

Anke Bucher, Uwe-Jens Görke, Thomas Vienken,
Olaf Kolditz, Peter Dietrich (Eds.)

Entwicklung von Methoden zur standort- optimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme

Im Rahmen des Projekts „SAGS – Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme“ unter Koordination von



Schlussbericht (Sachbericht)

Zuwendungsempfänger: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Fakultät für Maschinenbau und Energietechnik	Förderkennzeichen: 13FH059PX3
Vorhabenbezeichnung: FHprofUnt 2013: SAGS - Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2013 – 31.03.2017	Berichtszeitraum 01.09.2013 – 31.03.2017

Wissenschaftliche Projektkoordination:

Prof. Dr. Anke Bucher (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)

Am Projekt beteiligte Wissenschaftler des Zuwendungsempfängers:

Prof. Dr. Anke Bucher
Philipp Hein
Norman Kist
Dr. Dmitri Naumov

Am Projekt beteiligte Kooperationspartner:

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig
BET Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH
(vormals Ingenieurbüro J. Döhler), Leipzig
JB-ingconsult, Leipzig

Kontaktadresse:

Prof. Dr. Anke Bucher
Fakultät Maschinenbau und Energietechnik
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Karl-Liebknecht-Str. 134
04277 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 3076 4224
Fax: +49 (0)341 3076 4202
E-Mail: anke.bucher@htwk-leipzig.de
URL: www.htwk-leipzig.de



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt bei
den Autoren.

Inhalt

I	Kurzdarstellung.....	5
I.1	Aufgabenstellung.....	5
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	10
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
I.6	Danksagung	14
II	Eingehende Darstellung	14
II.1	Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	14
II.1.1	Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes: Bilanz- und Konstitutivbeziehungen.....	16
II.1.2	Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes: Numerische Modelle zur Abbildung von Erdwärmesonden	18
II.1.3	Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes: Gefrierprozesse.....	22
II.1.4	Numerische Realisierung im Rahmen der objektorientierten wissenschaftlichen Open-Source-Softwareplattform OpenGeoSys.....	25
II.1.5	Benchmarking	28
II.1.6	Anwendungssimulationen und Szenarienstudien: Erdwärmesonden(systeme).....	32
II.1.7	Anwendungssimulationen und Szenarienstudien: Gefrierprozesse.....	47
II.1.8	Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen und Anregungen zur Flexibilisierung regulativer Rahmenbedingungen.....	50
II.1.9	Anwenderworkshop und Förderung von wissenschaftlichem Nachwuchs..	57
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	58
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	58
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	60
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	62
II.6	Referenzen sowie erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse des Zuwendungsempfängers.....	65

II.6.1	Referenzen	65
II.6.2	Erfolgte und geplante Publikationen in Fachzeitschriften	69
II.6.3	Erfolgte und geplante Bücher / Buchkapitel	70
II.6.4	Erfolgte und geplante Tagungsbeiträge mit Abstracts	70
II.6.5	Erfolgte und geplante studentische Arbeiten und Abschlussarbeiten mit Projektbezug	71
II.6.6	Erfolgte und geplante sonstige Publikationen mit Projektbezug	71
Anhang (Studie zu Praxis und Datenlage zur Standortbewertung, Planung und Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen)		73

I KURZDARSTELLUNG

I.1 Aufgabenstellung

Der Ausbau erneuerbarer Energien und die Steigerung von Energieeffizienz sind wesentliche Aspekte nachhaltiger Klima- und Energiepolitik der Bundesregierung. Dabei stellen Initiativen zur Entwicklung dezentraler Energiesysteme besonders in urbanen Bereichen neue Herausforderungen an die effiziente Energieversorgung von Gebäuden unter Nutzung lokaler Ressourcen. Im Wärmebereich erfordert dies eine intensive Förderung von Techniken zur Gewinnung und Speicherung thermischer Energie. Eine wachsende Rolle nehmen dabei oberflächennahe Geothermiesysteme ein, die eine grundlastfähige, emissionsfreie Energiegewinnung ermöglichen.

Die oberflächennahe Geothermie nutzt den geologischen Untergrund vorrangig zur Gebäudeversorgung im privaten, öffentlichen und industriellen Bereich mit Heizwärme, Kälte und Warmwasser. Entsprechende Systeme bestehen aus untertägigen Komponenten (z. B. Erdwärmesonden) zur Nutzung des geologischen Raums als Wärmequelle sowie obertägigen Komponenten der Haustechnik als Wärmeabnehmer. Häufig werden zusätzlich Wärmepumpen eingesetzt, um die im Untergrund gewonnene Wärme auf die erforderliche Nutztemperatur zu bringen. Neben der Gebäudeeinzelsversorgung wird verstärkt der thermische Energiebedarf großer Gebäudekomplexe und auch ganzer urbaner Areale (z. B. Eigenheim- und/oder Gewerbegebiete) ergänzend oder vollständig aus geothermischen Quellen gedeckt. Zudem gibt es in wachsendem Maße Beispiele für die Erschließung großflächiger Geothermiesysteme zur saisonalen Speicherung thermischer Energie im oberflächennahen Untergrund.

