundwasserfließrichtung anhand von Grundwasserflurabständen sind für eine Interpolation der Höhen mindestens drei Messstellen einzubeziehen. Im Untersuchungsgebiet wurden die Grundwasserhöhen an vier Messstellen berücksichtigt. Die Einbeziehung weiterer Messstellen im mittleren Bereich des Untersuchungsgebietes hätte zu einer Verbesserung der Messgenauigkeit geführt, war jedoch auf Grund der Zugänglichkeit des

Untersuchungsgebietes nicht möglich. Selbst wenn die Messung auf Grund der Beschränkung der Zahl der Grundwassermessstellen Messfehler bei der Nutzung des Kabellichtlots oder der Vernachlässigung möglicher jahreszeitlicher Schwankungen der Grundwasserdynamik noch mit Unsicherheiten behaftet ist, stellt sie eine genauere Annäherung an die realen Bedingungen dar als die Abschätzung der Grundwasserhydraulik anhand der verfügbaren Literaturwerte.

Die Messung der Grundwasserhöhen ist die Grundlage für die Ableitung der Grundwasserfließgeschwindigkeit und -richtung. Die Kenntnis dieser hydraulischen Bedingungen erlaubt es, die Advektion als Wärmetransportprozess für die Nutzung oberflächennaher Geothermie zu berücksichtigen. Zudem ist sie die Voraussetzung für eine optimierte Anordnung der Erdwärmesonden zur Minimierung des Risikos thermischer Interaktionen, die gerade bei einem vergleichsweise geringen Abstand zwischen benachbarten Sonden in der Planung berücksichtigt werden müssen (Vergleich Kapitel 5).

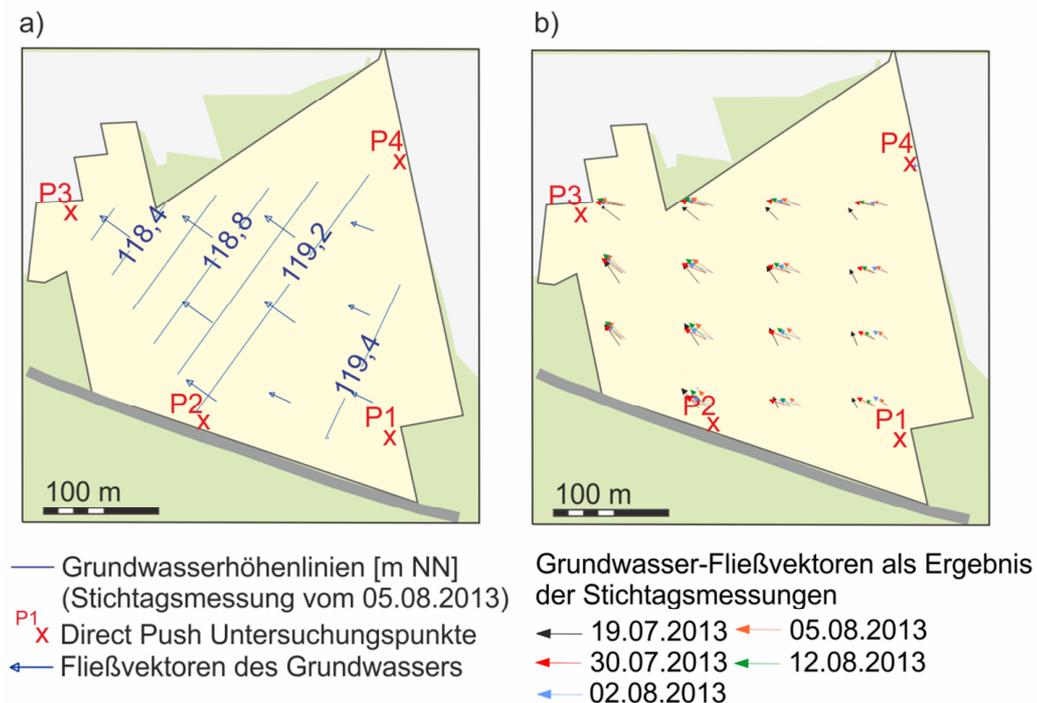


Abbildung 6-5: Ergebnis der Interpolation der Grundwasserhöhen zur Darstellung a) der Grundwasserisohypsen und Fließvektoren der Stichtagsmessung vom 05.08.2013 und b) der Fließvektoren ausgewählter Stichtagsmessungen zur Veranschaulichung der maximalen Abweichung der messtechnisch ermittelten Grundwasserfließrichtung.

Die innerhalb des Messzeitraumes bestimmte mittlere Grundwassertemperatur von 10 °C entspricht etwa der mittleren jährlichen Lufttemperatur in der Region des Untersuchungsgebietes (DWD, 2014). Daher ist keine anthropogene Beeinflussung, wie sie z. B. im urbanen Raum in Form von unterirdischen Wärmeinseln auftritt, erkennbar.

Verglichen mit den Literaturangaben zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit resultieren die an den Bodenproben gemessenen Werte aus einer genaueren Parameterdefinition (Tabelle 6-1). Die gemessenen Parameterschwankungen (z. B. auf Grund unterschiedlicher Wassersättigung und Verdichtung) sind geringer als die in der Richtlinie VDI 4640-1 (2010) angegebenen Parameterbandbreiten. Die mittleren Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes im Untersuchungsgebiet von $2,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ der ersten Schicht (feuchte Bedingungen) bzw. $2,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ der zweiten Schicht liegen unterhalb der Wärmeleitfähigkeit des Rhyoliths (bzw. dessen tertiären Verwitterungen) von $3,9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (mittlerer Literaturwert; VDI 4640-1, 2010; Diao et al. 2004).

Tabelle 6-1: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten für bindige (1) und nicht-bindige (2 und 3) Bodenproben mit maximaler und minimaler Verdichtung und variierendem Wassergehalt. Die Beprobungspunkte sind in dem geologischen Profil in Abbildung 6-4: a dargestellt.

Sediment (Verdichtung, Wassergehalt)	Gemessene Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]		Literaturwerte der Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] (VDI 4640-1, 2010)
	Min.	Max.	
1 Geschiebemergel (hoch; trocken) Geschiebemergel (hoch, feucht)	0,56	0,78	0,4 – 1,0 (Geschiebemergel/Lehm, trocken)
	2,37	2,40	1,1 – 2,9 (Geschiebemergel/Lehm)
2 Mittel- bis Grobsand (gering; gesättigt) Mittel- bis Grobsand (hoch; gesättigt)	2,19	2,53	2,0 – 3,0 (Sand, gesättigt)
	2,46	2,68	
3 Grobsand bis Kies (gering, gesättigt) Grobsand bis Kies (hoch; gesättigt)	1,72	2,21	2,0 – 3,0 (Sand, gesättigt)
	2,20	2,79	1,6 – 2,5 (Kiese/Steine, gesättigt)

Tabelle 6-2: Daten der vereinfachten Parametrisierung (Literaturwerte) und der standortspezifischen Parametrisierung (Referenzwerte) für die Schicht 1 (Geschiebemergel), Schicht 2 (Mittel- bis Grobsand) und Schicht 3 (Rhyolith).

Parameter	Schicht	Gemessene Referenzwerte (standortspezifische Parametrisierung)	Literaturwerte (vereinfachte Parametrisierung)	
			Minimum	Maximum
Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	1	1,34	0,4 ¹⁾	2,9 ¹⁾
	2	2,3	1,6	3,0
	3	3,85 ⁵⁾	3,1 ¹⁾	4,6 ²⁾
Wärmekapazität ¹⁾ ρc_p [$\text{MJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	1	2,0	1,5	2,5
	2	2,5	2,2	2,8
	3	2,15 ⁵⁾	2,1	2,2 ²⁾

Parameter	Schicht	Gemessene Referenzwerte (standortspezifische Parametrisierung)	Literaturwerte (vereinfachte Parametrisierung)	
			Minimum	Maximum
Hydraulische Leitfähigkeit * $k_f(x)$ [ms^{-1}]	1	5,0E-7 ³⁾	1,0E-9 ³⁾	1,0E-6 ³⁾
	2	7,2E-4	1,0E-4 ³⁾	1,0E-3 ³⁾
	3	5,1E-7 ³⁾	1,0E-7 ⁴⁾	1,0E-5 ⁴⁾
Porosität ³⁾ n [-]	1	0,53 ⁵⁾	0,40	0,65
	2	0,30 ⁵⁾	0,25	0,35
	3	0,35 ⁵⁾	0,05 ²⁾	0,65 ⁴⁾
Hydraulischer Gradient i [-]	-	3,6E-3	1E-3	1E-2

1) VDI 4640-1 (2010), 2) Diao et al. (2004), 3) Hölting und Coldewey (2013), 4) Müller et al. (2008), 5) Mittelwert aus Minimum und Maximum, * $k_f(x) = k_f(y) = 0,1 k_f(z)$

6.5 Bewertung der standortspezifischen Parametrisierung

6.5.1 Einfluss auf das Design von Erdwärmesonden

Im Folgenden wird der Einfluss der Parametrisierung der Wärmeleitfähigkeit und der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf das Design von Erdwärmesonden für:

- 1) die gemessenen Werte des standortspezifischen Erkundungsansatzes und
- 2) die Literaturwerte der vereinfachten Parametrisierung

untersucht (Tabelle 6-2).

Nach Panteleit und Reichling (2006) ist das Design von Erdwärmesonden von den Wärmeleitfähigkeiten der Sedimente und der Grundwasserfließgeschwindigkeit abhängig. Für Wohngebäude mit Heizleistungen unter 30 kW werden die thermischen Entzugsleistungen und benötigten Installationslängen wie folgt berechnet (nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016; Gl. 6-1 bis 6-3):

(Gl. 6-1)

$$P_{ext} = \left(-0,85 + \frac{0,1}{300} (h - 1.800) + 0,23 \text{ GWF} \right) \lambda^2 +$$

$$\left(13,6 - \frac{0,6}{300} (h - 1.800) + 0,85 \text{ GWF} \right) \lambda +$$

$$18,8 - \frac{1,25}{300} (h - 1.800) + 4,55 \text{ GWF}$$

(Gl. 6-2)

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

(Gl. 6-3) und $L_{BHE} = \frac{P_W}{P_{ext}}$

Wobei gilt: P_{ext} ist die thermische Entzugsleistung in Wm^{-1} , h ist die Zahl der jährlichen Betriebsstunden des Erdwärmesondensystems in Stunden (hier 2100 h), GWF ist der dimensionslose Grundwasserfaktor ($0 \leq GWF \leq 1$), i ist der dimensionslose hydraulische Gradient, k_f ist die hydraulische Leitfähigkeit in ms^{-1} , λ ist die Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, L_{BHE} ist die gesamte Installationslänge der Erdwärmesonden in m, und P_W ist der Wärmebedarf des untersuchten Wohnhauses in W. Im Untersuchungsszenario werden 7,8 kW aus dem Untergrund entzogen, um bei einer Jahresarbeitszahl von 4,5 einen Wärmebedarf von 10 kW zu decken. Die Berechnung der Entzugsleistungen erfolgt auf Grundlage der in Tabelle 6-2 aufgeführten minimalen, maximalen und gemessenen Parameter, die aus der standortspezifischen und vereinfachten Parametrisierung resultieren.

Wie bereits in Kapitel 4.3.4 dargestellt, beeinflusst der Wert der Wärmeleitfähigkeit die nach diesem Ansatz berechnete thermische Entzugsleistung stärker als der Grundwasserfaktor. Hohe Wärmeleitfähigkeiten resultieren in hohen thermischen Entzugsleistungen und reduzierten Installationslängen für Erdwärmesonden (Tabelle 6-3, Abbildung 6-6). Für die obere, teilweise ungesättigte Schicht ergibt sich aus der standortspezifischen Parametrisierung eine thermische Entzugsleistung von $44,4 \text{ Wm}^{-1}$. Die Werte der vereinfachten Parametrisierung ergeben dagegen eine Schwankungsbreite der thermischen Entzugsleistung von -49 % ($22,6 \text{ Wm}^{-1}$) bzw. +10 % ($48,9 \text{ Wm}^{-1}$). Diese Schwankungen resultieren aus der fehlenden Kenntnis des genauen Grundwasserstandes und den Abweichungen der Wärmeleitfähigkeiten von Grundwasser gesättigten und ungesättigten Sedimenten. Die zweite Schicht des sandig kiesigen Grundwasserleiters weist höhere thermische Entzugsleistungen auf als der Geschiebemergel. In ihr hat der Grundwasserfaktor einen vergleichbar hohen Einfluss. Im Grundwasserleiter beträgt die Entzugsleistung, die auf Grundlage der Messwerte berechnet wurde, $49,7 \text{ Wm}^{-1}$. Die minimalen und maximalen Literaturwerte der Wärmeleitfähigkeit resultieren in einer Schwankungsbreite der thermischen Entzugsleistung von $41,8 \text{ Wm}^{-1}$ (-16 %) bis $54,8 \text{ Wm}^{-1}$ (+10 %). Die thermische Entzugsleistung des Rhyolith liegt je nach Literaturwert der Wärmeleitfähigkeit zwischen $50,6 \text{ Wm}^{-1}$ und $64,8 \text{ Wm}^{-1}$. Sie ist auf Grund der vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeiten maximal.

Um die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes in Null bis 45 m Tiefe zu bestimmen, erfolgt die Mittelung der Wärmeleitfähigkeiten der drei Schichten entsprechend ihrer Mächtigkeit (LfULG, 2013). Zunehmende Wärmeleitfähigkeiten resultieren in steigenden thermischen Entzugsleistungen und damit geringeren Installationslängen der Erdwärmesonden (Abbildung 6-6). Welchen Einfluss die Parametrisierung auf die ermittelten Ent-

zugsleistungen hat, verdeutlicht die folgende Gegenüberstellung der zwei Parametrisierungsansätze.

Da für den Rhyolith kein Messwert vorliegt, wird für den Ansatz der standortspezifischen Parametrisierung der Mittelwert aus maximaler und minimaler Wärmeleitfähigkeit angewendet. Demnach resultiert die standortspezifische Parametrisierung ($3,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) in einer thermischen Entzugsleistung von $52,1 \text{ Wm}^{-1}$ (150 m Installationslänge, für die Bereitstellung eines Wärmeentzuges von 7,8 kW aus dem Untergrund; Tabelle 6-3). Auf Grund der Unsicherheit der vereinfachten Untergrundparametrisierung bei der Bestimmung lokaler Wärmeleitfähigkeiten schwanken die mittleren minimalen und maximalen Wärmeleitfähigkeiten zwischen $2,1$ und $3,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die resultierende thermische Entzugsleistung variiert zwischen $41,8$ und $58,6 \text{ Wm}^{-1}$ (-20 % und +12 %; Abbildung 6-6: a).

Je nach angesetzter thermischer Entzugsleistung schwanken die Installationslängen der Erdwärmesonden. Verglichen mit der Installationslänge der standortspezifischen Parametrisierung resultiert die vereinfachte Parametrisierung in einer Unter- bzw. Überdimensionierung des Systems. Dabei schwanken die Installationslängen um +25 % bzw. -11 % (Abbildung 6-6: b; Tabelle 6-3). Bei Investitionskosten von 50 € pro Bohrmeter resultiert diese Unsicherheit in der Bestimmung der Installationslänge bei einem einzelnen Wohnhaus in Abweichung von bis zu 850 € unter bzw. 1.850 € über den Bohrkosten, die auf Grundlage der standortspezifischen Messungen bestimmt wurden (Tabelle 6-3).

Die hier betrachteten Schwankungen gehen, anders als es in der Praxis immer der Fall ist, von bekannten Schichtmächtigkeiten aus. Wenn zusätzlich zur Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserfließgeschwindigkeit auch die Kenntnis über die Schichtmächtigkeit unsicher ist, erhöht sich die mögliche lokale Schwankungsbreite der thermischen Entzugsleistungen weiter. Variiert man in dem hier untersuchten Szenario beispielsweise die Schichtmächtigkeiten um ± 10 m, führt das zu zusätzlichen Abweichungen in der Entzugsleistung. Bei einer Steigerung der Rhyolith-Schicht und Reduzierung der Mächtigkeit des Grundwasserleiters verändert sich die berechnete thermische Entzugsleistung um ± 5 % unter Annahme der minimalen Literaturwerte bzw. ± 4 % unter Annahme der maximalen Literaturwerte. Diese Ergebnisse unterstreichen die Schlussfolgerung, dass die Spannweite zwischen minimalen und maximalen Literaturwerten zu einer erhöhten Unsicherheit in der Berechnung der Entzugsleistungen und damit der nötigen Bohrmeter führt. Folglich erhöht sich auch das Risiko für über- bzw. unterdimensionierte Systeme, das durch standortspezifische Messungen lokaler Wärmeleitfähigkeiten minimiert werden kann.

Darüber hinaus beeinflussen die Untergrundbedingungen die Jahresarbeitszahl des installierten Systems. Nach Casasso und Sethi (2014) kann die Jahresarbeitszahl in Ab-

hängigkeit von der Differenz zwischen Zulauf- und Ablauf-Temperatur der Erdwärmesonden abgeschätzt werden (Gl. 6-4):

$$(Gl. 6-4) \quad \varepsilon = a + b T_f$$

Wobei gilt: a und b sind vom Heizsystem abhängige Konstanten, die für Fußbodenheizungen typische Werte von $a = 3,5$ und $b = 0,1 \text{ K}^{-1}$ annehmen. Im Folgenden wird angenommen, dass die Differenz zwischen Zu- und Ablauf-Temperatur ein Maß für die thermische Entzugsleistung des Untergrundes ist (Vergleich Gl. 4-1, Kapitel 4.2).

Die Jahresarbeitszahl des Systems, das an die standortspezifischen Daten angepasst ist, beträgt 3,1. Unter Anwendung der vereinfachten Parametrisierung variiert dieser Wert um -0,6 (minimale thermische Entzugsleistung) bzw. +0,4 (maximale thermische Entzugsleistung). In Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl ε , dem Wärmebedarf des Gebäudes P_u und den jährlichen Betriebsstunden h wird der jährliche Stromverbrauch V_s wie folgt berechnet (Casasso und Sethi, 2014; Gl. 6-5):

$$(Gl. 6-5) \quad V_s = \frac{P_u}{\varepsilon} h$$

Die Gegenüberstellung der berechneten Jahresarbeitszahlen wiederum resultiert in einem Stromverbrauch, der 1.657 kWh über bzw. 743 kWh unter dem Stromverbrauch des standortspezifisch geplanten Systems liegt.

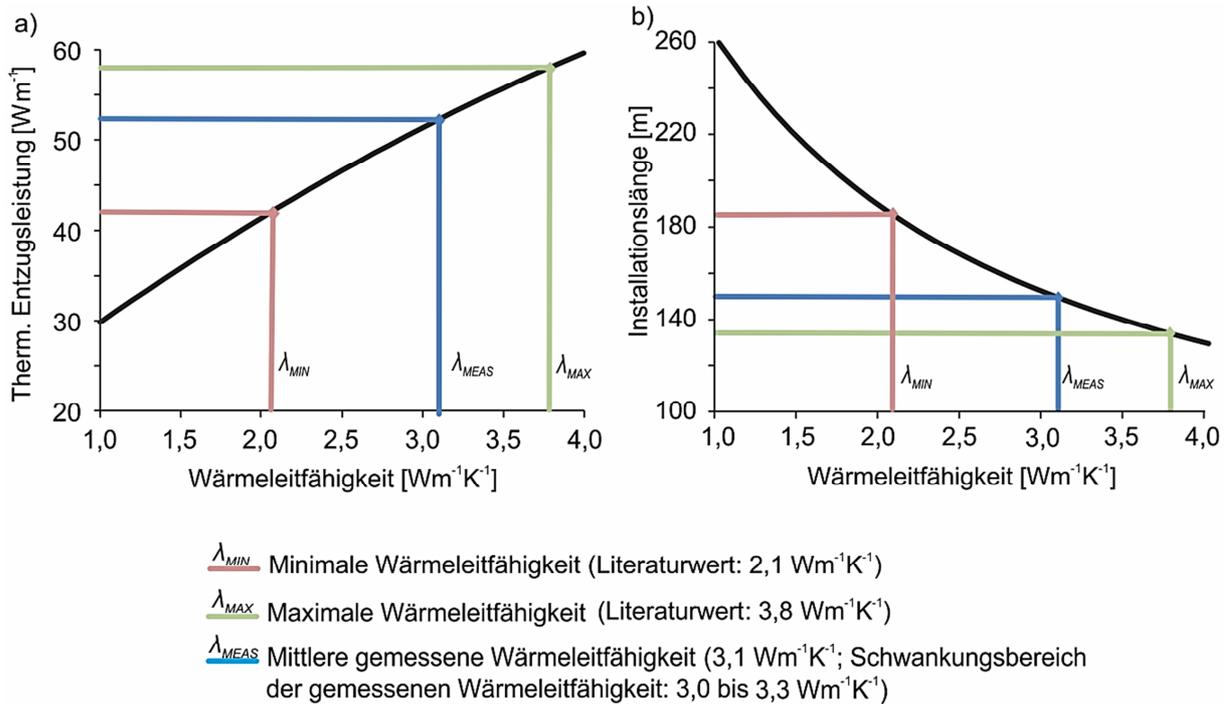


Abbildung 6-6: Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und a) der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes sowie b) der benötigten Installationslänge der Erdwärmesonden (berechnet nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016).

Tabelle 6-3: Vergleich der berechneten Entzugsleistungen, Installationslängen der Erdwärmesonden und Bohrkosten für die standortspezifische und vereinfachte Parametrisierung zur Wärmebereitstellung durch das untersuchte geothermische System (nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016 berechnet).

	Standortspezifische Parametrisierung	Vereinfachte Parametrisierung	
		Minimum	Maximum
Entzugsleistung [Wm^{-1}]	52,1 ¹⁾	41,8 (-20 %)	58,6 (+12 %)
Installationslänge [m] ²⁾	150	187 (+25 %)	133 (-11 %)
Bohrkosten [€] ³⁾	7.500	9.350 (+25 %)	6.650 (-11 %)

- 1) berechnet anhand der mittleren gemessenen Wärmeleitfähigkeit der ersten zwei Schichten und dem Mittelwert der Literaturangaben der Wärmeleitfähigkeit der Rhyolith-Schicht
- 2) für die geothermische Versorgung eines Einfamilienhauses mit einem Wärmebedarf von 10 kW, wobei bei einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 4,5 dem Untergrund 7,8 kW entnommen werden;
- 3) berechnet unter der Annahme von Bohrkosten von 50 € pro Bohrmeter.

6.5.2 Bewertung der Vorhersage induzierter Temperaturanomalien

In den meisten Ländern, in denen sich die Nutzung oberflächennaher Geothermie zur Wärme- bzw. Kältebereitstellung etabliert hat, definieren Umweltfachbehörden Grenzwerte für die zulässigen induzierten Temperaturänderungen. Diese Grenzwerte sollen eine nachhaltige und umweltschonende Nutzung des Untergrundes als thermische Ressource ge-

währleisten (Hähnlein et al., 2011). Numerische Modelle des Untergrundes können angewendet werden, um induzierte Langzeitänderungen im Vorfeld zu untersuchen. Modellstudien ermöglichen die Anpassung des Designs des Erdwärmesondensystems, sodass die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben sichergestellt ist. Allerdings hängt die Genauigkeit dieser Modelle stark von der Genauigkeit der Eingabewerte zur Parametrisierung des Untergrundes ab.

Um den Vorteil des Ansatzes der standortspezifischen Erkundung des Untergrundes für die Vorhersage induzierter Temperaturanomalien zu bewerten, werden im Folgenden zwei Szenarien für das Untersuchungsgebiet untersucht:

- 1) Parametrisierung des Untergrundes anhand gemessener standortspezifischer Werte (gemessener Referenzfall auf Basis der standortspezifischen Untergrund-erkundung) und
- 2) Parametrisierung des Untergrundes auf Grundlage von Literaturangaben (vereinfachte Parametrisierung).