Erdwärmesonden sind in den geologischen Untergrund integriert, der sich durch eine heterogene Struktur gesättigter und/oder ungesättigter poröser Medien (Böden, Gesteine) auszeichnet. Beim Betrieb geothermischer Systeme sind thermische, hydraulische und mechanische Prozesse zu betrachten, die sich gegenseitig beeinflussen. Systembedingt stellen thermische Prozesse die prägenden Vorgänge dar, die sich jedoch auf das umgebende Gestein und die Porenflüssigkeiten einschließlich stehenden oder fließenden Grundwassers auswirken. Fließendes Grundwasser kann seinerseits beispielsweise durch teilweisen Abtransport von Wärmeenergie die Effizienz geothermischer Systeme beeinflussen. Mechanische Deformationen (z. B. Bodenhebungen) können auftreten, wenn es durch ungünstige Betriebsbedingungen von Erdwärmesonden zum Gefrieren von Untergrundbereichen kommt. Die Heterogenität der vorhandenen Boden- und Gesteinsschichten sowie die Komplexität der gekoppelten Prozesse erfordern innovative experimentelle und numerische Methoden zur optimierten Auslegung oberflächennaher Geothermiesysteme. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten für die Durchführung von Feldversuchen zu Planungszwecken, besonders im Langzeitbereich, kommt dabei der Modellierung und numerischen Simulation für die Prognose des Betriebsverhaltens geothermischer Systeme eine substantielle Rolle zu.

Die aktuelle Auslegungspraxis für oberflächennahe Geothermiesysteme orientiert sich wesentlich an regulativen Rahmenbedingungen (Leitfäden, Richtlinien etc.), die für die Planung geothermischer Einzelanlagen formuliert wurden. Diese erfassen die reale, komplexe geowissenschaftliche Situation am Standort nicht oder nur in sehr vereinfachter Art und Weise. Beispielsweise ist die Erhebung von Standortdaten nicht zwingend vorgeschrieben, was besonders im Langzeitbetrieb zu ineffizienten Anlagen und im Extremfall zu wirtschaftlichen Verlusten führen kann. Übergeordnete Zielsetzung des F&E-

Vorhabens SAGS ist daher die Entwicklung modellbasierter Methoden zur optimierten Auslegung der im geologischen Untergrund angeordneten Komponenten großflächiger Geothermiesysteme zur Gewinnung und/oder Speicherung thermischer Energie im oberflächennahen Untergrund. Dazu wurden folgende spezifische Arbeitsziele definiert und in einzelnen Arbeitspaketen untersucht:

- Entwicklung geeigneter Modellierungskonzepte und -strategien zur Analyse der im Untergrund ablaufenden physikalischen Prozesse,
- numerische Umsetzung der Modelle unter Nutzung und Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Open-Source-Simulationsplattform OpenGeoSys,
- Definition, Parametrisierung und Simulation von Testbeispielen und realistischer Szenarien zur Integration der geothermischen Systeme in die Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes auf der Basis realer Standortdaten und
- Ableitung von Schlussfolgerungen und Anregungen für die Anpassung von Regelwerken für Planungs- und Genehmigungsverfahren zur Dimensionierung oberflächennaher Geothermiesysteme unter Berücksichtigung von Aspekten der Raumplanung.

Methodisch enthält die Aufgabenstellung des F&E-Vorhabens SAGS als Kern die Nutzung und Weiterentwicklung innovativer Instrumentarien zur Modellierung und Simulation der bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen im Untergrund ablaufenden Vorgänge mit dem Ziel der optimalen Gestaltung von Geothermiesystemen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher (Effizienz, Wirkungsgrad), sicherheitstechnischer (Vermeidung potenzieller Schadensereignisse) und ökologischer (Vermeidung negativer Umweltauswirkungen) Aspekte.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Wesentliche Voraussetzungen für die Durchführung des F&E-Vorhabens SAGS waren die vorangegangenen Forschungsarbeiten der Projektleiterin, Frau Prof. Dr. Anke Bucher, beim Zuwendungsempfänger Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK) sowie die projektspezifische Expertise der Kooperationspartner in SAGS, der Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ als außeruniversitäre wissenschaftlichen Einrichtung sowie der zwei Planungsbüros aus dem Geothermiebereich BET Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH (vormals Ingenieurbüro J. Döhler) und JB-ingconsult. Diese Vorarbeiten und Expertisen zum Erreichen der Arbeitsziele im Vorhaben zu bündeln und mit dem Aufbau eines langfristig bestehenden und sich entwickelnden Forschungsnetzwerks die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit und Sichtbarkeit der HTWK zu stärken, waren Aufgaben von SAGS. Zuwendungsempfänger und Kooperationspartner brachten die jeweils notwendige, nachfolgend skizzierte, spezifische Expertise zur Bearbeitung der Arbeitspakete ein.