Für das zweite Parametrisierungsszenario werden sogenannte Best und Worst Case Bedingungen unterschieden. Diese Szenarien sind jeweils durch maximale bzw. minimale Wärmeleitfähigkeiten und maximale bzw. minimale Grundwasserfließgeschwindigkeiten charakterisiert. Die Spannbreite der maximalen und minimalen Literaturwerte repräsentiert die Unsicherheit der vereinfachten Parametrisierung, die aus der natürlichen Schwankung der Untergrundbedingungen resultiert (Tabelle 6-2). Das untersuchte dreidimensionale Modell repräsentiert die drei bei der Vorerkundung identifizierten (hydro-) stratigraphischen Schichten des Untergrundes (Abbildung A-3 im Anhang). Das gesamte Modellgebiet deckt eine Fläche von 9.600 m² ab und reicht bis in eine Tiefe von 85 m. Die Randbedingung der Grundwasserströmung im vollständig gesättigten Modell wurde über ein konstantes hydraulisches Potential (Dirichlet-Randbedingung) definiert. Die initiale Temperatur des Untergrundes und der Erdoberfläche beträgt 10 °C.

Das oberflächennahe geothermische System wurde zur Deckung eines Wärmebedarfs von 10 kW für die Bereitstellung von Warmwasser und Raumwärme eines Einfamilienwohnhauses designt. Unter Annahme einer Jahresarbeitszahl von 4,5 werden dem Untergrund dabei 7,8 kW entzogen. Das System hat eine jährliche Betriebsdauer von 2.400 Stunden und ist für einen Zeitraum von 20 Jahren in Betrieb. Es besteht aus vier Doppel-U-Erdwärmesonden mit je 45 m Tiefe. Die Gesamtlänge der installierten Erdwärmesonden beträgt 180 m. Die Dimensionierung dieses Systems basiert auf einer mittleren thermischen Entzugsleistung des Untergrundes von 52,1 Wm⁻¹. Bei einem aus dem Untergrund zu entnehmendem Wärmebedarf von 7,8 kW ergibt sich somit eine Installationslänge

von 150 m. Zu dieser Grundlänge wurde ein Sicherheitszuschlag von 30 m addiert, den in der Praxis üblichen Sicherheitszuschlag von 15 bis 20 % entspricht. Dieser Aufschlag trägt neben der vergleichsweise geringen thermischen Entzugsleistung und dem geringeren Regenerationspotential der ungesättigten Zone (Vergleich Kapitel 5) auch der Unsicherheit in der Bestimmung der für die geothermische Nutzung relevanten Untergrundparameter Rechnung. Die monatliche Verteilung der Heizgradtage basiert auf den Angaben der Messstation Halle/Leipzig (in etwa 20 km Entfernung von der Stadt Taucha; DWD, 2014). Alle Analysen wurden mit der Finite Elemente Software Feflow durchgeführt. Dabei wurde das implementierte Erdwärmesonden-Tool zur Modellierung von geothermischen Systemen genutzt (DHI-WASY, 2013; DHI-WASY, 1979 - 2016; Diersch et al., 2011a, 2011b). Informationen und Parameter zur Charakterisierung des Erdwärmesonden-systems sind in der Tabelle A-1 des Anhangs aufgeführt.

Da der konduktive Wärmetransport in den Schichten des Geschiebemergels und Rhyoliths dominiert, wird für diese zwei Schichten im Folgenden der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Ausbildung von Temperaturanomalien untersucht. Der Fokus der Gegenüberstellung liegt auf der Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten, die auf Grund der natürlichen Heterogenität des Untergrundes auftreten kann (Abbildung 6-7). Da insbesondere für die dritte Schicht aus Rhyolith keine Messwerte verfügbar sind, wird der Referenzfall hier nicht betrachtet. Die Untergrundtemperaturen sind für die Mitte der jeweiligen Zielhorizonte dargestellt, wobei jede Schicht eine ungestörte Untergrundtemperatur von 10 °C aufweist. Die Ergebnisse zeigen eine symmetrische Temperaturverteilung um die Erdwärmesonden. Im Rhyolith führt die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit zu einer größeren räumlichen Ausdehnung der Temperaturanomalie bei gleichzeitig geringerer absoluter Temperaturänderung als im Geschiebemergel. Im Geschiebemergel resultieren minimale Wärmeleitfähigkeiten in der größten Abkühlung bis auf 2,7 °C, während für maximale Wärmeleitfähigkeiten Minimaltemperaturen von 6,0 °C erreicht werden. Bei minimalen Wärmeleitfähigkeiten ist die Temperatur im Rhyolith nach 20 Jahren saisonalem Heizen auf 4,5 °C gefallen, wohingegen eine maximale Wärmeleitfähigkeit zu einer Abkühlung auf 6,0 °C führt.

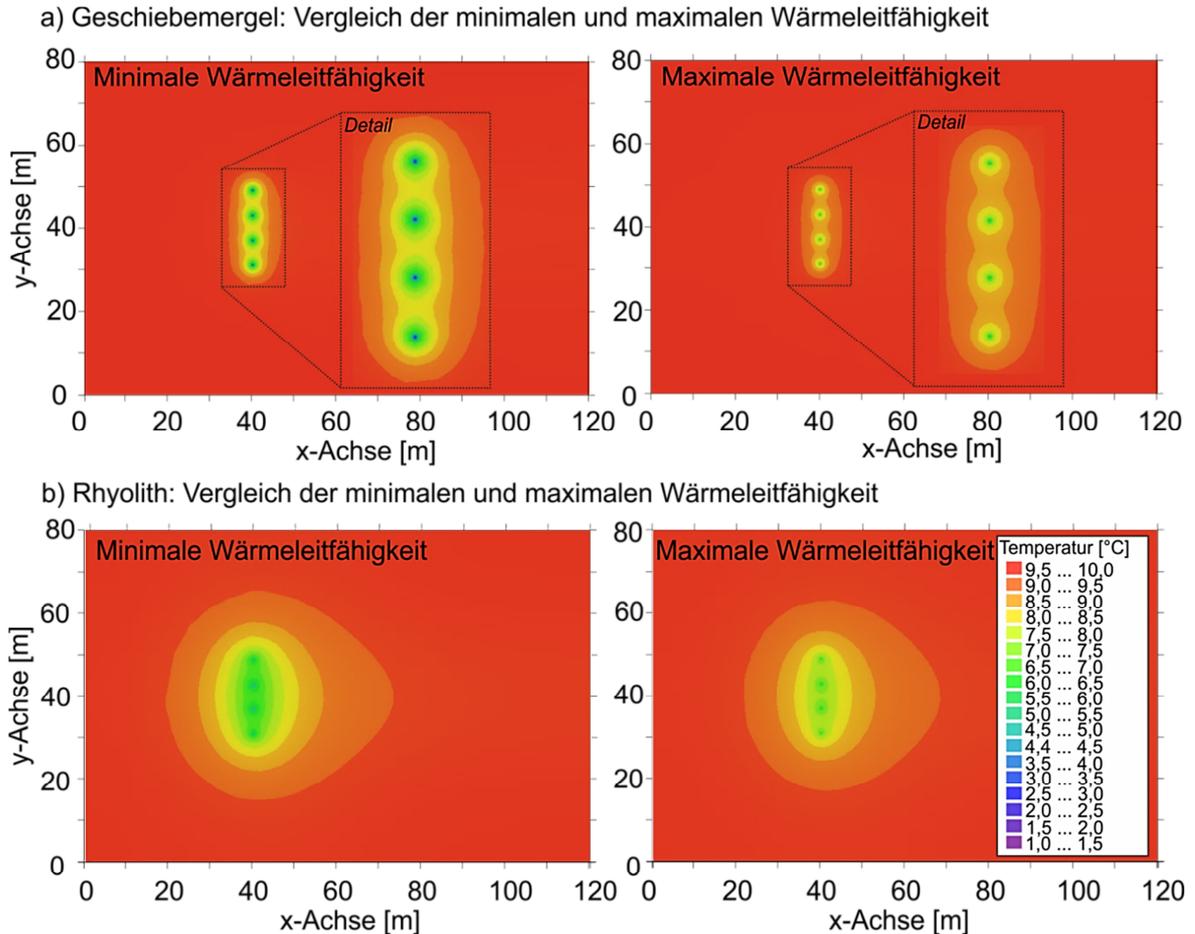


Abbildung 6-7: Induzierte Temperaturanomalien im Umfeld eines geothermischen Systems nach einer Betriebsdauer von 20 Jahren (saisonales Heizen) bei Annahme von maximalen und minimalen Wärmeleitfähigkeiten im a) ungesättigten Geschiebemergel (ca. 4 m Tiefe unter GOK) und b) Rhyolith (ca. 13 m Tiefe unter GOK).

Die Energiebilanz im Grundwasserleiter ist im Gegensatz zum Geschiebemergel neben der Konduktion auch durch die Advektion bestimmt. Das nachströmende Grundwasser stellt zusätzlich Energie bereit, wodurch insgesamt geringere Temperaturänderungen auftreten. Allerdings sorgen die erhöhte hydraulische Leitfähigkeit und die daraus resultierende Fließgeschwindigkeit für eine stärkere Ausbreitung der Temperaturfahnen mit der Grundwasserfließrichtung als bei rein konduktivem Wärmetransport. Die simulierten Untergrundtemperaturen des Best Case Szenarios sind etwas geringer ausgeprägt als die des gemessenen Referenzfalles (Abbildung 6-8). Auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeiten und der Grundwasserfließgeschwindigkeiten wird die durch die Erdwärmesonden entzogene Energie im Best Case Szenario vergleichsweise schnell nachgeliefert und der Untergrund thermisch regeneriert. Die daraus resultierende Überschätzung des geothermischen Potentials des oberflächennahen Untergrundes kann die Unterschätzung der induzierten Temperaturanomalien und eine Vernachlässigung möglicher thermischer Wechselwirkungen zwischen benachbarten Erdwärmesonden zur Folge haben.

Die Temperaturanomalien der Worst Case Parametrisierung ergeben die geringsten Untergrundtemperaturen von etwa 3,2 °C bzw. im Rhyolith um 1 °C im Nahbereich der Erdwärmesonde (Abbildung 6-8). Diese deuten auf ein erhöhtes Risiko für Frost-Tau-Wechsel entlang der Erdwärmesonde hin. Wie Abbildung 6-8 zeigt, liegen selbst in einem Meter Abstand stromaufwärts der Erdwärmesonden die induzierten Temperaturänderungen im Rhyolith noch über 6 K (Abbildung 6-9). Im Vergleich zu dem gemessenen Referenzszenario unterschätzt das Worst Case Szenario die thermischen Entzugs- bzw. Regenerationsleistungen des Untergrundes. Selbst die induzierten Temperaturanomalien in 10 m Entfernung im Abstrom der Erdwärmesonde erreichen noch Abkühlungen auf 5 bis 6 °C (Abbildung 6-9). Für dieses Szenario würden die genehmigungsrechtlichen Vorgaben, die Temperaturänderungen in 10 m Entfernung von der Erdwärmesonde ausschließen, nicht eingehalten werden (VDI 4640-1, 2010). Die Vorhersage der Temperaturanomalien auf Grundlage dieser Worst Case Szenarien kann falsche Schlussfolgerungen für die Anwendbarkeit und das Design der Erdwärmesondensysteme zur Folge haben. Beispielsweise werden die Installationslängen auf Grundlage eines unterschätzten geothermischen Potentials überhöht. Auch die Bewertung des Risikos für thermische Interaktionen bietet mit dieser Parametrisierung keine verlässliche Planungsbasis.

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse eindeutig, dass die vereinfachte Parametrisierung anhand von Literaturangaben keine belastbare Basis für eine zuverlässige Bewertung induzierter Temperaturanomalien darstellt. Die vorhergesagten Temperaturfahnen für das Best und Worst Case Szenario variieren mitunter stark, und die vorhergesagten Temperaturänderungen sind über- bzw. unterbewertet. In Folge wird das geothermische System über- bzw. unterdimensioniert und mit einer vergleichsweise geringen Jahresarbeitszahl betrieben. Welchen konkreten Einfluss die Jahresarbeitszahl auf die Betriebskosten eines Erdwärmesondensystems haben kann, wird ergänzend in Kapitel 7.3 diskutiert. Darüber hinaus ermöglicht die Vorhersage induzierter Temperaturanomalien auf Grundlage der vereinfachten Untergrundparametrisierung keine zuverlässige Einschätzung des Risikos für thermische Interaktionen zwischen benachbarten Erdwärmesonden, die z. B. in Form von Superposition von Temperaturfahnen im urbanen Raum mit hoher Dichte an geothermischen Systemen auftreten kann.

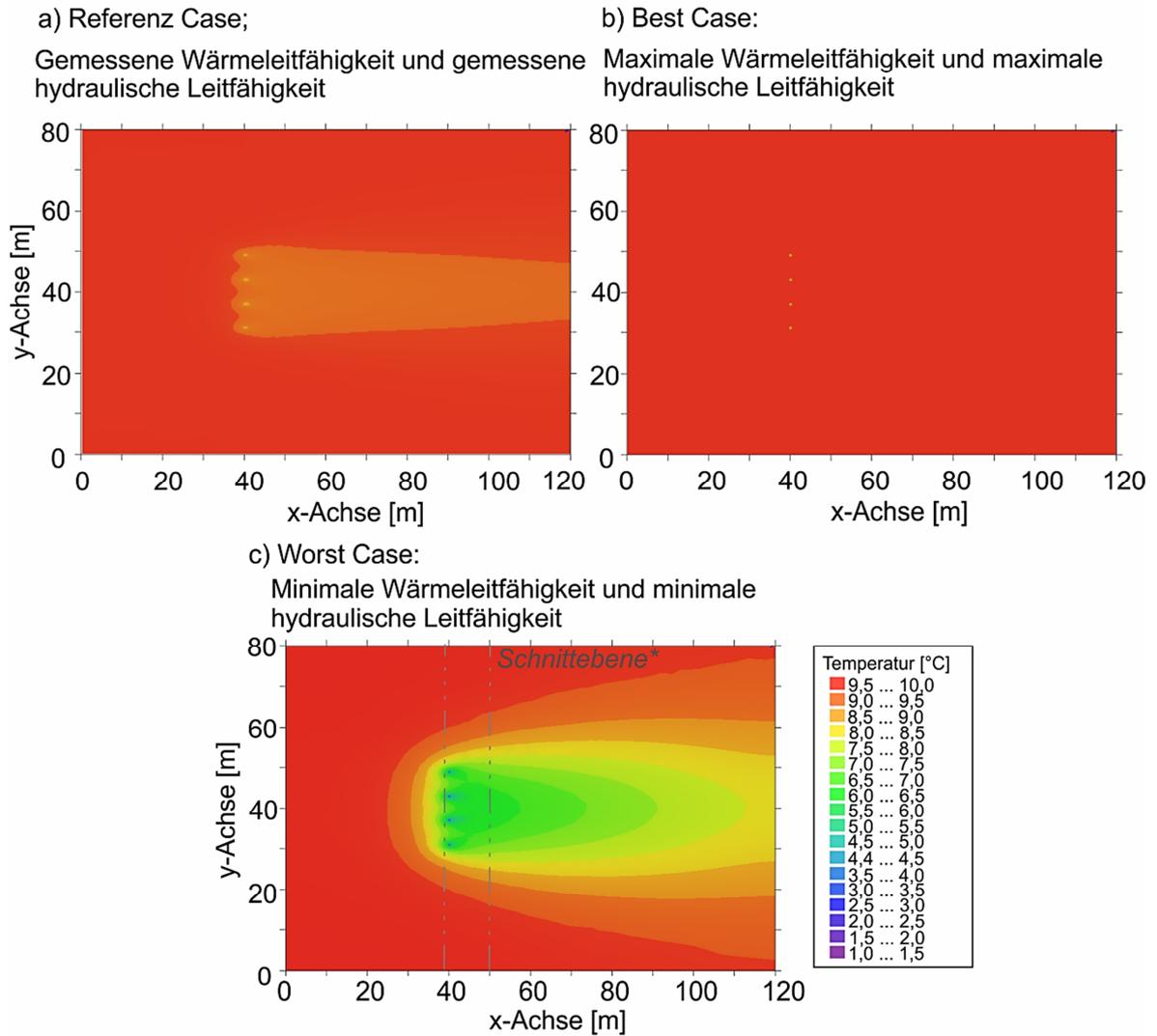


Abbildung 6-8: Vergleich der Temperaturfahnen im Grundwasserleiter (in ca. 16 m Tiefe unter GOK) für a) die standortspezifische Parameterisierung (Referenz Case) sowie die vereinfachte Parameterisierung des Untergrundes mit b) dem Best Case und c) dem Worst Case (* Schnittebene des in Abbildung 6-9 dargestellten Querschnittes).

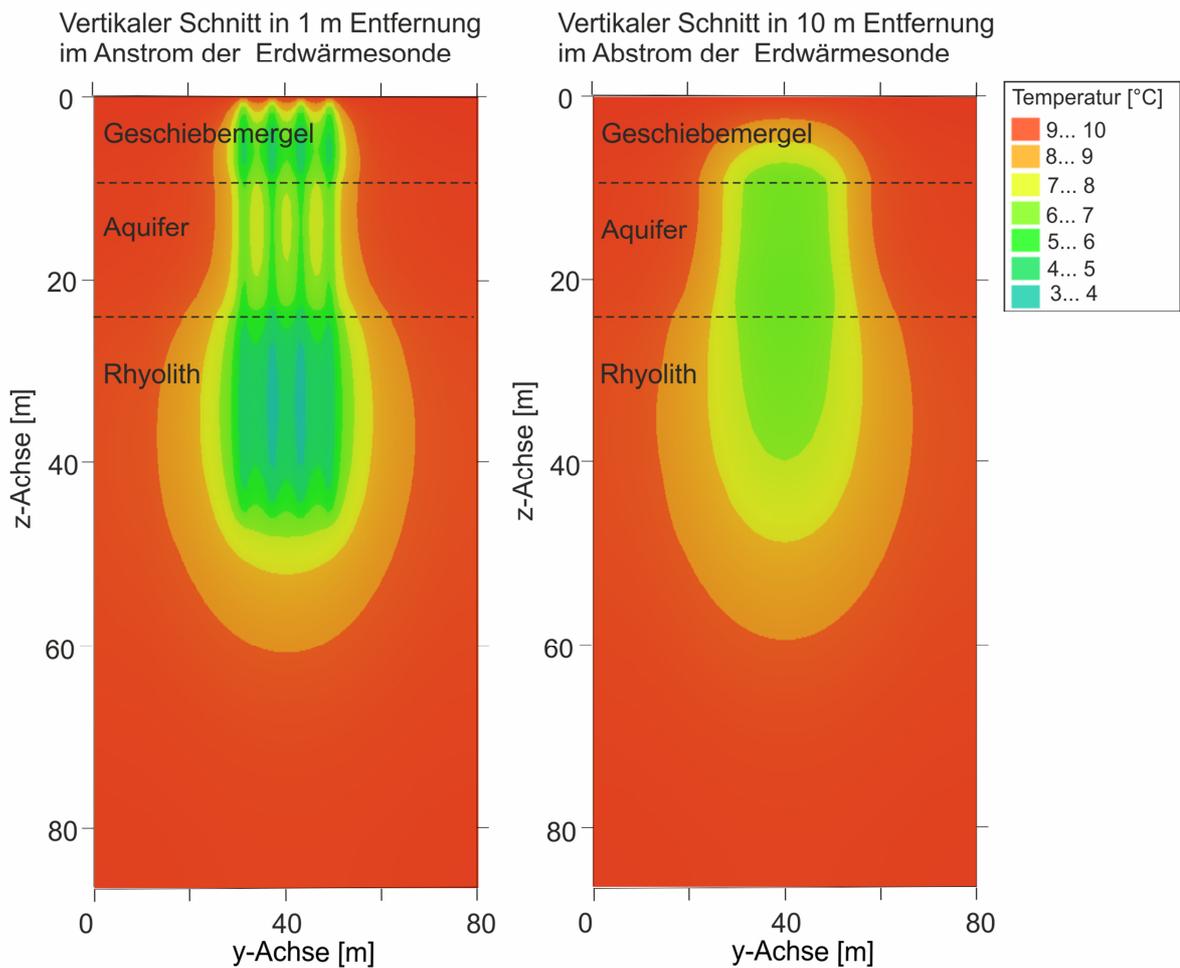


Abbildung 6-9: Vertikaler Querschnitt durch den Untergrund für das Worst Case Szenario mit den in der Literatur vorgegebenen minimalen hydraulischen Leitfähigkeiten und minimalen Wärmeleitfähigkeiten (in Anlehnung an die vereinfachte Untergrundparametrisierung): a) Vertikalschnitt im Anstrom mit 1 m Abstand zu den Erdwärmesonden, b) Vertikalschnitt im Abstrom mit 10 m Abstand zu den Erdwärmesonden, die Lage des Querschnittsprofils ist in Abbildung 6-8: c) markiert.

6.6 Diskussion

Der Vergleich der verfügbaren thermischen Entzugsleistungen und benötigten Installationslängen, die aus dem vereinfachten und standortspezifischen Ansatz zur Parametrisierung des Untergrundes resultieren, zeigen ein großes Potential in der Optimierung des Designs der konventionell geplanten oberflächennahen geothermischen Systeme. Durch die Anwendung der standortspezifischen Erkundung werden Daten zur Beschreibung der lokalen Untergrundverhältnisse erhoben. Folglich werden die Unsicherheiten in der Untergrundparametrisierung und der Systemdimensionierung minimiert. Eine Überschätzung der thermischen Entzugsleistungen führt zu einer Unterdimensionierung der Erdwärmesonden und erhöht das Risiko für Frost-Tau-Wechsel im Nahbereich der Sonde. Im Gegensatz dazu führt eine Unterschätzung der thermischen Entzugsleistung zu überdimensionierten

Installationslängen und erhöhten Investitionskosten (z. B. durch eine überdimensionierte Wärmepumpe oder höhere Bohrkosten). Die erhöhten Installationskosten wiederum verschlechtern die Konkurrenzfähigkeit erdgekoppelter Wärmepumpen gegenüber konventionellen Heiz- und Kühlsystemen. Eine ausführliche Darstellung der Betriebskosten in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl als Maß für die Optimierung des Systemdesigns ist in Kapitel 7.3 dargestellt. Wie aus den Modellanalysen resultiert, zeigen die untersuchten Szenarien des Worst und Best Case (minimale und maximale Literaturwerte) sowie des Referenzszenarios (standortspezifische Messwerte) deutliche Unterschiede in der vorhergesagten absoluten Abkühlung des Untergrundes und der räumlichen Ausdehnung der Temperaturanomalien. Für das Worst Case Szenario am Tauchaer Untersuchungsgebiet können die Temperaturen in den gering durchlässigen Schichten (Geschiebemergel und Rhyolith) unter 0 °C fallen. Diese Temperaturabnahme deutet auf ein erhöhtes Risiko für eine lokale Frostbildung in der Untergrundmatrix hin. Dadurch verschlechtert sich wiederum die Jahresarbeitszahl. Auch der Einfluss der ungesättigten Zone (Vergleich Kapitel 5) kann bei fehlender Kenntnis des Grundwasserflurabstandes nicht hinreichend genau eingeschätzt werden. Die Unsicherheit von bis zu 16 m bei der Bewertung der ungesättigten Mächtigkeit führt zu einer ungenauen Vorhersage der zu erwartenden thermischen Entzugsleistungen des oberflächennahen Untergrundes und der induzierten Temperaturanomalien.