Die Projektleiterin kann auf umfangreiche Erfahrungen und fundierte Kenntnisse auf dem Gebiet der numerischen Systemanalyse basierend auf kontinuumsmechanischen Methoden verweisen, die methodisch den Kern der Forschungsarbeiten des F&E-Vorhabens SAGS, die Entwicklung von Modellierungskonzepten, -strategien und -instrumentarien betrafen. Ihre bisherige, bis in das Jahr 1997 zurückreichende, Forschungstätigkeit umfasst die Betrachtung spezifischer physikalischer Probleme (z. B. Deformationsprozesse metallischer Werkstoffe) bis hin zu komplexen gekoppelten Problemen im Kontext der

Modellierung unterschiedlicher interagierender physikalischer Vorgänge (z. B. hydro-mechanische Prozesse in gesättigten porösen Medien). Dabei hat sie sich insbesondere mit der effizienten und stabilen Realisierung dieser Modelle im Rahmen der Finite-Element-Methode beschäftigt. In diesem Zusammenhang besitzt sie zusätzlich einen umfassenden Erfahrungsschatz auf dem Gebiet des Benchmarkings und der Anwendungssimulationen. Die Projektleiterin hat wesentliche Beiträge zur Entwicklung moderner Materialmodelle und deren numerischer Umsetzung geleistet, die für technische Werkstoffe ebenso interessant sind wie für geologische Materialien (Boden- und Felsmechanik). Auf dem Gebiet gekoppelter Problemstellungen befasste sich die Projektleiterin mit der Entwicklung und numerischen Umsetzung neuer Linearisierungstechniken für gemischte Formulierungen zur Beschreibung von nahezu inkompressiblen elastischen Materialien bei großen Deformationen. Für das F&E-Vorhaben SAGS sind insbesondere ihre wesentlichen Beiträge zur Entwicklung stabiler verallgemeinerter Finite-Element-Formulierungen für die Beschreibung hydromechanischer Prozesse in gesättigten porösen Medien mit Benchmarks und Anwendungen aus den Gebieten Geo- und Biomechanik von erheblicher Relevanz.

Das Department Umweltinformatik unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Olaf Kolditz wurde im Jahr 2007 am UFZ in Leipzig eingerichtet in gemeinsamer Berufung auf die Professur für Angewandte Umweltsystemanalyse an der TU Dresden. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte liegen in der Angewandten Mathematik (Numerische Methoden für Mehrfeldprobleme) und der Angewandten Informatik (Datenintegration, Visualisierung, Höchstleistungsrechnen und Software-Engineering). Neben der Methodenentwicklung besteht ein sehr starker Anwendungsbezug in der Hydrologie, der Geotechnik und der Energiespeicherforschung. In der Hydrologie stehen Hydrosystemanalyse und integriertes Wasserressourcenmanagement in verschiedenen klimatisch sensitiven Modellregionen im Vordergrund. Das Anwendungsportfolio in der Geotechnik reicht von Endlagerung und CO₂-Speicherung bis hin zur tiefen und oberflächennahen Geothermie. Relativ neu ist als Anwendungsgebiet die technische Energiespeicherung, dabei geht es um die Entwicklung thermochemischer Feststoffspeicher. Das UFZ ist Mitglied des internationalen OpenGeoSys-Konsortiums (www.opengeosys.net) zur Modellierung thermo-hydro-mechanisch-chemischer Prozesse in porösen Medien.

Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Peter Dietrich beschäftigt sich das 2005 gegründete Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des UFZ mit der Entwicklung von Technologien und Messkonzepten zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes. Als Werkzeug dient hierzu die Forschungsplattform MOSAIC (MOdel driven Site Assessment, Information and Control). Das Department kann auf eine umfassende geophysikalische Ausstattung und Direct-Push (DP)-Ausrüstung zurückgreifen. In den letzten Jahren hat sich das Department intensiv mit der Entwicklung von geophysikalischen Messkonzepten vor dem Hintergrund hydrogeologischer Fragestellungen auseinandergesetzt. Ein weiteres breites Forschungsfeld stellt die kombinierte Nutzung von geophysikalischen Messkonzepten mit DP-Technologien zur Charakterisierung des Untergrundes inklusive Grundwasserleitern dar. Diese ermöglichen beispielsweise die Umsetzung von schleppgeophysikalischen Messungen in Kombination mit DP gestützten, hochauflösenden Tiefenprofilen in situ gemessener geotechnischer oder hydrogeologischer Parameter.