Nur die standortspezifische Kenntnis der sensitiven Untergrundparameter, insbesondere der Wärmeleitfähigkeit und der hydraulischen Leitfähigkeit, ermöglichen eine belastbare modellbasierte Vorhersage der langfristig zu erwartenden Temperaturanomalien. Außerdem fördert die standortspezifische Ermittlung der Grundwasserfließgeschwindigkeit und –richtung das Verständnis der Ausbildung und Entwicklung von Temperaturanomalien. Dadurch kann auch das Risiko für thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen in Gebieten mit hoher Anlagendichte sicherer bewertet und bei der Planung berücksichtigt werden. Denn nach dem in Kapitel 4 dargestellten Ansatz zur Klassifizierung des Einflusses der Advektion auf die thermische Untergrundnutzung ist der unterirdische Wärmetransport am Standort in Taucha mit einer mittleren Péclet Zahl von 4,1 der Klasse 2 zuzuordnen. Das heißt, bei einer thermischen Untergrundnutzung müssen sowohl die Advektion als auch Konduktion berücksichtigt werden. Die Gegenüberstellung der Temperaturänderungen in den einzelnen Schichten verdeutlicht dabei, dass im Grundwasserleiter die Grundwasserfließgeschwindigkeit und im Rhyolith die Wärmeleitfähigkeit den Wärmetransport dominieren.

Bei der Bewertung des Risikos für thermische Interaktionen hebt sich das Worst Case Szenario besonders ab. Bei den vergleichsweise ungünstigsten Wärmetransportbedingungen

ist die genehmigungsrechtliche Abstandsvorgabe von 10 m zwischen benachbarten Erdwärmesonden zur Vorbeugung von thermischen Interaktionen nicht ausreichend. Durch den advektiven Wärmetransport findet eine deutliche Verlagerung der Temperaturänderung in Grundwasserfließrichtung statt.

Da der Fokus dieser Studie auf der Untersuchung der oberflächennahen Zielhorizonte liegt, sind die angewendeten Direct Push Erkundungsmethoden gut geeignet, um auch kleinskalige Wärmetransportprozesse im Nahbereich der Erdwärmesonde zu untersuchen. Für geothermische Systeme, die diese Zieltiefen überschreiten (z. B. bis in Tiefen von 150 m) müssen einzelne Methoden des standortspezifischen Erkundungsansatzes ergänzt oder substituiert werden. Alternative Erkundungsmethoden sind in Tabelle A-2 des Anhangs zusammengefasst.

6.7 Übertragbarkeit der Ergebnisse am Beispiel Köln Junkersdorf

Die Ergebnisse der Studie zur Bedeutung einer standortspezifischen Vorerkundung der Untergrundbedingungen für die geothermische Nutzung belegt, dass die Planung von geothermischen Systemen unter Einbeziehung standortspezifischer Daten zu einer Erhöhung der Planungssicherheit und Präzisierung der Vorhersage induzierter Temperaturanomalien beiträgt. Im Folgenden wird untersucht, ob die Ergebnisse dieser Fallstudie auch auf andere Standorte übertragbar sind. Dafür wird die Gegenüberstellung der vereinfachten und standortspezifischen Parametrisierung auf das städtische Wohngebiet in Köln Junkersdorf übertragen (Vergleich Kapitel 5). Die Erhebung der zur Parametrisierung des Referenz Szenarios angewendeten Daten erfolgte im Rahmen mehrerer Feldkampagnen des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ und war nicht Teil der hier vorgestellten Arbeit.

6.7.1 Durchführung

Ziel der Untersuchungen ist es:

- 1) die Unsicherheit in der Berechnung der thermischen Entzugsleistungen und Installationslängen zu ermitteln, die aus den verschiedenen Parametrisierungsansätzen resultiert, sowie
- 2) die Spannbreite der induzierten Temperaturänderungen aufzuzeigen, indem das Worst Case und Best Case Szenario (minimale bzw. maximale hydraulische Leitfähigkeit und minimale bzw. maximale Wärmeleitfähigkeit) gegenübergestellt wird.

Für diese Analysen wurde das konzeptionelle Modell aus Kapitel 5 mit den entsprechenden Untergrundeigenschaften und einem für den Standort repräsentativen geothermischen System untersucht. Die Modelle des Worst Case und Best Case Szenarios wurden durch die Einbindung der in der Literatur verfügbaren minimalen und maximalen Wärmeleitfähigkeiten und hydraulischen Leitfähigkeiten angepasst (Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Parametrisierung des Untergrundes für das Worst und Best Case Szenario am Standort Köln Junkersdorf für die Schicht 1 (Geschiebemergel) und Schicht 2 (sandiger Kies).

Parameter	Schicht	Szenarien		
		Referenz	Worst Case	Best Case
Wärmeleitfähigkeit ¹⁾ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	1	1,1	0,5	3,1
	2	2,0	1,6	2,5
Hydraulische Leitfähigkeit ²⁾ [ms ⁻¹]	1	8,5E-8	1,0E-6	5,0E-5
	2	7,0E-4	5,0E-4	3,0E-3

¹⁾ VDI 4640-1 (2010); ²⁾ Hölting und Coldewey (2013)

6.7.2 Ergebnisse und Diskussion

Einfluss auf das Design von Erdwärmesonden

Für die Untersuchung des Einflusses der Parametrisierung auf das Design von Erdwärmesonden wurde der Ansatz von Panteleit und Reichling (2006) angewendet, und die thermischen Entzugsleistungen und benötigten Installationslängen bestimmt (Gl. 6-1 bis Gl. 6-3). Für das Untersuchungsgebiet in Köln Junkersdorf ergeben sich auf Basis der gemessenen Wärmeleitfähigkeit mittlere thermische Entzugsleistungen von 36,4 Wm⁻¹ (Tabelle 6-5, Abbildung 6-10: a). Bei einem Heizbedarf von 8,2 kW entspricht das einer Installationslänge der Erdwärmesonden von 226 m und Bohrkosten von etwa 11.300 €. Der Vergleich mit den minimalen und maximalen Wärmeleitfähigkeiten zeigt, dass die lokalen thermischen Entzugsleistungen je nach standortspezifischen Untergrundbedingungen zwischen -12 % und +20 % variieren (Abbildung 6-10: a). Da bei der Anwendung der vereinfachten Parametrisierung nicht bekannt ist, welche Untergrundbedingungen tatsächlich an einem untersuchten Standort vorliegen, muss davon ausgegangen werden, dass die Werte im Bereich zwischen den minimal und maximal möglichen Werten liegen. Für den Standort in Köln ergeben sich aus dieser Spannbreite Installationslängen der Erdwärmesonden, die zwischen 189 und 256 m liegen. Erst die standortspezifischen Messungen zeigen, dass die Literaturwerte die Installationslänge und somit auch die Bohrkosten um +30 m (-1.500 €) bzw. -37 m (+1.850 €) über- bzw. unterschätzen (Abbildung 6-10: b).

Auch für den Standort in Köln Junkersdorf resultiert die Nutzung standortspezifischer Daten zur Abschätzung der Betriebskosten in einer Optimierung der Jahresarbeitszahl und des Stromverbrauchs. Unter Anwendung der Parameter, die durch standortspezifische Messungen bestimmt wurden, ergibt sich eine Jahresarbeitszahl von 3,8. Nutzt man die Parameter, die in der Literatur zur Charakterisierung des Untergrundes verfügbar sind, ergeben sich Abweichungen in der Jahresarbeitszahl von -0,9 (für minimale thermische Entzugsleistungen) bzw. +0,1 (für maximale thermische Entzugsleistungen). Diese Abweichungen wiederum resultieren in einer Über- bzw. Unterschätzung des Stromverbrauchs von +1.442 kWh bzw. -69 kWh.

Tabelle 6-5: Vergleich der berechneten Entzugsleistungen, Installationslängen der Erdwärmesonden und Bohrkosten für die Parametrisierung anhand gemessener Werte (Referenz) und minimaler und maximaler Literaturangaben (berechnet nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016).

Parameter	Referenz	Min	Max
Thermische Entzugsleistung [Wm ⁻¹]	36,4	32,1	43,5
Installationslänge [m] ¹⁾	226	256	189
Bohrkosten [€] ²⁾	11.300	12.800	9.450

¹⁾ zur Deckung eines Wärmebedarfs von 8,2 kW

²⁾ unter Annahme von Bohrkosten von 50 € je Bohrmeter

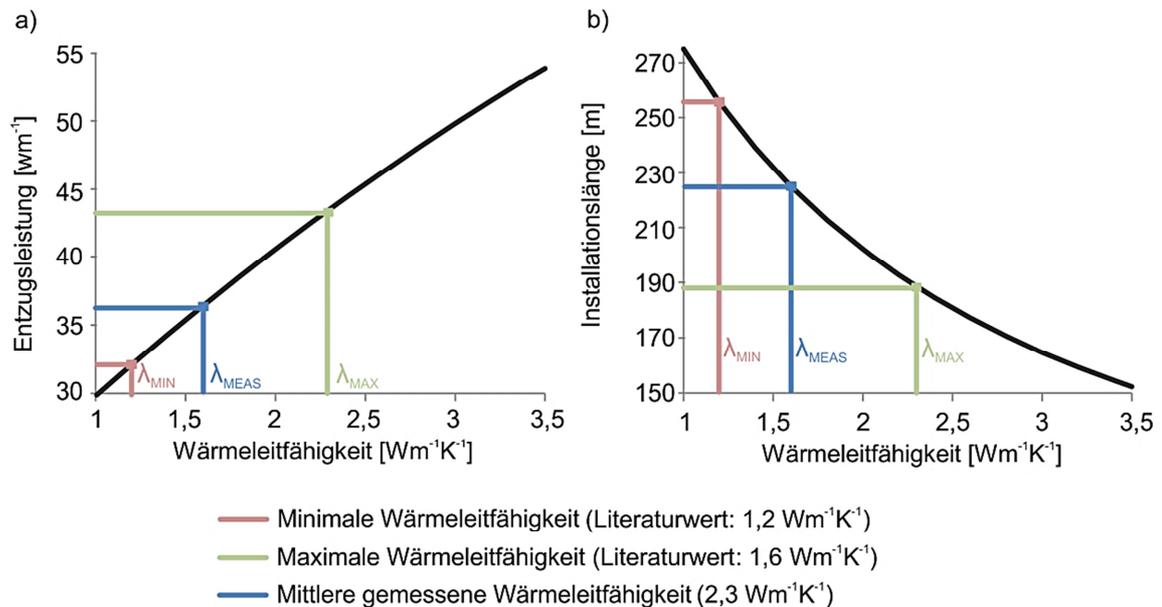


Abbildung 6-10: Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und a) der thermischen Entzugsleistung des Untergrundes sowie b) der benötigten Installationslänge der Erdwärmesonden (berechnet nach Panteleit und Reichling, 2006 und Panteleit, 2016).

Bewertung der modellbasierten Vorhersagen induzierter Temperaturanomalien

Der Vergleich der Best Case und Worst Case Szenarien zeigt den deutlichen Einfluss der Untergrundparametrisierung auf die Intensität und die räumliche Ausdehnung der induzierten Temperaturanomalien. Analog zu den Untersuchungen in Taucha repräsentieren hier sowohl die Worst Case als auch die Best Case Parameter realistische Spannbreiten, die den Untergrund am Standort beschreiben.

Vergleichbar mit den Untersuchungen in Taucha zeigt sich für den Standort in Köln Junkersdorf ein deutlicher Unterschied zwischen dem Worst und Best Case Szenario. Im Best Case Szenario treten nach zehnjähriger Heizperiode minimale Temperaturänderungen im ungesättigten Untergrund auf, die sich auf den Nahbereich der Erdwärmesonde konzentrieren. Im Grundwasserleiter selbst zeigt sich nahezu kein Einfluss der geothermischen Nutzung, da die positiven Wärmetransportbedingungen im Grundwasser durchströmten sandigen Kies eine unmittelbare Nachlieferung der entzogenen Energie zur Folge haben (Abbildung 6-11). Während die maximale Temperaturänderung, die bei beiden Szenarien im Geschiebemergel auftritt, im Best Case 4,32 K beträgt, fällt die Temperatur im Worst Case um 8,36 K (Tabelle 6-6). Ohne Kenntnis der realen Untergrundbedingungen können weder die Intensität der Abkühlung im Nahbereich der Erdwärmesonde noch das Risiko für eine thermische Beeinflussung der im Abstrom gelegenen Systeme bewertet werden.

Tabelle 6-6: Minimale Temperaturen der jeweiligen Schnittebenen des Untergrundes am Ende der zehnten Heizperiode für die Worst Case und Best Case Szenarien bei einer ungestörten Untergrundtemperatur von 11,3 °C.

Schnittebene	Minimale Untergrundtemperatur [°C]	
	Worst Case Szenario	Best Case Szenario
Ungesättigter Geschiebemergel	2,9	7,0
Ungesättigter sandiger Kies	4,4	6,9
Gesättigter sandiger Kies	8,5	10,7

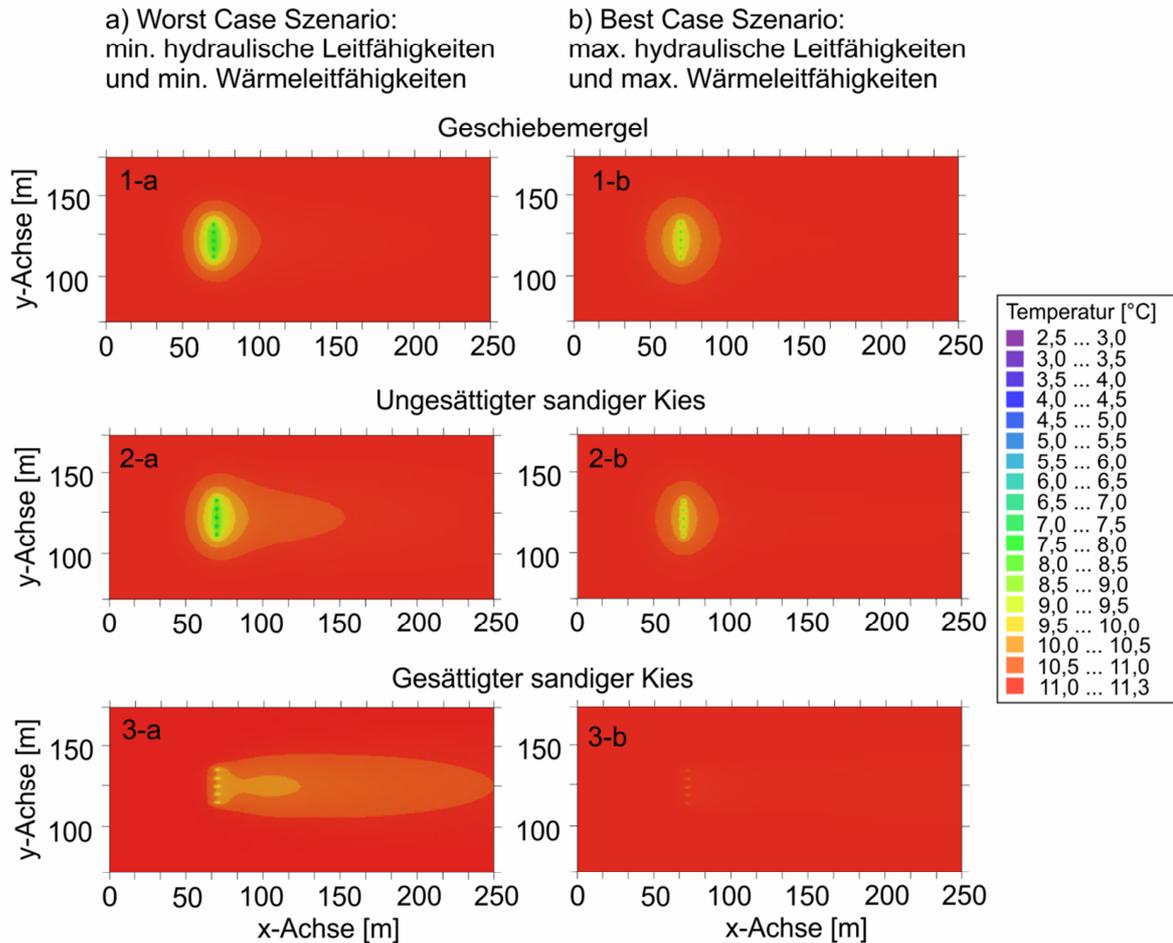


Abbildung 6-11: Induzierte Temperaturanomalien im Bereich der Erdwärmesonden nach einer Betriebsdauer von zehn Jahren und mit einer initialen Untergrundtemperatur von 11,3 °C: Vergleich der Worst Case (1) und Best Case Szenarien (2) mit minimalen bzw. maximalen Wärmeleitfähigkeiten und hydraulischen Leitfähigkeiten im Geschiebemergel (a), ungesättigten sandigen Kies (b) und gesättigten sandigen Kies (c).

6.8 Schlussfolgerung und Ausblick

Ziel der Untersuchungen ist die Prüfung des Einflusses einer standortspezifischen Vorerkundung der Untergrundbedingungen eines Standortes auf die Effizienz und Nachhaltigkeit geothermischer Nutzungen. Im Ergebnis dieser Studie wird deutlich, wie durch eine standortspezifische Erkundung des Untergrundes die Planung geothermischer Systeme verbessert werden kann. Auf Basis erhobener Messdaten wird das Risiko der Über- und Unterdimensionierung oberflächennaher geothermischer Systeme verringert und die Vorhersage der induzierten Temperaturänderungen präzisiert. Somit führt die standortspezifische Planung zu einer Anpassung der Systemeffizienz und Reduzierung der Umweltauswirkungen.

Für die Anwendung der vereinfachten Parametrisierung werden verfügbare Daten, wie z. B. die geologischen Profile nahegelegener Bohrungen, auf den Standort übertragen. Die Unsicherheit, die mit der räumlichen Heterogenität des Untergrundes und der variierenden Qualität und Genauigkeit der Daten einhergeht, wird dabei vernachlässigt bzw. in Form eines Sicherheitszuschlages von bis zu 20 % bei der Ableitung der Installationslängen einbezogen. Die vereinfachte Parametrisierung liefert keine Angaben zu der lokalen Grundwasserfließgeschwindigkeit, sodass der Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ermittlung der Installationslängen unbeachtet bleibt. Diese Vernachlässigung spiegelt sich in der Leistungsfähigkeit der in der Praxis gebräuchlichen Planungstools wie dem Earth Energy Designer (Buildingphysics, 2008) wider. Dieses Tool wird standardmäßig zur Ermittlung der Installationslängen angewendet, und berücksichtigt ausschließlich den konduktiven Wärmetransport (Vergleich Kapitel 4).

Die Parametrisierung des Untergrundes anhand von standortspezifischen Messdaten führt dagegen zu einer Reduzierung der Unsicherheit in der Bestimmung relevanter Wärmetransportparameter. Anhand der Messergebnisse kann die Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes reduziert und damit die Bestimmung der Installationslänge konkretisiert werden. Auch die Bewertung der lokalen Grundwasserhydraulik ermöglicht die Einbeziehung der Advektion auf die Bestimmung der thermischen Entzugsleistungen bei der Berechnung der Installationslängen.

Zudem verbessert die Nutzung belastbarer standortspezifischer Daten zur Parametrisierung von Untergrundmodellen die Zuverlässigkeit in der Vorhersage langfristiger Temperaturänderungen. Die Schwankungsbreite in der Vorhersage der Intensität und Ausbreitung induzierter Temperaturanomalien kann auf Grundlage dieser lokalen Untergrundmodelle zuverlässiger prognostiziert werden. Somit kann das Risiko für das Auftreten thermischer Wechselwirkungen zwischen benachbarten Erdwärmesonden besser evaluiert werden. Auch können genehmigungsrechtliche Vorgaben für maximale Temperaturänderungen überprüft werden. Die Ergebnisse zeigen, dass in einigen Fällen die genehmigungsrechtlichen Vorgaben (beispielsweise keine Änderung der Untergrundtemperatur über die Grundstücksgrenzen hinaus) nicht eingehalten werden. Insbesondere im urbanen Raum mit hoher Anlagendichte ist ein skalenübergreifender und grundstücksunabhängiger Erkundungsansatz zur Charakterisierung relevanter Strömungs- und Wärmetransportprozesse unabdingbar, um eine nachhaltige Nutzung des Untergrundes als thermische Ressource zu gewährleisten und den thermischen Energieentzug /-eintrag zu koordinieren.

Da die detaillierte Erkundung nur angewendet werden kann, wenn sich die Kosten auf eine Mindestanzahl an installierten geothermischen Systemen verteilen, gibt es drei Ansätze,

wie die verbesserte Vorerkundung als Teil der geothermischen Erschließung des Untergrundes implementiert werden kann:

- 1) Eine gemeinsame Erkundung des Wohngebietes mit individueller grundstücksbasierter geothermischer Nutzung: Die Erkundung ist dabei Teil der Wohngebietsererschließung (vergleichbar mit Infrastruktur für Abwasser und Strom) und wird vom Grundstücksentwickler koordiniert. Um die Sicherheit bei der Planung geothermischer Anlagen zu verbessern, werden dem Hausbesitzer die Daten der standortspezifischen Vorerkundung übergeben. Dabei trägt er die Verantwortung für die Wahl des Heizsystems und die Installation sowie den Betrieb des Systems.
- 2) Eine gemeinsame Erkundung des Wohngebietes mit koordinierter Installation: Ein fester Anteil der im Wohngebiet geplanten Häuser (z. B. 50 bis 75 %) nutzt oberflächennahe Geothermie. Die Installation wird durch den Grundstücksentwickler koordiniert. Dabei kann die Planung der Systeme optimiert und das Risiko für thermische Wechselwirkungen minimiert werden.
- 3) Geothermische Energie wird im gesamten Wohngebiet zur Bereitstellung von Wärme bzw. Kälte genutzt und ist Teil der lokalen Infrastruktur: Der Grundstücksentwickler bietet die Nutzung der Geothermie für alle Häuser an, indem er ein geothermisches System installiert, das alle Häuser versorgt (vergleichbar mit der Strom- und Wasserversorgung). Die Installation und Wartung dieser Anlage liegt dabei ebenfalls in der Hand des Grundstücksentwicklers oder wird an einen lokalen Energieversorger übergeben. Diese grundstücksübergreifende Nutzung eröffnet neue Rahmenbedingungen für die Anwendung oberflächennaher Geothermie im urbanen Raum. Beispielsweise ergeben sich neue Optionen wie:
 - die Nutzung von Erdwärmekollektoren unter versiegelten Flächen,
 - eine optimierte, grundstücksunabhängige Anordnung der Erdwärmesonden bzw. Grundwasserbrunnen,
 - die Einbeziehung öffentlicher Flächen wie Parkanlagen und Parkplätzen oder
 - die Anwendung eines Monitoringsystems zur Überprüfung der Anlageneffizienz und der langfristigen Umweltauswirkungen.

Eine detaillierte Vorstellung der dritten Implementierungsoption einschließlich der finanziellen Aspekte der standortspezifischen Erkundung des oberflächennahen Untergrundes und des Betriebes der Wärmepumpe sind in Kapitel 7 dargestellt.

7 Ein Konzept zur nachhaltigen thermischen Erschließung urbaner Wohngebiete

7.1 Einleitung

Konventionell erfolgt die Wärmebereitstellung im urbanen Raum durch Fernwärmenetze, wobei Wohnsiedlungen, Stadtteile bis hin zu ganzen Städten über ein System mit Wärme aus einem dezentral errichteten Heizkraftwerk oder einem Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung versorgt werden. Dafür wird das im Kraftwerk erhitzte Wasser über isolierte Rohrleitungsnetze zum Verbraucher transportiert (Krolkiewicz et al., 2009). Eine mit dieser konventionellen Fernwärmeversorgung vergleichbare umweltschonende und erneuerbare Alternative sind geothermische Nahwärmenetze.

Bereits in Island (Elíasson und Björnsson, 2003), den Vereinigten Staaten (Thorsteinsson und Tester, 2010), China (Xu et al., 2014), der Türkei (Keçebaş, 2011) und Italien (De Carli et al., 2014) wird diese Form der urbanen Wärme- und Kälteversorgung erfolgreich angewendet. Allerdings fokussieren bisherige Anwendungen von geothermischen Fern- bzw. Nahwärmenetzen in der Regel die Erschließung von Mittel- bis Hochenthalpie-Ressourcen. Bei der Erschließung von Niedrigenthalpie-Wärmequellen im oberflächennahen Untergrund dominieren individuelle grundstücksbezogene Installationen erdgekoppelter Wärmepumpen. Wie das städtische Wohngebiet in Köln Junkersdorf (Vergleich Kapitel 5) zeigt, resultiert eine hohe Dichte an installierten Erdwärmesonden in einer intensiven thermischen Nutzung des Untergrundes (Abbildung 7-1). Der geringe Abstand der unabhängig voneinander geplanten und installierten Erdwärmesondensysteme erhöht das Risiko für thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen. Als Folge von thermischen Interaktionen zwischen oberflächennahen geothermischen Systemen kann allgemein gesprochen von einer Verstärkung der absoluten Änderungen der Untergrundtemperatur ausgegangen werden (Vergleich Kapitel 5). Infolgedessen verringert sich das nutzbare geothermische Energiedargebot. Es verschlechtert sich die Systemeffizienz.

Für den nachhaltigen Ausbau der Nutzung der Niedrigenthalpie-Energieformen im urbanen Raum ist ein Wechsel von individuellen Einzelnutzungen hin zu grundstücksübergreifenden Planungsansätzen nötig. Grundlegendes Ziel dieses Ausbaus ist die Steigerung der Systemeffizienz unter Minimierung der Umweltauswirkungen wie der Ausbildung von Temperaturanomalien. Die geothermische Erschließung urbaner Wohngebiete leistet dabei einen Beitrag zur Erreichung dieser Zielstellung. Im Folgenden wird ein Konzept zur grundstücksübergreifenden Nutzung von Erdwärme auf Wohngebietsskala vorgestellt. Fester

Bestandteil des Konzeptes ist die Umsetzung des angepassten Erkundungsansatzes zur standortspezifischen Untergrundparametrisierung (Vergleich Kapitel 6) sowie die Implementierung eines modellbasierten Monitoringkonzeptes zur Vorhersage der mittel- und langfristig induzierten Temperaturänderungen.

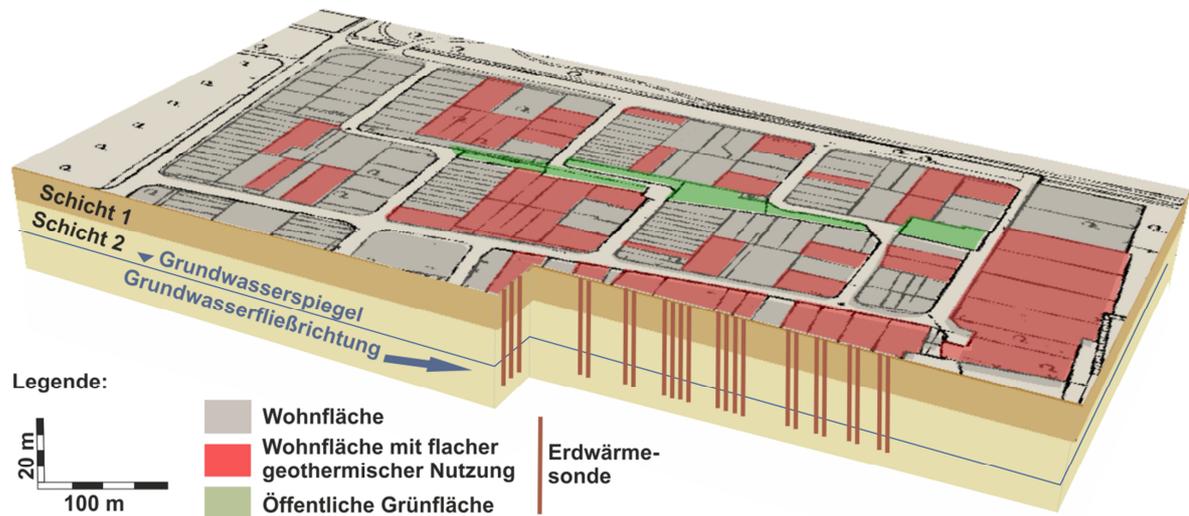


Abbildung 7-1: Dreidimensionales Schema des intensiv geothermisch genutzten Wohngebietes in Köln Junkersdorf (verändert nach Vienken et al., 2015).

7.2 Konzept der geothermischen Wohngebieterserschließung

Das Konzept der oberflächennahen geothermischen Erschließung von Wohngebieten folgt der Zielstellung, den Wärme- und Kältebedarf im urbanen Raum zunehmend aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Da sich in städtischen Wohngebieten der Wärmebedarf (und Kältebedarf) auf Grund der hohen Bebauungsdichte konzentriert, erhöht sich das Potential zum Ausbau der Nutzung des Untergrundes als thermische Ressource. Im Gegensatz zur bisherigen Anwendung erdgekoppelter Wärmepumpen für einzelne Wohnhäuser auf Grundstücksskala werden im Rahmen des Erschließungskonzeptes gesamte Wohngebiete geothermisch versorgt. Grundsteine bei der Planung der geothermischen Wohngebieterserschließung sind neben der standortspezifischen Parametrisierung des Untergrundes auch die Erarbeitung eines Finanzierungskonzeptes (Vergleich Kapitel 7.3) sowie die koordinierte Zusammenarbeit aller Stakeholder. Hauptbeteiligte sind Bauherren, Grundstücksentwickler, Ingenieur- und Planungsbüros, Bohrfirmen, Behörden und städtische Energieversorger. Wie die einzelnen Planungsebenen der geothermischen Wohngebieterserschließung miteinander verknüpft sind, wird im Folgenden anhand der Abbildung 7-2 erläutert.

Konzeptionelle Planung

Ausgangspunkt für die geothermische Wohngebieterserschließung ist ein potentiell mit Erdwärme zu versorgendes städtisches Wohngebiet, für das die konzeptionelle Planung erste Rahmenbedingungen festlegt (Abbildung 7-2: 0.). In der konzeptionellen Planung einbezogen sind die Ermittlung der Zahl der geplanten Wohnhäuser und die Bewertung des Wärme- bzw. Kältebedarfes des gesamten Wohngebietes. Auch gesonderte Nutzungen wie öffentliche Einrichtungen (z. B. Kindergärten) mit abweichendem Energiebedarf werden in diesem Punkt berücksichtigt. Die Details der konzeptionellen Planung für die geothermische Versorgung des Wohngebietes werden im Rahmen dieser Studie nicht erläutert. Der Wärmebedarf der Wohngebäude wird als bekannte Eingangsgröße für die folgenden Arbeitsschritte des Erschließungskonzeptes vorausgesetzt.

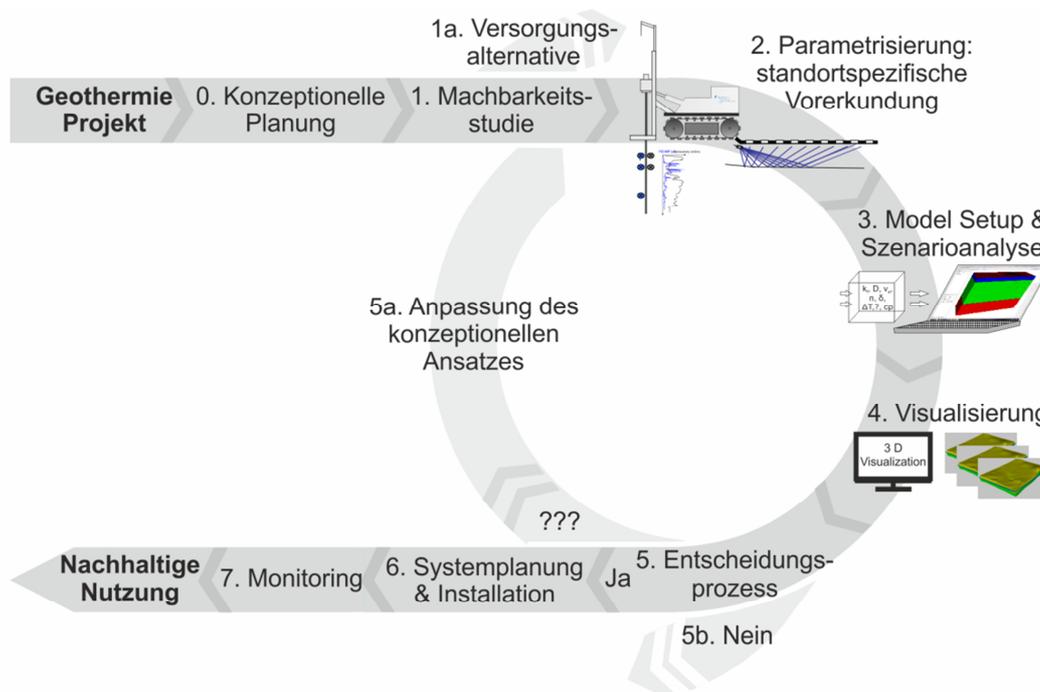


Abbildung 7-2: Konzeptioneller Ansatz für eine geothermische Erschließung urbaner Wohngebiete (verändert nach Vienken et al., 2015).

Machbarkeitsstudie

Die Machbarkeitsstudie prüft die Anwendbarkeit des geplanten geothermischen Nutzungskonzeptes an einem konkreten Standort. Eingangs werden die genehmigungsrechtlichen Grundlagen für die Nutzung von Erdwärme begutachtet (Vergleich Kapitel 3.1.1). Um den Schutz des Grundwassers zu gewährleisten und eine nachhaltige Veränderung der Grundwasserqualität auszuschließen, müssen alle Anforderungen des WHG, BundesbergG, LagerstG sowie alle genehmigungsrechtlichen Vorgaben der Länder erfüllt werden. Abweichend von einer individuellen und grundstücksbasierten Planung gelten bei der geo-

thermischen Erschließung auf Wohngebietsskala auch bergrechtliche Vorgaben zur Nutzung von Erdwärme über die eigenen Grundstücksgrenzen hinaus (BBergG, 1980; Thorsteinsson und Tester, 2010).

Ist die Nutzung von Erdwärmesonden oder Brunnendubletten im Grundsatz genehmigungsfähig, wird das oberflächennahe geothermische Potential des Standortes abgeschätzt. Die Gegenüberstellung des geothermischen Potentials mit dem Wärmebedarf des Wohngebietes zeigt, ob das Energiedargebot des Standortes ausreicht, um eine wirtschaftlich tragbare Wärme- und Kälteversorgung sicherzustellen (Abbildung 7-2: 1.). Die erste Bewertung des standortspezifischen Potentials ist im Kern mit der vereinfachten Untergrundparametrisierung vergleichbar (Vergleich Kapitel 6.3.1). Mit Literaturangaben, regionalen geologischen Karten und Einträgen aus Bohrdatenbanken wird der Untergrund bestmöglich parametrisiert und die geothermische Entzugsleistung bewertet. Sind bereits in diesem Planungsabschnitt Informationen über die zu erwartende Grundwasserfließgeschwindigkeit aus den verfügbaren Daten abzuleiten, wird der Einfluss der Advektion anhand der in Kapitel 4.3.7 dargestellten Klassifizierung abgeschätzt. Resultiert die Zuordnung beispielsweise in Klasse 2, gilt: Den Untergrund charakterisieren mittlere thermische Entzugsleistungen und ein vergleichsweise hohes Risiko für thermische Interaktionen zwischen benachbarten geothermischen Systemen. Zudem erlaubt die Anwendung der Klassifizierung des Einflusses der Advektion auch eine erste Abschätzung des maximalen Wirkungsbereiches der geothermischen Nutzung. Geringe Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers resultieren in kleinräumigen, radialen Temperaturfahnen. Dagegen bilden sich unter mittleren Fließgeschwindigkeiten Fahnen aus, die ihre maximale Ausdehnung im Grundwasserabstrom der Erdwärmesonden erreichen.

Parametrisierung: standortspezifische Vorerkundung

Bestätigt die Machbarkeitsstudie die Eignung des Gebietes zur geothermischen Nutzung (Abbildung 7-2: 1a.), werden standortspezifische Erkundungsuntersuchungen zur Bewertung des nutzbaren Energiedargebotes des oberflächennahen Untergrundes durchgeführt (Abbildung 7-2: 2.). Das geothermische Potential ist dabei wesentlich von den (hydro-) geologischen Bedingungen abhängig, die durch die lokale Stratigraphie, die Grundwasserfließgeschwindigkeit, den Grundwasserflurabstand, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Sedimente bzw. der anstehenden Festgesteine bestimmt werden (Di Sipio et al., 2013; Lo Russo et al., 2012; Pannike et al., 2006; Vandenbohede et al., 2011). Im urbanen Raum wird das geothermische Energiedargebot des Untergrundes zusätzlich zu den natürlichen Wärmetransportprozessen durch anthropogene Wärmequellen wie versiegelte Flächen, Tunnel oder Kanalisationen bestimmt. Dem Beitrag dieser Wärmequellen

zur Bildung städtischer Wärmeinseln muss bei der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes besonders Rechnung getragen werden. Denn zum einen können Wärmeinseln das Potential für den Wärmeentzug aus dem Untergrund verbessern. Zum anderen müssen Wärmeeinträge durch saisonale Wärmespeicherung oder geothermische Kühlung in Bereichen mit anthropogen bereits erhöhten Untergrundtemperaturen kritisch geprüft werden, da sie zur einer zusätzlichen Anhebung der Untergrundtemperaturen führen (Allen et al., 2003; Epting und Huggenberger, 2013; Ferguson und Woodbury, 2007).

Da die relevanten Strömungs- und Wärmetransporteigenschaften des Untergrundes lokal mitunter deutlich variieren können, ist für eine optimierte geothermische Planung eine standortspezifische Vorerkundung nötig. Um dieser Forderung gerecht zu werden, ist der in Kapitel 6.3.2 untersuchte Ansatz zur standortspezifischen Parametrisierung des Untergrundes Teil des Konzeptes zur geothermischen Wohngebietserschließung. Die standortspezifische Vorerkundung beruht auf der Kombination von nicht-invasiven geophysikalischen Messungen (z. B. elektrische Widerstandstomographie) mit minimal-invasiven Methoden (z. B. Direct Push Technologien oder geophysikalischen Bohrlochmessungen). Ziel der geophysikalischen Messungen ist die Bewertung der Untergrundstruktur, insbesondere die Variabilität der Schichtmächtigkeiten. Je komplexer der Untergrund aufgebaut ist, desto mehr Punktmessungen (Sondierungen oder Bohrungen) sind für dessen Charakterisierung nötig. Resultieren die geophysikalischen Untersuchungen in einer gleichmäßigen Untergrundstruktur, reduziert sich die Anzahl der Punktmessungen. Ergänzend zu den bereits erläuterten Methoden gibt Tabelle A-2 im Anhang eine Übersicht über weitere Erkundungsmethoden zur Parametrisierung des oberflächennahen Untergrundes. Details zu den einzelnen Methoden sind den entsprechenden Literaturangaben zu entnehmen. Die Unsicherheiten, die beispielsweise mit der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten oder der Grundwasserfließrichtung einhergehen, sind exemplarisch in Kapitel 6.4.2 diskutiert.

Grundsätzlich gilt, dass trotz Anwendung des standortspezifischen Erkundungsansatzes Unsicherheiten in der Bestimmung relevanter Strömungs- und Wärmetransportparameter beachtet werden müssen. Gründe dafür sind nicht zuletzt die natürliche Heterogenität des Untergrundes sowie die standortspezifische und saisonale Schwankung des Grundwasserflurabstandes und der Fließgeschwindigkeit. Wie die Untersuchungen in Kapitel 6 zeigen, ist die Spannbreite der Untergrundparameter, die aus der vereinfachten Untergrundparametrisierung resultiert, jedoch entscheidend größer als die Unsicherheit standortspezifischer Messungen. Ziel des vorgestellten Erkundungsansatzes ist es daher nicht, den Untergrund hochaufgelöst zu charakterisieren, sondern unter Beachtung der verfügbaren finanziellen Mittel die Planungssicherheit zu steigern. Das Optimum zwischen Erkundungs-

aufwand und Planungssicherheit ist dabei von fallspezifischen Faktoren, wie der Komplexität des Untergrundes, der Qualität und Quantität der im Vorfeld recherchierten Daten, die Art des geplanten geothermischen Systems und auch dem verfügbaren Investitionsrahmen für die Planung und Installation des geothermischen Systems, abhängig.

Modellsetup und Szenarioanalyse

Mit dem Ziel, eine nachhaltige und effiziente thermische Bewirtschaftung des untersuchten Wohngebietes zu gewährleisten, werden modellbasierte Analysen durchgeführt und verschiedene geothermische Nutzungen gegenübergestellt (Abbildung 7-2: 3.). Der Untergrund des Wohngebietes wird in einem dreidimensionalen Modell abgebildet und mit den standortspezifischen Daten parametrisiert.

Zum einen verbessern diese Modelle die Planung der geothermischen Nutzung, indem beispielsweise Anordnungen der Erdwärmesonden getestet oder geschlossenen und offenen Systeme gegenübergestellt werden. Auch die Anwendung abweichender Nutzungsformen wie der saisonalen Speicherung oder der Nutzung von Erdwärmekollektoren unter öffentlichen Flächen kann durch Modellanalysen untersucht werden. Zum anderen dienen die standortspezifischen Modelle der Vorhersage langfristiger Umweltauswirkungen. Die Intensität und räumliche Ausbreitung der durch die thermische Untergrundnutzung induzierten Temperaturanomalien wird vorhergesagt und im Planungsprozess berücksichtigt.

Limitiert wird die Anwendung der Modellstudien neben der Verfügbarkeit der standortspezifischen Daten insbesondere durch die Leistungsfähigkeit der am Markt etablierten Software-Tools und dem mitunter hohen Aufwand für die Erstellung komplexer Untergrundmodelle. Modellbasierte Analysen zur Untersuchung einzelner Erdwärmesonden bzw. einzelner Erdwärmesondensysteme existieren in der Praxis viele. Beispiele für solche Studien veröffentlichten Casasso und Sethi (2014) und Hein et al. (2016) in ihren Untersuchungen zur Effizienz von Erdwärmesonden und Raymond et al. (2011) in der Betrachtung des Einflusses der Grundwasserströmung auf Thermal Response Tests. Betrachtet man einzelne Erdwärmesonden oder vereinfachte Untergrundbedingungen, indem man beispielsweise im Falle einer geringmächtigen ungesättigten Zone von vollständig Grundwasser gesättigten Bedingungen ausgeht (Vergleich Kapitel 4), sind für die mit der Software Feflow durchgeführten Simulationen Rechenzeiten von wenigen Stunden ausreichend. Je mehr Erdwärmesonden allerdings im Modell eingearbeitet und je komplexer die Untergrundbedingungen sind, desto höher sind die Rechenzeiten. Für Untersuchungen mit mehreren geothermischen Systemen und teilgesättigten Bedingungen (Vergleich Kapitel 5) betragen die Rechenzeiten mehrere Tage bis Wochen. Studien, in denen Erdwärmesondenfelder mit bis zu 37 Erdwärmesonden untersucht wurden, veröffentlichten

zum Beispiel Chiasson et al. (2000) und Fan et al. (2007). Sie analysierten den Einfluss der Advektion auf die Nutzung von Erdwärmesonden. Auch Beck et al. (2013) veröffentlichten Untersuchungen zur Optimierung der Anordnung und Effizienz der Erdwärmesonden.

Im Grundsatz ist die Untersuchung größerer Erdwärmesondensysteme, wie die genannten Studien belegen, möglich. Allerdings ist der Aufwand für die Erstellung der Modelle je nach Fragestellung und Komplexität der zu betrachtenden Untergrundbedingungen und geothermischen Nutzungen für die Anwendung in der Planungspraxis kritisch zu prüfen. Je nach Fragestellung kann es zielführend sein, die Modellstudien auf Teilbereiche des Untersuchungsgebietes zu begrenzen, um die Rechenzeiten zu verkürzen.

Visualisierung

Ein weiterer Kerninhalt des entwickelten Konzeptes zur geothermischen Erschließung von Wohngebieten ist die Visualisierung der erhobenen Daten und Ergebnisse der Modellszenarien (Abbildung 7-2: 4.). Die Visualisierung vereinfacht die Identifizierung fehlender Daten und die Prüfung der Konsistenz der Daten aus verschiedenen Quellen (Vienken et al., 2015). Zudem erleichtert sie die Darstellung komplexer Strömungs- und Wärmetransportprozesse im urbanen Untergrund, um die Kommunikation und den Informationsaustausch zwischen allen beteiligten Stakeholdern zu stärken. So kann die räumliche Ausdehnung der zu erwartenden Temperaturanomalien im Untergrund veranschaulicht werden, um in Zusammenarbeit mit den Genehmigungsbehörden geltende Abstandsregelungen und vorgeschriebene thermische Entzugsraten zu bewerten. Im Rahmen öffentlicher Informationsveranstaltungen können die Ergebnisse der geothermischen Vorerkundung und Modellierung den zukünftigen Hauseigentümern erläutert und damit die Akzeptanz und das technologische Verständnis für diese Art der erneuerbaren Energieversorgung gefördert werden (Bilke et al., 2014; Vienken et al., 2015).



Abbildung 7-3: Beispiel der dreidimensionalen Visualisierung: Wohngebiet in Taucha mit weiß gekennzeichneten Grundstücksgrenzen und rot dargestellten Ansatzpunkten für die potentielle Installation von Erdwärmesonden sowie den Ergebnissen der standortspezifischen Untergrunderkundung.

Entscheidungsprozess

Auf Grundlage der standortspezifischen Vorerkundung sowie der Auswertung und Visualisierung der Modellszenarien ist ein Entscheidungsprozess möglich, der vorgibt, ob:

- a) weitere Untersuchungen zur effizienten und nachhaltigen Planung und Dimensionierung der thermischen Untergrundnutzung notwendig sind (Abbildung 7-2: 5a.),
- b) andere Optionen zur Wärme- bzw. Kältebereitstellung geeigneter sind als die Nutzung von Erdwärme (Abbildung 7-2: 5b.) oder
- c) auf Grundlage durchgeführter Untersuchungen die Planung und Installation des geothermischen Systems zur Versorgung des Wohngebietes erfolgen kann (Abbildung 7-2: 6.).

Systemplanung und Installation

Nach der standortspezifischen Planung erfolgt die Installation des grundstücksübergreifenden Systems, wobei Grundkomponenten mit der konventionellen Fernwärme vergleichbar sind. Im Wesentlichen besteht es aus der geothermischen Wärmequelle (z. B. Erdwärmesondenfeld), einem System zur Verteilung der Wärme von der Wärmequelle zum Verbraucher und der Gebäudetechnik (Lund und Lienau, 2009). Die Planung und Installation dieser geothermischen Nutzung erfolgt als Teil der Infrastrukturererschließung des Wohngebietes. Vergleichbar mit der Wasser- und Stromversorgung wird die Systemplanung und Installation vom Grundstücksentwickler koordiniert. Im Rahmen dieser Studie werden die konkreten technischen Optionen und Herausforderungen bei der

Koordination der Nutzung derartiger geothermischer Systeme nicht untersucht. Die Wartung und der Betrieb des Systems werden nach erfolgreicher Installation an einen städtischen Energieversorger übertragen. Dieser garantiert langfristig die Funktionsfähigkeit und koordiniert die Verteilung der Betriebs- und Wartungskosten unter den einzelnen Verbrauchern.

Monitoring

Ein entscheidender Vorteil der geothermischen Wohngebieterserschließung gegenüber der individuellen Installation von geothermischen Systemen ist die Möglichkeit zum Monitoring der Temperaturänderungen auf Wohngebietskala (Abbildung 7-2: 7.).

In Anlehnung an die im Modell prognostizierten Änderungen der Grundwasser- und Bodentemperaturen erfolgt die Anordnung der Monitoringmessstellen. Da ein Monitoring der Einzelsysteme aus Kostengründen in der Regel nicht möglich ist, bietet die Erschließung auf Grundstücksskala die Chance, langfristige Umweltauswirkungen zu überwachen. Dieses Monitoring dient auch als Instrument zur Überprüfung der zum Schutz des Grundwassers und Bodens genehmigungsrechtlich vorgegebenen Temperaturgrenzwerte.

7.3 Finanzierung

Die Kosten für die geothermische Erschließung eines städtischen Wohngebietes gliedern sich in vier Kernbereiche:

- 1) Projektplanungskosten,
- 2) Material- und Installationskosten,
- 3) jährliche Betriebskosten z. B. für Strom und
- 4) Wartungskosten (De Carli et al., 2014).

Anders als bei konventionellen Heizsystemen (wie Öl- oder Gasheizungen) stehen bei geothermischen Systemen erhöhte Investitionskosten zur Errichtung des Systems (Projektplanungs-, Material- und Installationskosten) den geringen Betriebskosten gegenüber (Grzebiela, 2014). Die Amortisationszeit oberflächennaher geothermischer Systeme liegt zwischen fünf bis zehn Jahren (Kim et al., 2010). Um diese Zeit zu verkürzen und zudem die Konkurrenzfähigkeit gegenüber den konventionellen Energieträgern auszubauen, wird eine Minimierung der Anfangsinvestitionen angestrebt. Ein wesentlicher Punkt, der zur Kostensenkung beitragen kann, ist die Reduzierung der Bohrkosten für die Installation der Erdwärmesonden auf Grundlage der standortspezifischen Erkundung und Planung.

Die Gesamtkosten für eine standortspezifische Vorerkundung sind Teil der Projektplanungskosten und variieren je nach Komplexität der lokalen Untergrundbedingungen und

Größe der zu untersuchenden Fläche zwischen 10.000 € und 25.000 €. Zur Übertragung der Punktdaten aus Bohrungen oder Sondierungen auf die Fläche des Untersuchungsgebietes werden geophysikalische Messungen durchgeführt. Je gleichmäßiger die Untergrundstruktur am Standort ist, desto weniger Bohrungen sind nötig, um die Daten auf die Fläche zu übertragen, und desto geringer sind die Bohrkosten. Verglichen mit dem finanziellen Aufwand für das Abteufen einer Bohrung sind geophysikalische Methoden in ihrer Anwendung deutlich günstiger (DVGW, 1996). Die finanziellen Aufwendungen für die Erkundung der Untergrundstruktur mittels geoelektrischer Profilmessungen belaufen sich auf etwa 2.500 € je Profil. Für das Abteufen von Erkundungsbohrungen sind Kosten von ca. 50 € pro Bohrmeter einzuplanen. Zudem müssen zur Bestimmung der standortspezifischen hydrogeologischen Bedingungen Grundwassermessstellen installiert und Stichtagsmessungen der Grundwasserflurabstände durchgeführt werden. Je Messstelle sind etwa 4.500 € einzukalkulieren. Die Durchführung und Auswertung eines Pumpversuches geht mit etwa 2.500 € pro Versuch in die Kalkulation der Gesamtkosten ein. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Untergrundes werden für einen Thermal Response Tests ca. 3.500 € veranschlagt (Sauer et al., 2007). Die Wärmeleitfähigkeit der Grundwasser durchströmten Sedimente kann alternativ oder ergänzend zum Thermal Response Test an Bodenproben im Labor untersucht werden. So wird der Einfluss der Advektion auf die effektiven Wärmeleitfähigkeiten berücksichtigt. Pro Bodenprobe sind dafür etwa 500 € einzuplanen. Die aufgeführten Kostenschätzungen basieren auf persönlichen und telefonischen Auskünften verschiedener Planungs- und Ingenieurbüros und sind daher nicht genauer referenziert.

Grundsätzlich muss bei der Kalkulation der Kosten für die standortspezifische Erkundung der Fokus auf einem ausgeglichenen Aufwand-Nutzen-Verhältnis liegen. Mit dem minimal notwendigen Umfang der Untersuchungen sollte die maximale Einsparung der Planungs- und Installationskosten angestrebt werden. Das Konzept der grundstücksübergreifenden geothermischen Erschließung urbaner Wohngebiete trägt entscheidend zur Optimierung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses bei. Zum einen teilen sich die Kosten für die verbesserte standortspezifische Vorerkundung des Untergrundes auf die Anzahl der im Wohngebiet geplanten Häuser auf, sodass die Kosten für jedes einzelne Haus mit zunehmender Größe des Wohngebietes abnehmen (Abbildung 7-4). Zum anderen ermöglicht die erhöhte Sicherheit in der Bewertung des standortspezifischen geothermischen Potentials eine Reduzierung des maximal einzuplanenden Sicherheitsaufschlags bei der Ermittlung der benötigten Installationslängen.

Für ein mit dem Untersuchungsgebiet in Taucha, Sachsen, vergleichbares Wohngebiet mit etwa 53 geplanten Wohnhäusern (Vergleich Kapitel 6) ergeben sich durch die Aufteilung

der Gesamtkosten der Vorerkundung je nach Umfang der geplanten Erkundungsarbeiten Investitionskosten von 190 € bis 380 € pro Haus. Für eine Fläche mit der Größe des Kölner Wohngebietes mit über 100 Wohnhäusern (Vergleich Kapitel 5.2) ergeben sich bei einer einheitlichen geothermischen Erschließung (abweichend von der tatsächlich am Standort umgesetzten sukzessiven Sanierung und Neuerrichtung) Erkundungskosten von 100 € bis 250 € pro Haus.

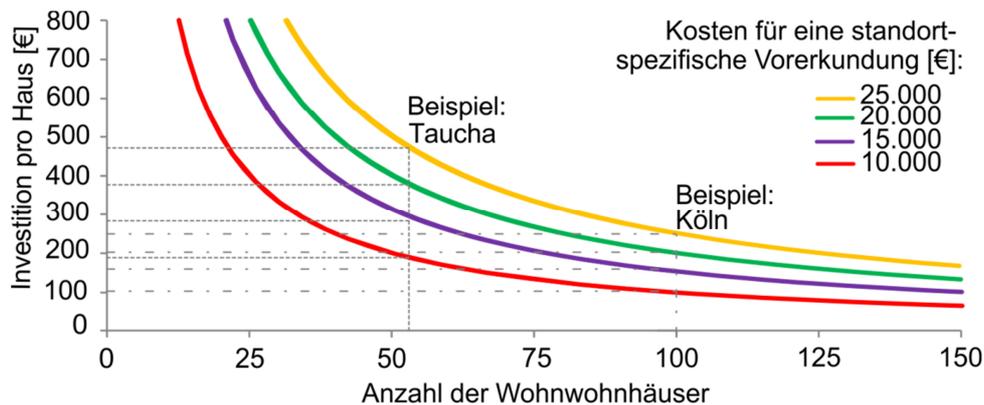


Abbildung 7-4: Abhängigkeit der Investitionskosten pro Haus von der Zahl der Wohnhäuser und der Gesamtinvestitionssumme für eine standortspezifische Untergrundparametrisierung am Beispiel der Untersuchungsgebiete Köln Junkersdorf und Taucha.

Im Vergleich zu den Kosten von mindestens 200 € pro Haus, die ein Ingenieurbüro bei der individuellen Planung auf Grundlage der vereinfachten Parametrisierung berechnet, sind die abgeschätzten Investitionssummen für die einzelnen Wohnhäuser der Wohngebiete insbesondere unter Beachtung der deutlich erhöhten Planungssicherheit tragbar. Es ist anzunehmen, dass sich auch die Installationskosten für eine Gesamterschließung bei der Größe der hier betrachteten Fallstudien, verglichen mit den Kosten für eine individuelle Erschließung, verbessert werden. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass sich die Bohrkosten durch die standortspezifische Erkundung nicht zwangsläufig reduzieren. Führt die vereinfachte Parametrisierung zu einer Überschätzung des geothermischen Potentials, wird die benötigte Installationslänge der Erdwärmesonden unterdimensioniert. In Kapitel 6 ist dieser Fall am Beispiel des Best Case Szenarios dargestellt. Zwar sind die Bohrkosten geringer als die auf Grundlage der standortspezifischen Messungen ermittelten Bohrkosten. Jedoch steigen die Betriebskosten des Systems auf Grund einer schlechteren Jahresarbeitszahl bis hin zum Totalausfall des Systems durch z. B. Gefrieren der Rohrleitungen.

Wie hoch die Investitionsbereitschaft zur Nutzung erneuerbarer Energien ist und mit welchem finanziellen Rahmen eine grundstücksübergreifende Nutzung geplant werden kann, verdeutlicht die folgende Darstellung der Kosten für die individuelle Installation geothermischer Systeme in den untersuchten Wohngebieten. Unter der Annahme, dass ein

Einzelssystem etwa 16.000 € kostet und jedes der im Wohngebiet gebauten Häuser Erdwärme nutzt, ergibt sich in Taucha eine Gesamtinvestition von etwa 848.000 € bzw. in Köln Junkersdorf von über 1.600.000 € (bei über 100 Häusern). Wenn im Kölner Wohngebiet nur die 50 tatsächlich installierten Erdwärmesondensysteme betrachtet werden, entspricht das einer Investitionssumme von etwa 800.000 €.

Die Bewertung der Betriebskosten oberflächennaher geothermischer Systeme ist nicht allein von der Dimensionierung des Systems abhängig. Sie wird zudem durch gebäude- und nutzerspezifische Aspekte, wie der Gebäudedämmung, der Art des Heizsystems, der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, dem Heizverhalten der Nutzer und dem Warmwasserverbrauch, beeinflusst. Der jährliche Stromverbrauch V_s wird in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl ε , dem Wärmebedarf des Gebäudes P_u und den jährlichen Betriebsstunden h wie folgt berechnet (Casasso und Sethi, 2014; Gl. 7-1):

$$(Gl. 7-1) \quad V_s = \frac{P_u}{\varepsilon} h$$

Je geringer die Jahresarbeitszahl ist, desto höher ist der Stromverbrauch des geothermischen Systems. Die Jahresarbeitszahl kann nach Gleichung 6-4 bestimmt werden (Casasso und Sethi, 2014).

Für ein typisches Einfamilienhaus, wie es beispielsweise im Wohngebiet in Taucha installiert sein kann, ergeben sich die in Abbildung 7-5 dargestellten Abhängigkeiten zwischen der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und der Differenz der Vor- und Rücklauftemperatur einer Erdwärmesonde bzw. dem Stromverbrauch der Wärmepumpe. Demnach führt eine Steigerung der Jahresarbeitszahl um 0,25 zu einer Verringerung des Stromverbrauches um 440 kWh. Bei einem Kilowattstundenpreis des Wärmepumpenstroms von etwa 0,2 € ergeben sich durch die Optimierung der Jahresarbeitszahl jährliche Einsparungen von etwa 88 €. Auf eine Laufzeit von 20 Jahren gerechnet, entspricht das einem Wert von etwa 1.760 € pro Haus. Es ist davon auszugehen, dass durch die standortspezifische Planung des geothermischen Systems die Jahresarbeitszahl verbessert wird, da das Risiko für die Über- oder Unterdimensionierung des geothermischen Systems reduziert wird. Folglich entwickeln sich auch der Stromverbrauch der Wärmepumpe und die jährlichen Betriebskosten grundsätzlich positiv.

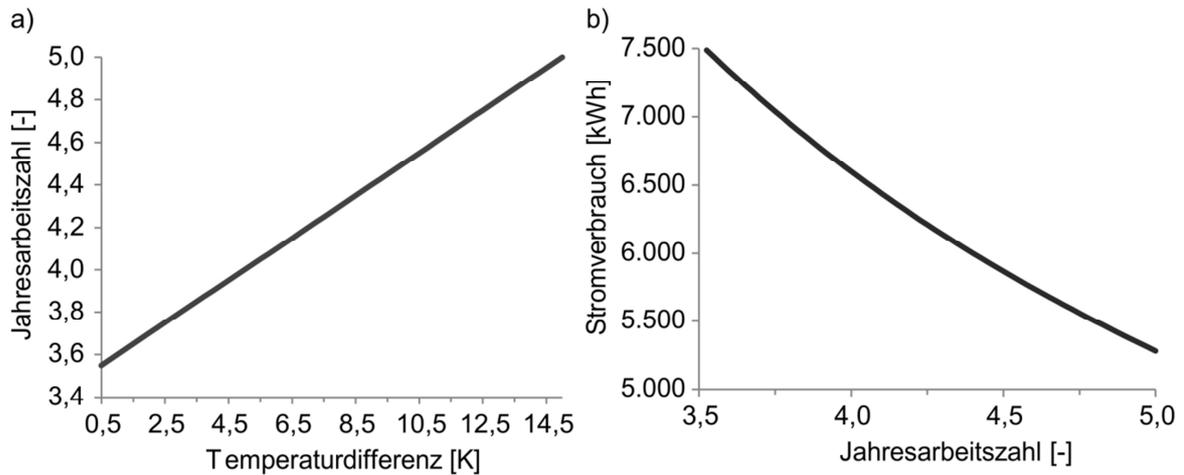


Abbildung 7-5: a) Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl von der Differenz zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur der Erdwärmesonde; b) Korrelation zwischen Jahresarbeitszahl und jährlichem Stromverbrauch einer Wärmepumpe bei einem Wärmebedarf von 11 kW und einer jährlichen Betriebsdauer von 2.400 h.

Einen weiteren wichtigen Beitrag zur Senkung der Kosten, die der Nutzer bei der Anwendung geothermischer Systeme tragen muss, bieten Marktanzreizprogramme. So fördert in Deutschland beispielsweise das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) die Nutzung von Wärmepumpen mit Nennwärmeleistungen von bis zu 100 kW durch finanzielle Zuschüsse. Der Fördersatz für elektrisch betriebene, erdgekoppelte Wärmepumpen (mit Erdwärmesondenbohrung bis 45,0 kW) beträgt beispielsweise 4.500 € (BAFA, 2015). Die Recherche und Inanspruchnahme verfügbarer Förderoptionen ist Teil des Erschließungskonzeptes.

7.4 Übertragbarkeit auf Wohngebiete im Bestand

Der Großteil der in Deutschland existierenden Wohngebäude wurde in den Jahren 1949 bis 1978 errichtet, sodass diese und ältere Wohngebäude einen Anteil von etwa 64 % am gesamten Bestand der Wohngebäude haben (BMW, 2014). Da die Sanierungszyklen bei Gebäudehüllen etwa 30 bis 40 Jahre betragen, zeigt sich in den älteren Bestandsgebäuden ein hohes Potential für eine energetische Sanierung. Das Umdenken in der Wärmebereitstellung durch Nutzung von erneuerbaren Energien spielt dabei eine wichtige Rolle. Bisher ist der tatsächliche Anteil der erneuerbaren Energie am sanierten Bestand noch gering: 6 % der Wohngebäude werden vollständig und 13 % der Wohngebäude anteilig mit erneuerbaren Energien versorgt. Ein Grund dafür ist das Fehlen eines systematischen Sanierungskonzeptes, wodurch nicht zuletzt wegen der finanziellen Rahmenbedingungen und der Unsicherheit der Investoren überwiegend Teilsanierungen umgesetzt werden (BMW, 2014).

Erweitert man die Betrachtungsskala weg von dem einzelnen Wohngebäude hin zu gesamten Wohngebieten, ist eine einheitliche und abgestimmte energetische Sanierung zusätzlich erschwert. Trotz des hohen Potentials zur Nutzung von erneuerbaren Energien wie der Erdwärme, ist die Umsetzbarkeit eingeschränkt. Wie sich auch am Beispiel des Wohngebietes in Köln Junkersdorf zeigt, weichen zum einen die Zeitpunkte der Sanierung der Wohnhäuser aus verschiedensten Gründen voneinander ab. Zum anderen ist auch die Intensität der Sanierung variabel. In Köln Junkersdorf wurden bestehende Gebäude renoviert, kernsaniert oder teilweise neu errichtet. Die Nutzung von Erdwärme bei im Bestand befindlichen Gebäuden sollte mit der Reduzierung des Wärmebedarfes des Gebäudes einhergehen (z. B. durch eine verbesserte Gebäudedämmung) sowie mit der Installation einer Niedertemperaturheizung (ETI, 2009). Darüber hinaus ist die Erschließung von unterirdischen Wärmequellen im Bestand bzw. bei vorhandener dichter Bebauung erschwert, sodass häufig auf Luft-Wasser-Wärmepumpen ausgewichen wird (Platt et al., 2010).

Um die Anwendung des vorgestellten Konzeptes zur geothermischen Erschließung urbaner Wohngebiete auf Bestandsgebäude zu erweitern und das hohe Potential zur Nutzung erneuerbaren Energien mehr auszuschöpfen, müssen verschiedenste Rahmenbedingungen optimiert werden. Davon betroffen ist nicht zuletzt die Entwicklung städteplanerischer Konzepte zur nachhaltigen Energieversorgung im urbanen Raum sowie die Schaffung von Anreizen für die Eigentümer, bei der Sanierung verstärkt auf erneuerbare Energien zu setzen.

7.5 Schlussfolgerung und Ausblick

Wie eine US-Studie zur Nutzung von Mittelenthalpie-Energie zur Wärmebereitstellung in Nahwärmenetzen zeigte, teilen sich die Schwierigkeiten bei der Planung und Umsetzung in drei Kategorien: technisch, sozial/politisch und ökonomisch (Thorsteinsson und Tester, 2010). Um dem fehlenden Wissen und Unsicherheiten in der Beurteilung der Risiken einer geothermischen Erschließung des oberflächennahen Untergrundes vorzubeugen, ist eine Förderung des Informationsaustausches mit der Bevölkerung essentiell. Nicht zuletzt die Abgrenzung zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie spielt dabei eine entscheidende Rolle, da sich die Risiken in der Planung und Erschließung grundlegend unterscheiden. Projekte zur Nutzung von tiefer Geothermie waren, wie das Beispiel des Geothermiekraftwerks in Landau, in dessen Umgebung es zu Bodenhebungen kam, in den vergangenen Jahren negativ in der Öffentlichkeit aufgefallen (ITG, 2014). Durch eine verbesserte Aufklärung der interessierten Bevölkerung und Informationen über Risiken und Potentiale der oberflächennahen Geothermie, kann das Interesse an der thermischen

Untergrundnutzung verstärkt werden. Durch das kritische Hinterfragen der Technologien durch den Nutzer und das Bewusstsein für die Bedeutung der erneuerbaren Technologien verbessert sich die Qualität der Nutzung. Fehlstellen und -funktionen können direkt von Anwendern erkannt werden (Bleicher und Gross, 2015; Thorsteinsson und Tester, 2010). Auch wenn technische Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung des geothermischen Erschließungskonzeptes von den standortspezifischen Bedingungen abhängen, sind die Grundvoraussetzungen für technische Umsetzung gegeben.

Die geothermische Erschließung von Niedrigenthalpie-Ressourcen auf Wohngebietsskala bietet den Vorteil, dass ein Fündigkeitsrisiko, verglichen mit Mittel- bis Hochenthalpie-Wärmequellen, nicht besteht. Die durchschnittliche Temperatur des oberflächennahen Untergrundes ist unabhängig von saisonalen Schwankungen ganzjährig konstant. Für die Anwendung erdgekoppelter Wärmepumpen reicht die im Untergrund gespeicherte Energie aus, um das benötigte Temperaturniveau des Heizsystems (im Durchschnitt 30 °C: Loose, 2007) zu erreichen. Der zweite Vorteil geht mit der Erweiterung der Betrachtungsskala einher. Anders als bei individuellen Systemen bietet die grundstücksübergreifende Planung den Vorteil der standortspezifischen Erkundung relevanter Untergrundeigenschaften für eine optimierte Planung des Systems. Zudem ist ein angepasstes Monitoring der Anlageneffizienz und der Umweltauswirkungen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten planbar und technisch umsetzbar, sodass ein effizienter und umweltschonender Betrieb der Systeme gewährleistet wird. Außerdem werden Erdwärmesonden bzw. Brunnendubletten unabhängig von den Grundstücksgrenzen so geplant, dass eine optimale Konfiguration möglich ist. Damit minimiert sich das Risiko für Wechselwirkungen mit thermischen und nicht-thermischen Untergrundnutzungen wie beispielsweise der Superposition von Temperaturfahnen. Die Kombination verschiedener Grundsysteme (Erdwärmesonden und Brunnendubletten) zur optimalen Ausnutzung der verfügbaren Energie stellt dabei eine interessante Erweiterung bisheriger Nutzungen dar. Beispielsweise werden Erdwärmekollektoren unter versiegelten Flächen (z. B. Parkplätzen oder Straßen) installiert oder Mittel- bis Hochenthalpie-Wärme aus Solarkollektoren in den Untergrund eingespeist, um das nutzbare geothermische Potential zu steigern.

Die Nutzung erneuerbarer Energien bei der Wärmebereitstellung sollte als Kernpunkt in der Stadtentwicklung gefördert werden, indem man geeignete Potentialflächen zur grundstücksübergreifenden thermischen Erschließung des Untergrundes ausweist. Anhand von Pilotstudien kann die Umsetzbarkeit des entwickelten Konzeptes in der Praxis untersucht und Herausforderungen identifiziert werden. Ergänzend zu der Untersuchung städtischer Wohngebiete ist das Potential anderer urbaner Strukturen mit räumlich konzentriertem Wärme- bzw. Kältebedarf wie Industrie- und Gewerbegebiete zu prüfen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Obwohl schon 1914 das erste Patent zur Nutzung von erdgekoppelten Wärmepumpen veröffentlicht wurde, ist in Deutschland der Trend zur thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes vergleichsweise jung (Bleicher und Gross, 2015; Statista, 2015). Wie das Wohngebiet in Köln Junkersdorf beispielhaft zeigt, stieg in den letzten Jahren das Interesse an der geothermischen Energieversorgung vor allem im urbanen Raum zunehmend. Auf Grund der hohen Bebauungsdichte konzentriert sich der Wärmebedarf in städtischen Gebieten auf einer vergleichsweise geringen Fläche. Daraus resultiert eine hohe Dichte an installierten Erdwärmesondensystemen, zwischen denen Abstände von zum Teil nur wenigen Dekametern liegen. Die Erschließung dieser geothermischen Systeme zur Wärme- und Kälteversorgung der Wohnhäuser erfolgte bisher in der Regel individuell durch die einzelnen Hauseigentümer. So werden die Systeme zumeist unabhängig von benachbarten Systemen geplant, installiert und betrieben. Nachteilig an dieser grundstücksbasierten geothermischen Untergrundnutzung sind folgende Kernpunkte:

- 1) Auf Grund der grundstücksbasierten Planung durch die einzelnen Bauherren lässt das begrenzte Investitionsvolumen keine standortspezifische Vorerkundung des Untergrundes und Dimensionierung der Systeme durch Fachplaner zu. Stattdessen muss auf vereinfachte Angaben aus der Literatur und aus verfügbaren Karten zurückgegriffen werden.
- 2) Die Einschränkung der Betrachtungsskala auf die Grundstücksfläche führt zu einer Vernachlässigung der Temperaturänderungen, die über die Grundstücksgrenzen hinausreichen. Thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen bleiben dadurch unbeachtet.

Ziel der in dieser Arbeit vorgestellten Studien ist es daher, die Bedeutung dieser Nachteile für die Effizienz und Nachhaltigkeit geothermischer Nutzungen im urbanen Raum zu untersuchen. Ausgangspunkt dieser Untersuchungen ist die Identifizierung der für den oberflächennahen Energieentzug relevanten Untergrundparameter und Wärmetransportprozesse. Gegenwärtig gilt die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bei der Planung geothermischer Systeme mit Heizleistungen kleiner als 30 kW als Schlüsselparameter zur Beschreibung des konduktiven Wärmetransportes. Die Grundwasserfließgeschwindigkeit als Kenngröße der Advektion, die die verfügbaren, thermischen Entzugsleistungen und induzierten Temperaturanomalien beeinflusst, wird in der Regel vereinfacht betrachtet oder vernachlässigt.

Die Szenariensimulationen zur Identifizierung der für die geothermische Nutzung relevanten Wärmetransportprozesse bestätigen einen hohen Einfluss der Advektion auf das geothermische Potential des Untergrundes. Schon geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten ab $0,01 \text{ m d}^{-1}$ führen zur Verdopplung bis hin zur Verdreifachung der thermischen Entzugsleistung. Wie hoch der Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die thermische Entzugsleistung ist, kann anhand einer aus den Simulationen abgeleiteten Gleichung abgeschätzt werden. Diese Gleichung zur Berücksichtigung der Advektion bei der Bewertung des geothermischen Potentials bietet damit eine Alternative zu den Ansätzen, die auf Grundlage eines rein konduktiven Wärmetransportes entwickelt wurden. Zudem belegen die Simulationen, dass der Einfluss der Advektion mit zunehmender Mächtigkeit des Grundwasserleiters steigt. Bereits ab einem Anteil des Grundwasserleiters von 10 % an der erschlossenen Tiefe ist davon auszugehen, dass die Advektion die thermische Entzugsleistung des Standortes wesentlich beeinflusst und somit bei der Planung oberflächennaher geothermischer Systeme berücksichtigt werden muss.

Anders als Grundwasser durchströmte Sedimente zeigen ungesättigte Schichten schlechte Voraussetzungen für einen effizienten Wärmeentzug. In ihr sind die Abkühlungen im Umfeld der Erdwärmesonde am stärksten. Daher sind sie die Schichten des Untergrundes, die bei der Bewertung maximaler Temperaturänderungen betrachtet werden müssen. Eine Vernachlässigung der ungesättigten Zone kann insbesondere an Standorten mit einem vergleichsweise großen Grundwasserflurabstand zu einer Fehleinschätzung des geothermischen Potentials führen. Wie durch die Vernachlässigung der Advektion bei der Bewertung des geothermischen Potentials steigt auch durch die Unterschlagung der ungesättigten Zone in der Systemplanung das Risiko für eine Unter- oder Überdimensionierung. Überdimensionierte geothermische Systeme kennzeichnen überhöhte Installationskosten, die zu einer Verschlechterung der Konkurrenzfähigkeit erdgekoppelter Wärmepumpen gegenüber anderen Technologien wie Luftwärmepumpen und konventionellen Energieträgern führen. Unterdimensionierte Systeme haben vergleichsweise hohe Betriebskosten und ein stärkeres Risiko für Frost-Tau-Wechsel, die sogar zu einem Systemausfall führen können.

Im direkten Zusammenhang mit dem geothermischen Potential eines Standortes steht das Risiko für thermische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Erdwärmesondensystemen. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten wird durch den advektiven Wärmetransport ausreichend Energie nachgeliefert, sodass sich die induzierten Temperaturänderungen bereits in einem Abstand von 10 m regenerieren. Dabei ist das Risiko für eine gegenseitige Beeinflussung der induzierten Temperaturanomalien mit negativen Auswirkungen auf den Systembetrieb vergleichsweise gering. Im Gegensatz dazu können thermische Interaktionen zwischen Erdwärmesondensystemen, die sich negativ auf den Systembetrieb

auswirken, bei rein konduktivem Wärmetransport sowie geringen bis mittleren Fließgeschwindigkeiten nicht ausgeschlossen werden. Im Ergebnis der Simulationen wird deutlich, welchen wesentlichen Einfluss die Untergrundbedingungen auf die Ausbildung von Temperaturfahnen haben. Allerdings gelten die genehmigungsrechtlich vorgeschriebenen Mindestabstände zwischen benachbarten geothermischen Systemen unabhängig von den standortspezifischen Standortbedingungen wie der Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Fließrichtung. Somit sind diese Mindestabstände nicht geeignet, um negative Wechselwirkungen zwischen einzelnen Erdwärmesondensystemen bei einer intensiven geothermischen Nutzung auszuschließen.

Insgesamt zeigen die Szenariensimulationen, dass eine vereinfachte Betrachtung der Untergrundcharakteristika je nach Standortbedingungen zu einer Fehleinschätzung des standortspezifischen geothermischen Potentials führen kann. Folglich ist die Betrachtung homogener Grundwasser gesättigter Untergrundbedingungen ohne Grundwasserströmung, wie sie beispielsweise in dem Planungstool Earth Energy Designer implementiert ist, für das Design der geothermischen Systeme nicht in jedem Fall geeignet. Zudem erschwert eine Vereinfachung der Untergrundbedingungen die Vorhersage induzierter Temperaturanomalien. Diese Unsicherheiten, die aus den vereinfachten Untergrundbedingungen für das Systemdesign und die Bewertung der Temperaturänderungen resultieren, stehen im Widerspruch zu einer effizienten und nachhaltigen thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes im urbanen Raum.

Um das geothermische Potential und mögliche thermische Wechselwirkungen an einem Standort richtig zu bewerten, ist die Erhebung standortspezifischer Daten zur Charakterisierung relevanter Wärmetransportprozesse nötig. Diese Datenerhebung geht mit einer Steigerung des Planungsaufwandes für die Durchführung der Vor-Ort-Untersuchungen einher. Um diesen Mehraufwand gegenüber der vereinfachten Planung auf Basis von Literaturwerten zu rechtfertigen, muss der Vorteil der standortspezifischen Erkundung untersucht werden. Daher erfolgt im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen die Gegenüberstellung der vereinfachten Untergrundparametrisierung anhand von Karten- und Literaturangaben mit der standortspezifischen Untergrundparametrisierung. Kernpunkt der standortspezifischen Parametrisierung ist die Kombination von nicht-invasiven mit minimal-invasiven Erkundungsmethoden, um alle relevanten Untergrundeigenschaften zu bestimmen und den Erkundungsumfang möglichst gering zu halten. Anhand von Szenariensimulationen wird an einem Fallbeispiel der Einfluss der Untergrundparametrisierung auf das Systemdesign und die Vorhersage induzierter Temperaturanomalien gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung beider Parametrisierungsansätze am Beispiel des städtischen Wohngebietes zeigt, dass standortspezifische Daten die Genauigkeit in der

Ermittlung der lokalen tiefenorientierten thermischen Entzugsleistungen verbessert und somit die Planungssicherheit steigert. Durch die Kenntnis der Grundwasserdynamik kann das geothermische Potential genauer bestimmt werden und auch die Vorhersage induzierter Temperaturanomalien ist belastbarer. Das Risiko für potentielle, negative Wechselwirkungen zwischen benachbarten Systemen wird eingegrenzt und Maßnahmen zur Risikominimierung können gegebenenfalls umgesetzt werden.

Allerdings stellt das, verglichen mit der vereinfachten Parametrisierung, hohe Investitionsvolumen für die Durchführung der Erkundungsuntersuchungen eine scheinbare Herausforderung dar. Die Lösung für die praktische Umsetzung der verbesserten Untergrundbewertung auf Basis von Messdaten liegt in einem Wechsel der Betrachtungsskala. Sie muss sich von der geothermischen Erschließung auf Grundstücksskala lösen und auf gesamte Wohngebiete erweitert werden. Daher sollte der konzeptionelle Ansatz für die geothermische Erschließung keine grundstücksbasierten Planungen fokussieren, sondern eine einheitliche Bewirtschaftung gesamter Wohngebiete im urbanen Raum vorsehen. Die standortspezifische Erkundung der als relevant identifizierten Untergrundbedingungen ist dabei ebenso Bestandteil des Konzeptes wie die Anwendung von Softwaretools zur Gegenüberstellung verschiedener Nutzungsszenarien und die Beteiligung der Öffentlichkeit zur Steigerung des Interesses und der Akzeptanz geothermischer Anwendungen. Ergänzend werden auch die finanziellen Rahmenbedingungen und die Einschränkungen bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden diskutiert.

Insgesamt ist die derzeit in der Praxis umgesetzte geothermische Erschließung einzelner Wohnhäuser eine gute Grundlage für die zunehmende Nutzung von erneuerbaren Energien. Jedoch bleibt das Potential zur Verbesserung der Planungssicherheit und Integration neuer Technologien als Option der städtischen Wärmeversorgung häufig ungenutzt. Um die Anwendung einer verbesserten standortspezifischen Erkundung der Untergrundbedingungen für den advektiven und konduktiven Wärmetransport umzusetzen, bedarf es einer Erweiterung der Betrachtungsskala zur Implementierung grundstücksübergreifender geothermischer Erschließungskonzepte. Zukünftige Forschungsprojekte sollten die Herausforderungen und Optionen der Anwendung des vorgestellten Erschließungskonzeptes anhand eines Pilotprojektes untersuchen. Dabei sollten auch Ansätze evaluiert werden, die zu einer Erweiterung der bisher in der Praxis üblichen Designtools beitragen, sodass diese zukünftig auch der Bedeutung Grundwasser durchströmter und ungesättigter Schichten auf das geothermische Potential gerecht werden. Neben der geothermischen Erschließung von Wohngebieten sollte auch das geothermische Potential anderer urbaner Strukturen wie Gewerbe- und Industriegebiete untersucht und die Entwicklung städteplanerischer Konzepte zur regenerativen Energieversorgung eingebunden werden.

Referenzen

- A -

- Ad-hoc-AG Hydrogeologie, 2016. Regionale Hydrogeologie von Deutschland - Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. Geologischen Jahrbuch. Hannover.
- Al-Khoury, R., 2012. Computational modeling of shallow geothermal systems. CRC Press, Boca Raton.
- Al-Khoury, R., Bonnier, P.G., 2006. Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: transient. *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 67, 725–745. doi:10.1002/nme.1662.
- Al-Khoury, R., Bonnier, P.G., Brinkgreve, R.B.J., 2005. Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: steady state. *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 63, 988–1013. doi:10.1002/nme.1313.
- Allen, A., Milenic, D., Sikora, P., 2003. Shallow gravel aquifers and the urban “heat island” effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics* 32, 569–578. doi:10.1016/S0375-6505(03)00063-4.
- Arning, E., Kölling, M., Schulz, H.D., Panteleit, B., Reichling, J., 2006. Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. *Grundwasser* 11, 27–39. doi:10.1007/s00767-006-0116-0.
- ASTM Standards D 5334-00, 2000. Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. West Conshohocken. U.S.

- B -

- BAFA - Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2015. Wärmepumpe: Grundwissen zum Marktanreizprogramm: http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/waermepumpen/publikationen/energie_ee_wp_grundwissen.pdf. (letzter Zugriff am 24.09.2015).
- Bakker, M., Caljé, R., Schaars, F., van der Made, K.-J., de Haas, S., 2015. An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment: heat tracer experiments with vertical fiber optic cables. *Water Resources Research* 51, 2760–2772. doi:10.1002/2014WR016632.
- Ballard, S., 1996. The in situ permeable flow sensor: A ground-water flow velocity meter. *Ground Water* 34, 231–240. doi:10.1111/j.1745-6584.1996.tb01883.x.
- Bauer, D., 2011. Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Bauer, S., Beyer, C., Dethlefsen, F., Dietrich, P., Duttmann, R., Ebert, M., Feeser, V., Görke, U., Köber, R., Kolditz, O., Rabbel, W., Schanz, T., Schäfer, D., Würdemann, H., Dahmke, A., 2013. Impacts of the use of the geological subsurface for energy storage: an investigation concept. *Environmental Earth Science* 70, 3935–3943. doi:10.1007/s12665-013-2883-0.

- Baumann, M., Laue, H.J., Müller, P., 2006. Wärmepumpen: Heizen mit Umweltenergie, 4. Auflage, Solarpraxis, Berlin.
- Bayer, P., de Paly, M., 2014. Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling. *Applied Energy* 136, 445–453. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.029.
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., Blum, P., 2012. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1256–1267. doi:10.1016/j.rser.2011.09.027.
- BBergG - Bundesberggesetz. Deutscher Bundestag. in der Fassung vom 13.08.1980.
- BBodSchG - Bundesbodenschutzgesetz - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Deutscher Bundestag. in der Fassung vom 17.03.1998.
- Beck, F.P., Clark, P.J., Puls, R.W., 2000. Location and characterization of subsurface anomalies using a soil conductivity probe. *Ground Water Monitoring & Remediation* 20, 55–59. doi:10.1111/j.1745-6592.2000.tb00265.x.
- Beck, M., Bayer, P., de Paly, M., Hecht-Méndez, J., Zell, A., 2013. Geometric arrangement and operation mode adjustment in low-enthalpy geothermal borehole fields for heating. *Energy* 49, 434–443. doi:10.1016/j.energy.2012.10.060.
- Benz, S., 2009. Rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie. BWV, Berliner Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Bertermann, D., Klug, H., Morper-Busch, L., 2015. A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy potentials. *Renewable Energy* 75, 335–347. doi:10.1016/j.renene.2014.09.033.
- Beyer, W., 1964. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*, 14. 165–168.
- Bilke, L., Fischer, T., Helbig, C., Krawczyk, C., Nagel, T., Naumov, D., Paulick, S., Rink, K., Sachse, A., Schelenz, S., Walther, M., Watanabe, N., Zehner, B., Ziesch, J., Kolditz, O., 2014. TESSIN VISLab—laboratory for scientific visualization. *Environmental Earth Science* 72, 3881–3899. doi:10.1007/s12665-014-3785-5.
- Bleicher, A., Gross, M., 2015. User motivation, energy prosumers, and regional diversity: sociological notes on using shallow. *Geothermal Energy* 3, 12. doi:10.1186/s40517-015-0032-6.
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung der Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat, Stand Dezember 2016): http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (letzter Zugriff am 14.01.2017).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015. Erneuerbare Energien im Jahr 2014: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erneuerbare-energien-im-jahr-2014,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (letzter Zugriff am 27.04.2015).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014. Sanierungsbedarf im Gebäudebestand - Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/sanierungsbedarf-im-gebäudebestand,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (letzter Zugriff am 16.01.2016).

- BNatSchG: Bundesnaturschutzgesetz - Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Deutscher Bundestag. in der Fassung vom 29.07.2009.
- Bockelmann, F., Fisch, N.M., Kipry, H., 2010. Erdwärme für Bürogebäude nutzen. BINE Informationsdienst, Stuttgart.
- Boenigk, W., 1978. Die flußgeschichtliche Entwicklung der Niederrheinischen Bucht im Jungtertiär und Altquartär. *Eiszeitalter und Gegenwart* 28, 1–9.
- Bohne, K., Horn, R., Baumgartl, T., 1993. Bereitstellung von van-Genuchten-Parametern zur Charakterisierung der hydraulischen Bodeneigenschaften. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 156, 229–233. doi:10.1002/jpln.19931560307.
- Boockmeyer, A., Bauer, S., 2014. High-temperature heat storage in geological media: high-resolution simulation of near-borehole processes. *Géotechnique Letters* 4, 151–156. doi:10.1680/geolett.13.00060.
- Bording, T.S., Søren, B., Balling, N., 2016. A transient divided-bar method for simultaneous measurements of thermal conductivity and thermal diffusivity. *Geophysical Research Abstract*, EGU General Assembly.
- Bouwer, H., Rice, R.C., 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*. 12, 423–428. doi:10.1029/WR012i003p00423.
- Brielmann, H., Lueders, T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P., Griebler, C., 2011. Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. *Grundwasser* 16, 77–91. doi:10.1007/s00767-011-0166-9.
- Bristow, K., White, R., Kluitenberg, G., 1994. Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating. *Australian Journal of Soil Research* 32, 447. doi:10.1071/SR9940447.
- Bristow, K.L., 1998. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology* 89, 75–84. doi:10.1016/S0168-1923(97)00065-8.
- Bristow, K.L., Campbell, G.S., Calissendorff, K., 1993. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Science Society of America Journal* 57, 930. doi:10.2136/sssaj1993.03615995005700040008x.
- Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J., Zehnder, A.J.B., 1991. (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Research* 25, 729–736. doi:10.1016/0043-1354(91)90048-U.
- Buildingphysics, 2008. Manual EED Earth Energy Designer 3.0. Blocon.
- Bundesverband Geothermie, 2016. Nutzung der Geothermie in Deutschland. - Oberflächennahe Geothermie: <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/in-deutschland.html> (letzter Zugriff am 14.01.2017).
- Bundesverband Geothermie, Wirtschaftsforum Geothermie, 2015. Geothermie Erneuerbare Energie für den Wärmemarkt. http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Hintergrundpapier_Geothermie_-_EE_fuer_den_Waermemarkt.pdf (letzter Zugriff am 22.06.2015).
- Bürger, F.-J., Neschen, T., 2012. Energieeffizientes Bauen Teil 3. Teil 3. Shaker, Aachen.

- Bußmann, W., 2012. Geothermie - Energie aus dem Innern der Erde. Fraunhofer Irb Verlag.
- Butler, J.J., 2005. Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity, in: Y. Rubin, S.S. Hubbard (Eds.) Hydrogeophysics. Springer, Dordrecht.
- Butler, J.J., 2002a. A simple correction for slug tests in small-diameter wells. *Ground Water* 40, 303–308. doi:10.1111/j.1745-6584.2002.tb02658.x.
- Butler, J.J., 1997. The design, performance, and analysis of slug tests. CRC Press, Boca Raton.
- Butler, J.J., Garnett, E.J., 2000. Simple procedures for analysis of slug tests in formations of high hydraulic conductivity using spreadsheet and scientific graphics software, in: K.G. Survey.
- Butler, J.J., Healey, J.M., McCall, G.W., Garnett, E.J., Loheide, S.P., 2002b. Hydraulic tests with direct-push equipment. *Ground Water* 40, 25–36. doi:10.1111/j.1745-6584.2002.tb02488.x.
- Butler, J.J., Healey, J.M., Zheng, L., McCall, W., Schulmeister, M.K., 1999. Hydrostratigraphic characterization of unconsolidated alluvial deposits with direct-push sensor technology, Kansas Geological Survey.
- Butscher, C., Bayer, P., Auckenthaler, A., Bänninger, D., 2011. Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. *Grundwasser* 16, 13–24. doi:10.1007/s00767-010-0154-5.
- BWP - Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2012. Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern.

- C -

- Campanella, R.G., Weemees, I., 1990. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies. *Can. Geotech. J.* 27, 557–567. doi:10.1139/t90-071.
- Campbell, G.S., Calissendorff, C., Williams, J.H., 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society of America Journal* 55, 291. doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500010052x.
- Capozza, A., De Carli, M., Zarrella, A., 2012. Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: A literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. *Energy and Buildings, Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World* 55, 369–379. doi:10.1016/j.enbuild.2012.08.041.
- Carlsaw, H.S., Jaeger, J.C., 1986. *Conduction of heat in solids*, Second. ed. Oxford University Press, New York.
- Casasso, A., Sethi, R., 2014. Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis. *Renewable Energy* 62, 737–745.
- Chiasson, A.D., Rees, S.J., Spitler, J.D., 2000. A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground source heat pump systems. *ASHRAE Trans.* 106, 380–393.
- Christy, C.D., Christy, T.M., Wittig, A., 1994. A percussion probing tool for the direct sensing of soil conductivity, Report of Geoprobe Systems. Salina, Kansas.
- Clauser, C., 2003. Numerical simulation of reactive flow in hot aquifers - SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer, Berlin.

Clayton, C.R.I., 1995. The standard penetration test (SPT): methods and use. Construction Industry Research and Information Association, Report R 143.

- D -

De Carli, M., Galgaro, A., Pasqualetto, M., Zarrella, A., 2014. Energetic and economic aspects of a heating and cooling district in a mild climate based on closed loop ground source heat pump. Applied Thermal Engineering, Special Issue: MICROGEN III: Promoting the transition to high efficiency distributed energy systems 71, 895–904. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.01.064.

De Vries, D.A., 1963. Thermal properties of soils, in: Van Wijk, W.R.: Physics of Plant Environment. Wiley, New York, pp. 210–235.

Decagon Devices, 2011. KD2 Pro thermal properties analyzer operator's manual. Decagon Devices Inc., Pullmann.

Dehkordi, S.E., Schincariol, R.A., 2012. Thermal effect of hydrogeological factors on closed-loop ground source geothermal systems. Beitrag der 3. International FEFLOW® User Conference. Berlin.

DGG und DGGT - Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften und Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, 2014. Empfehlung Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie. Ernst & Sohn, Berlin.

DHI-WASY, 2013. FEFLOW 6.2 Finite element subsurface flow and transport simulation system - User manual: <http://www.mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/feflow%206.2%20user%20manual.pdf> (letzter Zugriff am 27.05.2015).

DHI-WASY, 2010. Feflow White Papers Vol. 5: <https://www.mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/feflow%20white%20papers%20vol.5.pdf> (letzter Zugriff am 16.01.2016).

DHI-WASY, 1979 - 2016. FEFLOW 7.0 Finite-element simulation systems for subsurface flow and transport processes.

Di Sipio, E., Chiesa, S., Destro, E., Galgaro, A., Giaretta, A., Gola, G., Manzella, A., 2013. Rock thermal conductivity as key parameter for geothermal numerical models. Energy Procedia 40, 87–94. doi:10.1016/j.egypro.2013.08.011.

Diao, N., Li, Q., Fang, Z., 2004. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. International Journal of Thermal Sciences 43, 1203–1211. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009.

Dickinson, J.S., Buik, N., Matthews, M.C., Snijders, A., 2009. Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. Géotechnique 59, 249–260. doi:10.1680/geot.2009.59.3.249.

Diersch, H.-J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P., 2011a. Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals. Computers & Geosciences 37, 1122–1135. doi:10.1016/j.cageo.2010.08.003.

Diersch, H.-J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P., 2011b. Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 2. Numerical simulation. Computers & Geosciences 37, 1136–1147. doi:10.1016/j.cageo.2010.08.002.

- Dietrich, P., Butler, J.J., Faiß, K., 2008. A rapid method for hydraulic profiling in unconsolidated formations. *Ground Water* 46, 323–328. doi:10.1111/j.1745-6584.2007.00377.x.
- Dietrich, P., Leven, C., 2006. Direct Push-Technologies, in: Kirsch, R., *Groundwater Geophysics*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 321–340.
- DIN 18123, 2011. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- DIN 18126, 1996. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung
- DIN EN 14511, 2013. Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung - Teil 1: Begriffe und Klassifizierung.
- DIN EN ISO 22282-4, 2012. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geohydraulische Versuche - Teil 4: Pumpversuche.
- DIN EN ISO 22476-2, 2005. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen.
- DIN EN ISO 22476-3, 2012. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 3: Standard Penetration Test.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1997. *Physical and chemical hydrogeology*, 2. Auflage, Wiley, New York.
- Dong, Y., McCartney, J.S., Lu, N., 2015. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 33, 207–221. doi:10.1007/s10706-015-9843-2.
- Douglas, B.J., Olsen, R.S., 1981. Soil classification using electric cone penetrometer - Cone Penetration Testing and Experience. ASCE National Convention, St. Louis, MO, 209–227.
- Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Moser, H., Neumaier, F., Rauert, W., 1968. Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. *Water Resources Research* 4, 125–146. doi:10.1029/WR004i001p00125.
- DVGW - Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2013. Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 120-2 (A): Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik und oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden).
- DVGW - Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 1996. *Oberflächengeophysik zur Grundwassererkundung*. Nr. 43. 8/96.
- DWD - Deutscher Wetterdienst, 2014. Vorläufige Gradtagzahlen für ausgewählte Orte in Deutschland:
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimadaten/Gradtagzahl/Archiv/Gesamt__2013__3807,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Gesamt__2013__3807.pdf (letzter Zugriff am 07.08.2014).

- E -

- Eissmann, L., 1975. *Das Quartär der Leipziger Tieflandsbucht und angrenzender Gebiete um Saale und Elbe*. Akademie-Verlag, Berlin.
- Elfasson, E.T., Björnsson, O.B., 2003. Multiple integrated applications for low-to medium-temperature geothermal resources in Iceland. *Geothermics, Selected Papers from*

- the European Geothermal Conference 2003 32, 439–450. doi:10.1016/S0375-6505(03)00051-8.
- Epting, J., Huggenberger, P., 2013. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology* 501, 193–204. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.08.002.
- Erol, S., François, B., 2014. Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* 70, 788–799. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.034.
- Eskilson, P., 1987. *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Dissertation. University of Lund, Schweden, Lund.
- Eskilson, P., Claesson, J., 1988. Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer* 13, 149–165. doi:10.1080/10407788808913609.
- ETI - Brandenburgische Energie Technologie Initiative, 2009. *Nutzung von Erdwärme in Brandenburg Heizen und Kühlen mit oberflächennaher Geothermie: Leitfaden für Bauherren, Planer und Fachhandwerker*: http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/eti_upload/downloads2008/geothermieleitfaden_brandenburg.pdf (letzter Zugriff am 16.01.2016).
- European Commission, 2014. Annex paper: CiTIEs - Cities of Tomorrow: Investigating in Europe.
- F -**
- Farouki, O., 1981. *Thermal properties of soils*. United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.
- Ferguson, G., Woodbury, A.D., 2007. Urban heat island in the subsurface. *Geophysical Research Letters* 34, 1-4. doi:10.1029/2007GL032324.
- Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H., Stallmann, R.W., 1962. *Theory of aquifer tests*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1536-E 69–173.
- Florides, G., Kalogirou, S., 2007. Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable Energy* 32, 2461–2478. doi:10.1016/j.renene.2006.12.014.
- Foti, S., Parolai, S., Albarello, D., Picozzi, M., 2011. Application of surface-wave methods for seismic site characterization. *Surveys in Geophysics* 32(6), 777–825.
- Fuchs, S., 2010. Deterministische kf-Wert-Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache. *Grundwasser* 15, 177–189. doi:10.1007/s00767-010-0143-8.
- G -**
- Gehlin, S., 2002. *Thermal response test, method development and evaluation*. Dissertation. University of Technology, Luleå, Sweden.
- Gehlin, S., Nordell, B., 1997. Thermal response test – a mobile equipment for determining thermal resistance of boreholes. *Beitrag zur 7. International Conference on Thermal Energy Storage, Megastock '97, Vol. 1, PP 103-108*.
- Geitmann, S., 2012. *Erneuerbare Energien: Mit neuer Energie in die Zukunft*. Hydrogeit Verlag, Weimar.
- Genske, D.D., 2006. *Ingenieurgeologie: Grundlagen und Anwendung*. Springer-Verlag.

- Geologischer Dienst NRW, 2015. Geothermie in NRW - Standortcheck:
http://www.geothermie.nrw.de/geothermie_basisversion/?lang=de (letzter Zugriff am 7.19.15).
- GeoSN - Staatsbetrieb Geoinformation und Vermessung Sachsen, 2015. Karte der mittleren Grundwasserflurabstände in Sachsen. Geoportal Sachsen:
<http://www.revosax.sachsen.de/Details.do?sid=2942414717472> (letzter Zugriff am 14.10.2015).
- Google, 2016a. Kartendaten Köln Geo-Basis:
<https://www.google.de/maps/place/K%C3%B6ln/@50.9527806,6.7426262,10.25z/data=!4m2!3m1!1s0x47bf259169ab2fe5:0x42760fc4a2a77f0> (letzter Zugriff am 16.01.2016).
- Google, 2016b. Kartendaten Taucha Geo-Basis:
<https://www.google.de/maps/place/Taucha/@51.3911195,12.446478,12z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x47a655d49edec923:0x421b1cb428d6c80> (letzter Zugriff am 16.01.2016).
- Grundwasserrichtlinie, GWRL, 2006/118/EG, 2007. Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzungen und Verschlechterungen.
- Grzebiela, R., 2014. Das Einbringen von Erdsonden zur Nutzung der Erdwärme als Unternehmensmodell in der Baubranche. Diplomarbeit. Druck Diplomica Verlag GmbH, Hochschule Wismar, Hamburg.
- Günther, T., Rücker, C., Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion. *Geophysical Journal International* 166, 506–517. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03011.x.

- H -

- Hähnlein, D.-G.S., Molina-Giraldo, D.-I.N., Blum, D.P., Bayer, D.P., Grathwohl, P.D.P., 2010. Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden. *Grundwasser* 15, 123–133. doi:10.1007/s00767-009-0125-x.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P., 2013. Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914–925. doi:10.1016/j.enpol.2013.04.040.
- Hähnlein, S., Blum, P., Bayer, P., 2011. Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser* 16, 69–75. doi:10.1007/s00767-011-0162-0.
- Harrington, G.A., Hendry, M.J., 2006. Using direct-push EC logging to delineate heterogeneity in a clay-rich aquitard. *Ground Water Monitoring & Remediation* 26, 92–100. doi:10.1111/j.1745-6592.2006.00063.x.
- Hartge, K.H., Horn, R., 1999. Einführung in die Bodenphysik. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground Water* 48, 741–756. doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00678.x.
- Heidinger, G., Dornstädter, J., Fabritius, A., Welter, M., Wahl, G., Zurek, 2004. EGRT - Enhanced Geothermal Response Test. Beitrag der 8. Geothermischen Fachtagung. 316-323. Landau, Germany.

- Hein, P., Kolditz, O., Görke, U.-J., Bucher, A., Shao, H. (2016): A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Applied Thermal Engineering* 100, 421 - 433
- Hellström, G., 1991. Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems. Dissertation. Lund University.
- Hillel, D., 1980. *Fundamentals of Soil Physics*, 1. Auflage. Academic Press, New York.
- Hoffmann, S., Atkinson, T., Polom, U., Werban, U., Leven, C., Engeser, B., 2008. Integrierter Einsatz von Scherwellenseismik und Direct-Push-Verfahren zur Erkundung eines urbanen Grundwasserleiters. *Grundwasser* 13, 78–90. doi:10.1007/s00767-008-0067-8.
- Höltling, B., Coldewey, W., 2013. *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Elsevier, München.
- Homuth, S., Sass, I., Hamm, K., Rumohr, S., 2008. In-Situ-Messungen zur Bestimmung geothermischer Untergrundkennwerte. *Grundwasser* 13, 241–251. doi:10.1007/s00767-008-0089-2.
- Huber, A., 2011. Benutzerhandbuch zum Programm EWS (Version 4.7) - Berechnung von Erdwärmesonden. Huber Energietechnik AG, Zürich.
- Huber, H., Arslan, U., Sass, I., 2014. Zum Einfluss der Filtergeschwindigkeit des Grundwassers auf die effektive Wärmeleitfähigkeit. *Grundwasser* 19: 173. 1–7. doi:10.1007/s00767-014-0263-7.
- Huenges, E., Kohl, T., Kolditz, O., Bremer, J., Scheck-Wenderoth, M., Vienken, T., 2013. Geothermal energy systems: research perspective for domestic energy provision. *Environ Earth Sci* 70, 3927–3933. doi:10.1007/s12665-013-2881-2.
- Huysmans, M., Dassargues, A., 2005. Review of the use of Péclet numbers to determine the relative importance of advection and diffusion in low permeability environments. *Hydrogeol J* 13, 895–904. doi:10.1007/s10040-004-0387-4.
- Hvorslev, M.J., 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Bulletin 36: 1–50; Vicksbury, Mississippi.
- I -**
- Indacoechea-Vega, I., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D., Calzada-Pérez, M.A., 2015. Experimental characterization and performance evaluation of geothermal grouting materials subjected to heating–cooling cycles. *Construction and Building Materials* 98, 583–592. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.132.
- ITG - Informationsportal Tiefe Geothermie, 2014. Kraftwerk in Landau wegen Bodenhebungen abgeschaltet. <http://www.tiefengeothermie.de/news/kraftwerk-in-landau-wegen-bodenhebungen-abgeschaltet> (letzter Zugriff am 17.08.2016).
- J -**
- K -**
- Kanwar, R.S., Rizvi, H.A., Ahmed, M., Horton, R., Marley, S.J., 1990. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using guelph and velocity permeameters. *American Society of Agricultural Engineers* 32 (6): 1885-1990 1885–1890.

- Keçebaş, A., 2011. Performance and thermo-economic assessments of geothermal district heating system: A case study in Afyon, Turkey. *Renewable Energy* 36, 77–83. doi:10.1016/j.renene.2010.05.022.
- Kim, S.-K., Bae, G.-O., Lee, K.-K., Song, Y., 2010. Field-scale evaluation of the design of borehole heat exchangers for the use of shallow geothermal energy. *Energy, ECOS 2008 - 21. International Conference, on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems* 35, 491–500. doi:10.1016/j.energy.2009.10.003.
- King, R.F., 1992. High-resolution shallow seismology: history, principles and problems. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 25, 177–182. doi:10.1144/GSL.QJEG.1992.025.03.01.
- Kinzelbach, W., Rausch, R., 1995. *Grundwassermodellierung: Eine Einführung mit Übungen*. Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart.
- Kirkham, D., 1946. Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. *Proceedings of Soil Science Society of America* 10, 58–68.
- Knödel, K., Krummel, H., Lange, G., 1997. *Geophysik - Handbuch der Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. Springer, Berlin.
- Koenigsdorff, R., 2011. *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude: Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Koenigsdorff, R., Vesper, S., 2008. *GEO-HAND light: Computerprogramm zur Berechnung der Auslegung von Erdwärmesonden für Heiz- und Kühlzwecke*. Hochschule Biberbach, Institute of Building & Energy Systems, Germany.
- Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J.O., Fischer, T., Görke, U.J., Kalbacher, T., Kosakowski, G., McDermott, C.I., Park, C.H., Radu, F., Rink, K., Shao, H., Shao, H.B., Sun, F., Sun, Y.Y., Singh, A.K., Taron, J., Walther, M., Wang, W., Watanabe, N., Wu, Y., Xie, M., Xu, W., Zehner, B., 2012. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environ Earth Sci* 67, 589–599. doi:10.1007/s12665-012-1546-x.
- Krolkiewicz, H.J., Hopfensperger, G., Spöth, H., 2009. *Energiekosten für Gebäude senken*. Rudolf Haufe Verlag, München.

- L -

- LagerstG - Lagerstättengesetz: Gesetz über die Durchforschung des Reichsgebietes nach nutzbaren Lagerstätten. Deutscher Bundestag. in der Fassung vom 04.12.1934.
- Lamarche, L., Kaji, S., Beauchamp, B., 2010. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics* 39, 187–200. doi:10.1016/j.geothermics.2010.03.003.
- LAWA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2011. *Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren*.
- Leaf, A.T., Hart, D.J., Bahr, J.M., 2012. Active thermal tracer tests for improved hydrostratigraphic characterization. *Ground Water* 50, 726–735. doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00913.x.
- Leap, D.I., Kaplan, P.G., 1988. A single-well tracing method for estimating regional advective velocity in a confined aquifer: Theory and preliminary laboratory

- verification. *Water Resources Research*. 24, 993–998. doi:10.1029/WR024i007p00993.
- Lee, C.K., Lam, H.N., 2007. Effects of groundwater flow direction on performance of ground heat exchanger borefield in geothermal heat pump systems using a 3-D finite difference method. *Proceedings of Building Simulation Conference*. Peking, China.
- Lerm, S., Alawi, M., Miethling-Graff, R., Wolfgramm, M., Rauppach, K., Seibt, A., Würdemann, H., 2011. Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime. *Grundwasser* 16, 93–104. doi:10.1007/s00767-011-0165-x.
- LfULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2016. Geothermische Kartenwerk: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/geologie/26631.htm> (letzter Zugriff am 28.12.2016).
- LfULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2013. Geothermisches Kartenwerk im Maßstab 1:50000 GTK 50, Karte der Entzugsleistungen - Allgemeine Erläuterungen.
- LfULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2014. Geologische Aufschlüsse in Sachsen. <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/weboffice101/synserver?project=geologie-bohrungen&language=de&view=bohrungen> (letzter Zugriff am 12.05.2014).
- LfULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 1996. Geologische Karte der eiszeitlich bedeckten Gebiete von Sachsen (Maßstab 1:50.000). Freiberg.
- Li, M., Lai, A.C.K., 2015. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales. *Applied Energy* 151, 178–191. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.070.
- Liebel, H.T., 2012. Influence of groundwater on measurements of thermal properties in fractured aquifers. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Lippmann, M.J., Tsang, C.F., 1980. Ground-water use for cooling: Associated aquifer temperature changes. *Ground Water* 18, 452–458. doi:10.1111/j.1745-6584.1980.tb03420.x.
- Lo Russo, S., Taddia, G., Verda, V., 2012. Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis. *Geothermics* 43, 66–74. doi:10.1016/j.geothermics.2012.02.001.
- Loose, P., 2007. *Erdwärmennutzung: Versorgungstechnische Planung und Berechnung*, 2. Auflage, Müller, C F in Hüthig, Heidelberg.
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R., Hellström, G., 2004. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *GHC Bulletin*.
- Lund, J.W., Lienau, P.J., 2009. Geothermal District Heating. Beitrag zur International Conference on National Development of Geothermal Energy Use and International Course/EGEC Business Seminar on Organization of Successful Development of a Geothermal Project. 26.-29.05.2009. Častá Papiernička, Slovakia.
- Luo, J., Rohn, J., Xiang, W., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., Steger, H., Zorn, R., 2015. Experimental investigation of a borehole field by enhanced geothermal response test and numerical analysis of performance of the borehole heat exchangers. *Energy* 84, 473–484. doi:10.1016/j.energy.2015.03.013.

- M -

- Maier, J., Hamer, H., 1998. Pumpversuche, in: Geotechnik Hydrogeologie. Springer Berlin Heidelberg, pp. 431–459. doi:10.1007/978-3-642-58851-8_9.
- Man, Y., Cui, P., Fang, Z., 2012. Heat transfer modeling of ground heat exchanger for the ground-coupled heat pump systems. Modeling and optimization of renewable energy system: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/36834.pdf> (letzter Zugriff am 04.08.2015).
- McCall, W., Nielsen, D.M., Farrington, S.P., Christy, T.M., 2006. Use of direct-push technologies in environmental site characterization and ground-water monitoring. In: Nielsen, D.M., Practical handbook of environmental site characterization and ground-water monitoring. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, pp. 345-471.
- McGregor, J.A., Duncan, J.M., 1998. Performance and use of the standard penetration test in geotechnical engineering practice. Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Civil Engineering, Center for Geotechnical Practice and Research.
- Meigh, A.C., 1987. Cone penetration testing: Methods and interpretation. Butterworths, London.
- Menberg, K., Blum, P., Schaffitel, A., Bayer, P., 2013. Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. Environmental Science & Technology 47, 9747–9755. doi:10.1021/es401546u
- MIKE, 2016. Feflow-Support: MIKE powered by DHI Client Care: <https://www.mikepoweredbydhi.com/support> (letzter Zugriff am 01.03.2016).
- Militzer, H., Weber, F., 1985. Angewandte Geophysik. Springer, Wien.
- Mogensen, P., 1983. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. Beitrag zur International Conference On Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Stockholm. Sweden, 6-8 Juni, pp. 652-657.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting hydraulic conductivities of unsaturated porous media. Water Resources Research 12, 513–522.
- Müller, B., Hausmann, J., Niedzwiedz, H., 2008. Vorschläge für einheitliche, geotechnische Klassifikationen von Festgesteinen und Festgebirgen für das Bauwesen sowie den Bergbau, in: Schriftreihe Geotechnik 2: 91-127. Beitrag der 2. Fachtagung Geotechnik, Dresden.

- N -**- O -**

- OENORM L 1065, 2006. Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in gesättigten Stechzylinderproben.

- P -

- Pälchen, W., Walter, H., 2008. Geologie von Sachsen: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. Schweizerbart'sche, E., Stuttgart.
- Pannike, S., Kölling, M., Schulz, H.D., Panteleit, B., Reichling, J., Scheps, V., 2006. Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahren von

- Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. *Grundwasser* 11, 6–18.
doi:10.1007/s00767-006-0114-2.
- Panteleit, B., Reichling, J., 2006. Automatisierte Attribuierung von Bohrungsdaten mit Parametern zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen. *Grundwasser* 11, 19–26. doi:10.1007/s00767-006-0115-1.
- Panteleit, 2016. Persönliche Kommunikation.
- Platt, M., Exner, S., Bracke, R., 2010. Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends:
http://business.metropoleruhr.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Publikationen/Energie/Marktstudie_Waermepumpen_GZB_01.pdf (letzter Zugriff am 12.01.2016).
- Popov, Y.A., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams, C.F., Burkhardt, H., 1999. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics* 28, 253–276. doi:10.1016/S0375-6505(99)00007-3.
- Possemiers, M., Huysmans, M., Batelaan, O., 2014. Influence of aquifer thermal energy storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 2, 20–34.
doi:10.1016/j.ejrh.2014.08.001.
- Prinz, H., 1982. *Abriß der Ingenieurgeologie*. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, Heidelberg.
- Q -**
- Quitow, H.W., Vahlensieck, O., 1955. Über pleistozäne Gebirgsbildung und rezente Krustenbewegungen in der Niederrheinischen Bucht. *Geologische Rundschau* 43, 56–67. doi:10.1007/BF01764085.
- R -**
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L., Lefebvre, R., 2011. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model. *Renewable Energy* 36, 315–324. doi:10.1016/j.renene.2010.06.044.
- Read, T., Bour, O., Bense, V., Le Borgne, T., Goderniaux, P., Klepikova, M. v., Hochreutener, R., Lavenant, N., Boschero, V., 2013. Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using fiber-optic distributed temperature sensing. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2055–2059. doi:10.1002/grl.50397.
- Rees, S.J., He, M., 2013. A three-dimensional numerical model of borehole heat exchanger heat transfer and fluid flow. *Geothermics* 46, 1–13.
doi:10.1016/j.geothermics.2012.10.004.
- REN21 - Renewables, 2016. *Renewables 2016 Global status report: key findings*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Key_Findings.pdf (letzter Zugriff am 14.01.2017).
- Richtlinie 2000/60/EG WRRL - Wasserrahmenrichtlinie, 2000. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Robertson, P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal* 27, 151–158. doi:10.1139/t90-014.

Rumohr, S., Schäfer, I., 2013. Genehmigungsverfahren für oberflächennahe Erdwärmesondenanlagen. Weiterbildungsveranstaltung der FH-DGG am 13.03.2013, Idstein.

- S -

- Sanner, B., Hellström, G., Spittler, J., Gehlin, S., 2005. Thermal response test - current status and world-wide application. Beitrag zum World Geothermal Congress 2005, 24.-29.04.2005, Antalya, Türkei.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., Rybach, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* 32, 579–588. doi:10.1016/S0375-6505(03)00060-9.
- Sass, J.H., Stone, C., Munroe, R.J., 1984. Thermal conductivity determinations on solid rock – a comparison between a steady-state divided-bar apparatus and a commercial transient line-source device. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 20, 145–153.
- Sauer, M., Mands, E., Sanner, B., Grundmann, E., 2007. Wirtschaftliche Aspekte beim Einsatz von Geothermal-Response-Tests. *Proceedings of Geothermie Kongress*. Bochum.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 2001. rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251, 163–176. doi:10.1016/S0022-1694(01)00466-8.
- Scheffer, F., Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Schachtschabel, P., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Welp, G., Thiele-Bruhn, S., 2010. Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Scheytt, T., Hengelhaupt, F., 2001. Auffüllversuche in der wassergesättigten und ungesättigten Zone – ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren. *Grundwasser* 6, 71–80. doi:10.1007/PL00010393.
- Schlabbach, J., Drescher, S., Kley, C., 2012. Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern: Grundlagen, Technik, Wirtschaftlichkeit. VDE-Verlag, Berlin.
- Schmertmann, J.H., 1978. Guidelines for cone penetration test, performance and design. Washington D.C.
- Scholz, Stober, 2001. Ergänzende hydrogeologische Hinweise zu Erdwärmesonden. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) Abteilung 3 Hydrogeologie.
- Schuck, D.A., Lange, G., 2007. Seismic methods, in: *Environmental Geology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 337–402. doi:10.1007/978-3-540-74671-3_11.
- Schulmeister, M. k., Butler, J.J., Healey, J.M., Zheng, L., Wysocki, D.A., McCall, G.W., 2003. Direct-push electrical conductivity logging for high-resolution hydrostratigraphic characterization. *Ground Water Monitoring & Remediation* 23, 52–62. doi:10.1111/j.1745-6592.2003.tb00683.x.
- Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., Parlange, M.B., 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research* 42, 1-8. doi:10.1029/2006WR005326.

- Sellwood, S.M., Healey, J.M., Birk, S., Butler, J.J., 2005. Direct-push hydrostratigraphic profiling: coupling electrical logging and slug tests. *Ground Water* 43, 19–29. doi:10.1111/j.1745-6584.2005.tb02282.x.
- Seyfried, M., Link, T., Marks, D., Murdock, M., 2016. Soil temperature variability in complex terrain measured using fiber-optic distributed temperature sensing. *Vadose Zone Journal* 15, 0. doi:10.2136/vzj2015.09.0128.
- Shao, H., Schelenz, S., Kist, N., Shim, B.O., Bucher, A., Kolditz, O., 2014. Modelling the Interaction of Multiple Borehole Heat Exchangers in Shallow Geothermal Fields (Poster No. H23A–0853), AGU Fall Meeting. San Francisco.
- Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M.T., 2008. HYDRUS-1D, Version 4.16.0110: Code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated porous media.
- Smoltczyk, U., 2001. *Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, Geotechnische Verfahren*, 6. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin; München.
- Soto, M.A., Sahu, P.K., Faralli, S., Bolognini, G., Di Pasquale, F., Nebendahl, B., Rueck, C., 2007. Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes. *Electronic Letters* 43.
- Stadt Köln, Umwelt- und Verbraucherschutzamt, 2013.
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., Hawkes, A., 2012. A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science* 5, 9291–9306. doi:10.1039/C2EE22653G
- Stallmann, R.W., 1971. Aquifer test design, observation and data analysis in *Techniques of Water-Resources Investigation*. U.S. Geological Survey, Washington D.C.
- Statista, 2015. Geothermienutzung zur Wärmebereitstellung bis 2014 - Statistik. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/171889/umfrage/oberflaechennahe-geothermienutzung-zur-waermebereitstellung-seit-1995/> (letzter Zugriff am 22.05.2015).
- Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N.M., Kinzelbach, W., 2014. Thermal use of shallow groundwater. CRC Press, Boca Raton.
- Stober, I., 1986. Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. *Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 42*. BGR/GLA E. Schweizerbart, Hannover; Stuttgart.
- Stober, I., Bucher, K., 2012. *Geothermie*, 2012th ed. Springer, Heidelberg.
- T -**
- Tan, Z., Sun, G., Sun, Y., Yin, A., Wang, W., Ye, J., Zhou, L., 1995. An adiabatic low-temperature calorimeter for heat capacity measurement of small samples. *Journal of Thermal Analysis* 45, 59–67. doi:10.1007/BF02548664.
- Telford, W., 2010. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tholen, M., Walker-Hertkorn, S., 2008. *Arbeitshilfen Geothermie: Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen*. wvgw - Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser.
- Thorsteinsson, H.H., Tester, J.W., 2010. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States. *Energy Policy* 38, 803–813. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.025.

Tinti, F., Bruno, R., Focaccia, S., 2015. Thermal response test for shallow geothermal applications: a probabilistic analysis approach. *Geothermal Energy* 3, 6. doi:10.1186/s40517-015-0025-5.

Tyler, S.W., Selker, J.S., Hausner, M.B., Hatch, C.E., Torgersen, T., Thodal, C.E., Schladow, S.G., 2009. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods: DTS fiber-optic sensing. *Water Resources Research* 45, 1-11. doi:10.1029/2008WR007052.

- U -

UBA - Umweltbundesamt, 2016. Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im 1. Halbjahr 2016: Quartalsbericht der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat): https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/agee-stat_quartalsbericht_2016_q2.pdf (letzter Zugriff am 14.01.2017).

UBA - Umweltbundesamt, 2015. Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_54_2015_auswirkungen_thermischer_veraenderungen_infolge_der_nutzung_obenflaechennaher_geothermie_0.pdf (letzter Zugriff am 01.10.2015).

Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009. Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpe.

- V -

Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 892–898.

Vandenbohede, A., Hermans, T., Nguyen, F., Lebbe, L., 2011. Shallow heat injection and storage experiment: Heat transport simulation and sensitivity analysis. *Journal of Hydrology* 409, 262–272. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.024.

VDI 4640-1, 2010. Thermische Nutzung des Untergrundes: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.

VDI 4640-2, 2001. Thermische Nutzung des Untergrundes: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.

VDI 4640-3, 2001. Thermische Nutzung des Untergrundes: Unterirdische thermische Energiespeicher.

Vienken, T., Kreck, M., Hausmann, J., Werban, U., Dietrich, P., 2014. Innovative strategies for high resolution site characterization: application to a flood plain. *Acque Sotteranee - Italien Journal of Groundwater* 3, 7–14. doi:10.7343/AS-091-14-0118.

Vienken, T., Schelenz, S., Rink, K., Dietrich, P., 2015. Sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface—A critical view on the status quo. *Groundwater* 1–6. doi:10.1111/gwat.12206.

Vojcinak, P., Vavrla, T., Koziorek, J., 2013. Using compact system for measuring borehole temperature profiles. *IFAC Proceedings* 46, 132–137.

- W -

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. doi:10.1016/j.enbuild.2009.08.001.

Werban, U., Leven, C., 2007. Technologies for a fast characterization of subsurface structures - An example from the Milan-Rho site. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 1, 115–122. doi:10.4408/IJEGE.2007-01.S-17.

WHG - Wasserhaushaltsgesetz. Deutscher Bundestag. in der Fassung vom 31.07.2009.

Woodside, W., Messmer, J.H., 1961. Thermal conductivity of porous media. I. Unconsolidated sands. *Journal of Applied Physics* 32, 1688. doi:10.1063/1.1728419

- X -

Xu, X., You, S., Zheng, X., Li, H., 2014. A survey of district heating systems in the heating regions of northern China. *Energy* 77, 909–925. doi:10.1016/j.energy.2014.09.078.

- Y -**- Z -**

Zheng, C., Wang, P.P., 1999. MT3DMS Documentation and User's Guide. Department of Geological Sciences, University of Alabama.

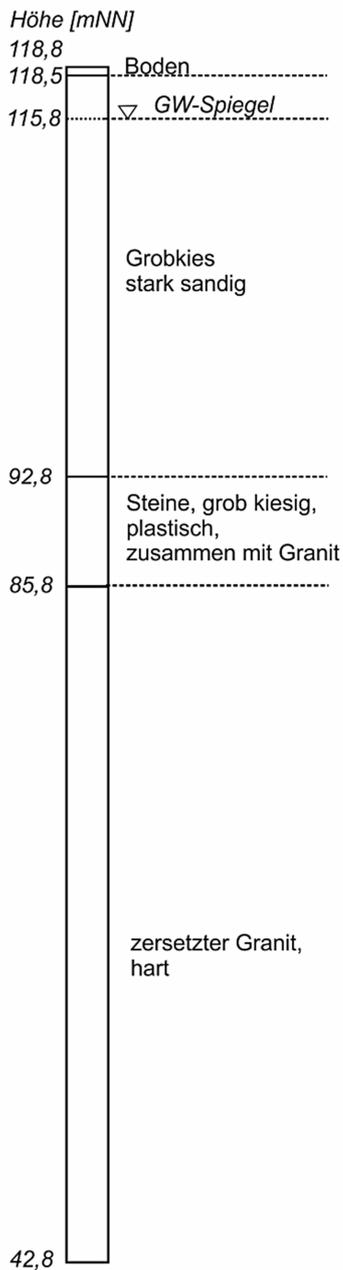
Zheng, T., Shao, H., Schelenz, S., Hein, P., Vienken, T., Kolditz, O., Nagel, T., 2015. Efficiency and economic analysis of utilizing latent heat from groundwater freezing in the context of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Applied Thermal Engineering* 105, 314 - 326

Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.-D., Bayer, P., 2010. The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters* 5. doi:10.1088/1748-9326/5/4/044002.

Zlotnik, V.A., McGuire, V.L., 1998. Multi-level slug tests in highly permeable formations: 1. Modification of the Springer-Gelhar (SG) model. *Journal of Hydrology* 204, 271–282. doi:10.1016/S0022-1694(97)00128-5.

Anhang

B1 (B...1...2007)
 RW: 4535099
 HW: 5694110
 Tiefe: 76 m uGOK



B2 (B...1...2007-2)
 RW: 4536161
 HW: 5694542
 Tiefe: 80 m uGOK

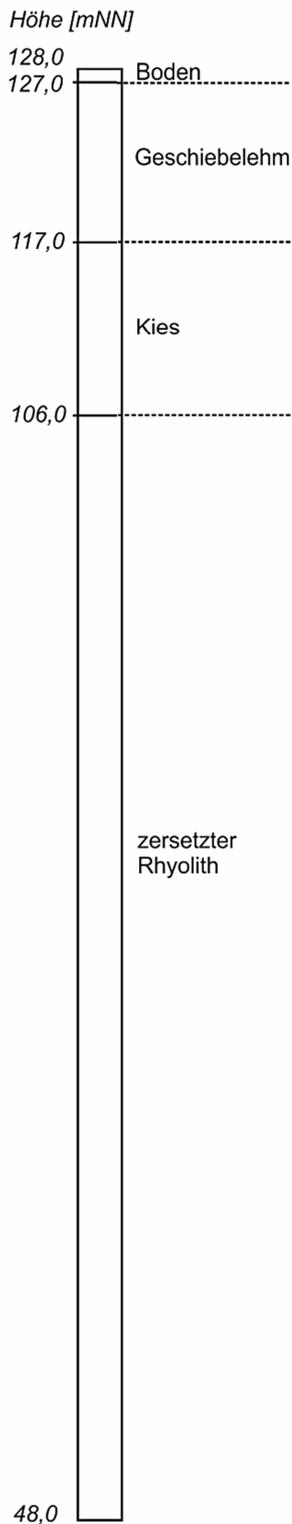


Abbildung A-1: Ausgewählte geologische Profile der Bohrdatenbank des LfULG (2014) mit Tiefen von 76 bis 80 m unter Geländeoberkante.

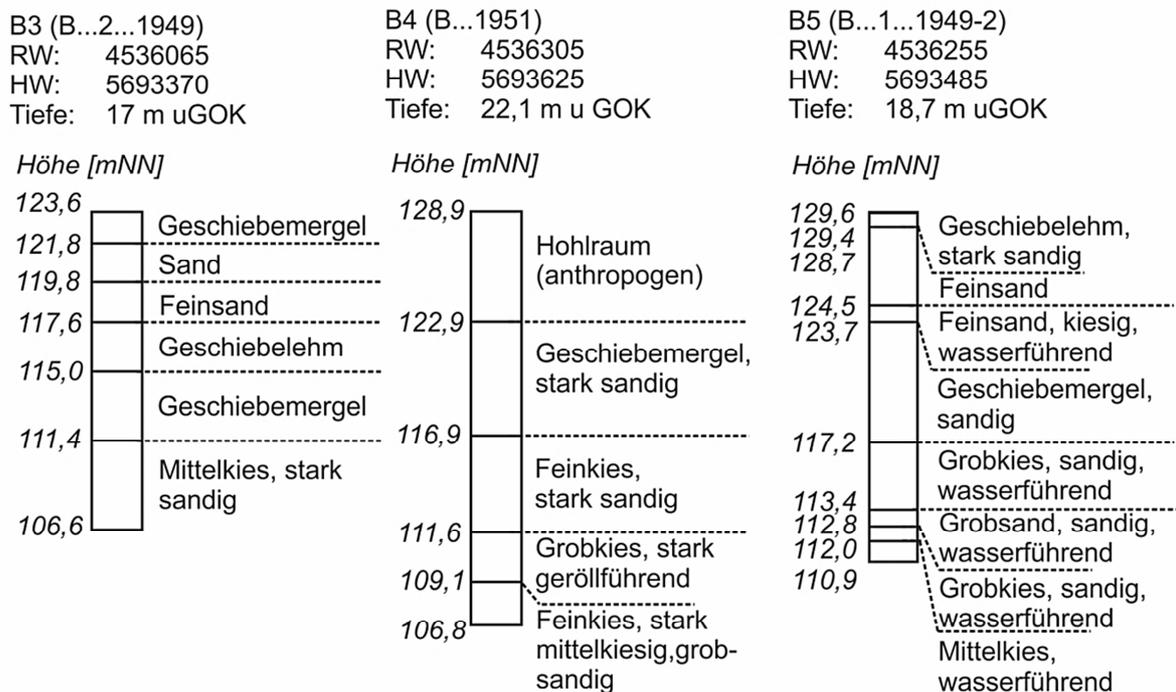


Abbildung A-2: Ausgewählte geologische Profile der Bohrdatenbank des LfULG (2014) mit Tiefen von 17 bis 21,1 m unter Geländeoberkante.

Tabelle A-1: Zusammenfassung der Eigenschaften einer Erdwärmesonde in Anlehnung an die in Feflow implementierte Datenbank (Dataset #1) vorgegebenen Werte (DHI-WASY, 1979 - 2016; DHI-WASY, 2010).

Parameter	Wert	Einheit
Geometrie der Erdwärmesonde: Doppel-U-Erdwärmesonde		
Berechnungsansatz:	Quasi-stationär (Eskilson und Claesson, 1988)	
Bohrlochdurchmesser	0,1500	m
Abstand zwischen den Rohren	0,0400	m
Durchmesser des Zu-/Abflussrohres	0,0320	m
Mächtigkeit des Zu-/Abflussrohres	0,0029	m
Koeffizienten des Wärmetransportes		
Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre	0,4200	$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials	1,0000	$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$
Thermischer Widerstand Sonde–Verfüllung	0,1628	msKJ^{-1}
Thermischer Widerstand Verfüllung–Verfüllung (1)	0,1201	msKJ^{-1}
Thermischer Widerstand Verfüllung–Verfüllung (2)	0,4134	msKJ^{-1}
Thermischer Widerstand Verfüllung–Boden	0,3282	msKJ^{-1}

Parameter	Wert	Einheit
Eigenschaften des Wärmeträgermediums		
Wärmekapazität	4,000E+06	$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit	0,480E+00	$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$
Dynamische Viskosität	3,000E+03	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
Dichte	1,052E+03	kgm^{-3}

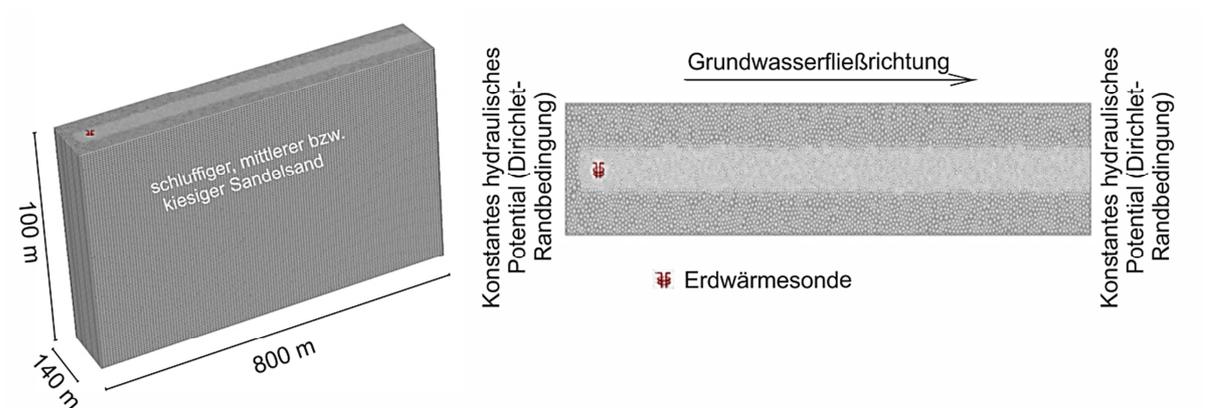


Abbildung A-3: Konzeptionelles Modell der Untersuchungen zum Einfluss der Advektion auf die thermische Untergrundnutzung.

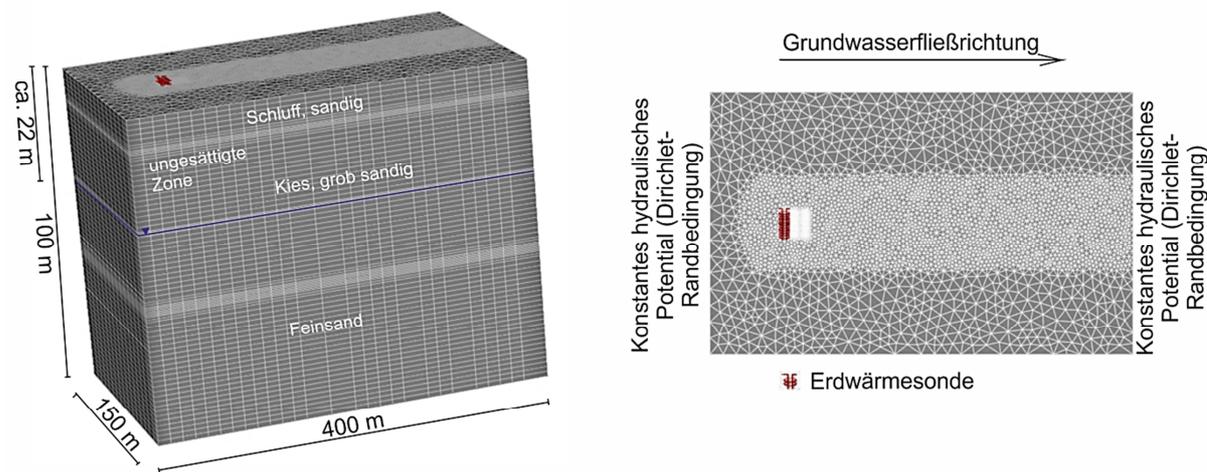


Abbildung A-4: Konzeptionelles Modell des Untersuchungsgebietes in Köln Junkersdorf.

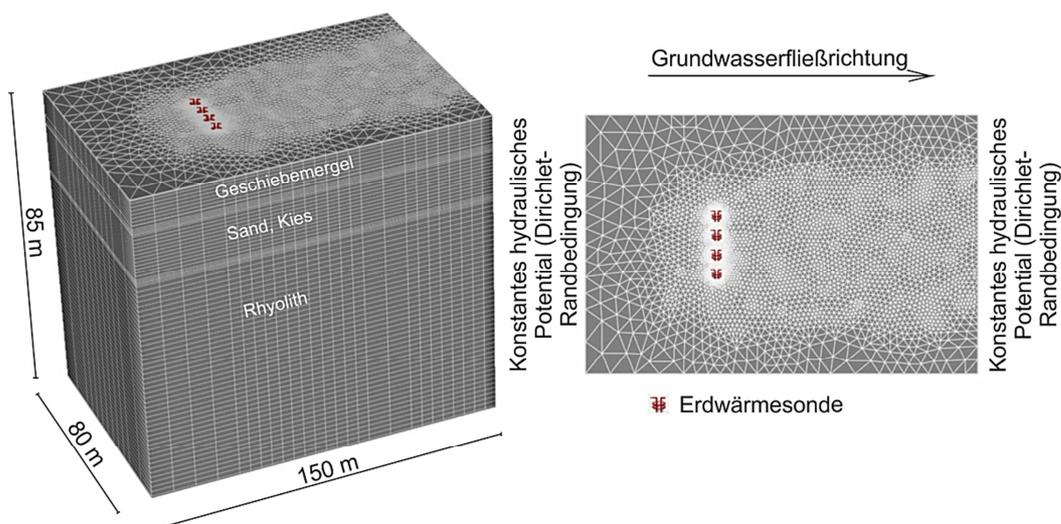


Abbildung A-5: Konzeptionelles Modell des Untersuchungsgebietes in Taucha.

Tabelle A-2: Überblick über ausgewählte Methoden zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes.

Parameter / Charakteristik	Methoden	Weiterführende Literatur
Untergrundstruktur		
Schichtübergänge, Heterogenität	Geoelektrik Seismik (Reflexions- und Refraktionsseismik)	Knödel et al. (1997), Militzer und Weber (1985), Telford (2010) Foti et al. (2011), Hoffmann et al. (2008), King (1992), Militzer und Weber (1985), Schuck und Lange (2007)
Schichtübergänge	Aufschlussbohrung / Rammkernsondierung Rammsondierung Standard Penetration Test Drucksondierungen, Cone Penetration Test	Genske (2006), Prinz (1982), Smoltczyk (2001) DIN EN ISO 22476-2 (2005), Genske (2006), Prinz (1982) Clayton (1995), McGregor und Duncan (1998) DIN EN ISO 22476-3, (2012), Robertson (1990), Douglas und Olsen (1981), Meigh (1987), Schmertmann (1978)

Parameter / Charakteristik	Methoden	Weiterführende Literatur
Schichtübergänge	DTS-System (Distributed Temperatur Sensing) zur Identifizierung Grundwasser durchströmter Schichten	Leaf et al. (2012), Read et al. (2013), Selker et al. (2006)
Hydraulische Parameter		
Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	<i>In-situ Untersuchungen</i>	
	Pumpversuch	DIN EN ISO 22282-4 (2012), Ferris et al. (1962), Maier und Hamer (1998), Stallmann (1971), Stober (1986)
	Direct Push Slug Test	Bouwer und Rice (1976), Butler, (2002b, 1997), Butler und Garnett (2000), Sellwood et al. (2005), Zlotnik und McGuire (1998)
	Auffüllversuch	Hvorslev (1951), Kirkham (1946) zitiert in Scheytt und Hengelhaupt (2001)
	<i>Untersuchungen im Labor</i>	
	Stechzylinderprobe	OENORM L 1065 (2006)
	Permeameter	Kanwar et al. (1990)
	Kornverteilungskurve	DIN 18123 (2011), Beyer (1964)
	Deterministische Schätzung aus Bohrgutansprachen	Fuchs (2010)
Hydraulischer Gradient	Stichtagsmessung in Grundwassermessstellen	Ballard (1996), Hölting und Coldewey (2013)
	Well Tracer Test	Leap und Kaplan (1988), Drost et al. (1968)
Grundwasserfließgeschwindigkeit	Flowmeter	Ballard (1996)
	Heat Tracer Test	Bakker et al. (2015)

Parameter / Charakteristik	Methoden	Weiterführende Literatur
Thermo-physikalische Parameter		
Untergrundtemperatur	Bohrloch Temperatur-Log DTS-System (Distributed Temperatur Sensing)	Vojcinak et al. (2013) Selker et al. (2006), Seyfried et al. (2016), Soto et al. (2007), Tyler et al. (2009)
Wärmeleitfähigkeit	<i>In-situ Untersuchungen</i>	
	Thermal Response Test	Florides und Kalogirou (2007), Gehlin (2002), Gehlin und Nordell (1997), Hellström (1991), Mogensen (1983), Sanner et al. (2005), Tinti et al. (2015)
	Enhanced Thermal Response Test	Heidinger et al. (2004), Luo et al. (2015)
	Erzhäuser-Sonde	Homuth et al. (2008)
	<i>Untersuchungen im Labor</i>	
	Nadelfühler (Messsonde aus Heizelement und Temperaturmesser)	ASTM Standards D 5334-00 (2000), Decagon Devices (2011), Woodside und Messmer (1961)
„Optical Scanning“ Methode	Popov et al. (1999)	
„Divided-Bar“ Methode	Sass et al. (1984), Bording et al. (2016)	
Wärmekapazität	Kalorimeter Nadelfühler (Messsonde aus Heizelement und Temperaturmesser)	Tan et al. (1995) Bristow et al. (1994, 1993), Bristow (1998), Campbell et al. (1991)

Danksagung

Die hier vorgestellte Arbeit entstand im Rahmen einer Kooperation der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) und dem Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ. Die durchgeführten Arbeiten sind Teil des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes ANGUS+ (Förderkennzeichen: 03EK3022B).

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Peter Dietrich (Leiter des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien, UFZ) und Herrn Prof. Dr. Sebastian Bauer (Leiter der Arbeitsgruppe Geohydromodellierung, CAU Kiel) für die Betreuung und Begutachtung der Arbeit, die fachliche Unterstützung und den persönlichen Rat. Insbesondere gilt mein Dank auch Herrn Dr. Thomas Vienken für die individuelle Betreuung während der gesamten Promotionszeit, die fachlichen Diskussionen und hilfreichen Ratschläge zum wissenschaftlichen Arbeiten.

Besonderer Dank gilt auch Herrn J Prof. Dr. Haibing Shao (Department Umweltinformatik, UFZ, TU Bergakademie Freiberg) und Herrn Dr. Falk Händel (Institut für Grundwasserwirtschaft, TU Dresden) für die Unterstützung bei den Modellierungen, die fachlichen Anregungen und die stetige Hilfsbereitschaft.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien des UFZ, den Unterstützern der Feldeinsätze Helko Kotas, Andreas Schoßland und Manuel Kreck sowie den (ehemaligen) Doktorandinnen und Doktoranden Linda Firmbach, Dr. Jörg Hausmann, Hannes Mollenhauer, Ingmar Schröter, Dr. Martin Schrön, Dr. Edoardo Martini, Thomas Grau, Ludwig Zschornack, Dr. Theresa Mannschatz, Andrei Marian Chirila, Astrid Denk, Robert Schima, Ahamefula Udume Utom, Abdul Jabbar Asadi und Klodwig Seibertz.

Ebenso sei den Kieler Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe Geohydromodellierung gedankt, die mich freundlich in ihrer Runde aufgenommen und mit fachlichen Diskussionen unterstützt haben. Ich bedanke mich insbesondere bei Anke Boockmeyer, Steffi Popp, Katharina Benisch und Wolf Tilmann Pfeiffer.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. Karin Frank für die Unterstützung meiner Arbeit als Vertrauensperson sowie bei der Graduierten Schule HIGRADE für die individuelle Weiterbildung durch das umfangreiche Kursangebot.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Marion und Georg und meinem Freund Dominique für ihre ausdauernde Unterstützung, die Geduld und Motivation sowie jeden einzelnen guten Rat.

Curriculum Vitae

Sophie Schelenz

geboren am 01.05.1989 in Blankenburg im Harz

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Berufliche Tätigkeit

seit 11/2015	W.U.P. Consulting GmbH & Co. KG, Leuna Geowissenschaftlerin
10/2012 – 10/2015	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Department Monitoring- und Erkundungstechnologien, Arbeitsgruppe Direct Push und Hydrogeologische Messmethoden

Akademischer Werdegang

seit 03/2014	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Promotionsstudentin am Institut für Angewandte Geowissenschaften, Arbeitsgruppe Geohydrmodellierung
10/2012 – 10/2015	Helmholtz Interdisciplinary GRADuate School of Environmental Research (HIGRADE), Leipzig
10/2010 – 10/2012	TU Bergakademie Freiberg Geowissenschaften, M.Sc. Schwerpunkte: Hydrogeologie, Ingenieurgeologie Masterarbeit: Air Sparging Remediation of a Former Petrol Depot
10/2007 – 12/2010	TU Bergakademie Freiberg Geoökologie, B.Sc. Bachelorarbeit: Modellierung des Speichereffekts von Ton und Torf – Einfluss auf die Arsenkonzentration
06/2007	Gymnasium „Am Thie“, Blankenburg Erweiterte Hochschulreife