Bundesweit erbringt das BET Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH (vormals Ingenieurbüro J. Döhler) Leipzig Planungs-, Beratungs- und Gutachterleistungen

im Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung für öffentliche und private Auftraggeber. Darin einbezogen ist die energie- und klimatechnische Versorgung von Großabnehmern, beginnend mit der Entwicklung von Energiekonzepten und der Auslegung entsprechender Versorgungssysteme bis hin zur Bauüberwachung. Für das F&E-Vorhaben SAGS ist die langjährige Expertise des Unternehmens bei der Erarbeitung von wirtschaftlichen Versorgungskonzepten unter Einbeziehung regenerativer Energien einschließlich der Nutzung des geologischen Untergrundes zur geothermischen Wärmeversorgung bzw. der Wärmespeicherung von speziellem Interesse.

Die JB-ingconsult Leipzig ist im Bau- und Projektmanagement tätig und hat sich insbesondere auf das direkte Management von Energieprojekten bzw. die Beratung von Bauherren und Unternehmen (vorrangig aus dem Planungsbereich) für die energietechnische Versorgung von Bauprojekten unter Nutzung erneuerbarer Energieträger spezialisiert. In diesem Zusammenhang spielt die Geothermie eine zentrale Rolle. Basierend auf seiner Geschäftsphilosophie nimmt das Unternehmen eine wichtige Multiplikatorrolle für die Verwertung von Projektergebnissen des F&E-Vorhabens SAGS ein.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das F&E-Vorhaben SAGS ist in neun Arbeitspakete (AP1-AP9) gegliedert, die sich inhaltlich in die drei Themenfelder „Modellentwicklung“ (AP1-AP3), „Praxisorientierte Testbeispiele“ (AP4-AP6) sowie „Schlussfolgerungen und Ergebnisvermittlung“ (AP6-AP9) einordnen lassen. Zudem wurden die Forschungsarbeiten durch Aktivitäten in den Bereichen Netzwerkbildung und Nachwuchsförderung komplettiert.

Die Entwicklung von Modellierungsstrategien und numerischer Open-Source-Modelle mit spezieller Eignung für die Simulation gekoppelter thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen ist wissenschaftlicher Kern der Forschungsarbeiten von SAGS. Ausgehend von relevanten Bilanzgleichungen und konstitutiven Beziehungen umfasst dies im Einzelnen die Entwicklung geeigneter Modelle in AP1, deren numerische Realisierung im Rahmen der wissenschaftlichen Open-Source-Softwareplattform OpenGeoSys in AP2 sowie die Modell- und Softwarevalidierung auf der Basis numerischer Benchmarks in AP3.

Im Vorhaben entwickelte Modellierungs- und Simulationsinstrumentarien wurden in AP4 mit aus der Literatur abgeleiteten bzw. von den SAGS-Kooperationspartnern erarbeiteten Parametrisierungen zu Testbeispielen zusammengeführt. Virtuelle sowie reale Standorte wurden umfassend und realistisch parametrisiert. Die durch geothermische Nutzungen des oberflächennahen Untergrundes potenziell induzierten Prozesse wurden in AP5 in umfangreichen Sensitivitätsanalysen und Szenarienstudien analysiert. Schließlich waren die Erarbeitung und der Test einer vollständigen Methodik zur modellbasierten Bewertung eines potenziellen oberflächennahen geothermischen Standorts Gegenstand des AP6.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Simulationen der Testbeispiele und besonders der exemplarischen numerischen Studie einer für die Auslegungspraxis angeregten modellbasierten Potenzialbewertung in AP6 wurde in AP7 ein überarbeiteter und ergänzter Workflow für die Prozessanalyse und die Dimensionierung der betrachteten geotechnischen Systeme erarbeitet. Dieser sowie weitere Schlussfolgerungen aus den Forschungsergebnissen des F&E-Vorhabens SAGS waren Grundlage für in AP8 formulierte Anregungen zur Modifikation der aktuellen Auslegungspraxis für großflächige oberflä-

chennahe Geothermiesysteme, die teilweise auch Auswirkungen auf die Optimierung entsprechender Einzelanlagen haben. Die Vorbereitung und Durchführung eines öffentlichen Workshops mit Gästen aus den Bereichen Wissenschaft, Unternehmen und Genehmigungsbehörden war Gegenstand von AP9. Auf diesem Workshop im November 2019 wurde der im Vorhaben erarbeitete Kenntnisstand vermittelt und die betrachtete Forschungsthematik aus verschiedener Sicht offen und konstruktiv diskutiert.

In der Antragsphase wurden für das F&E-Vorhaben SAGS Arbeits-, Zeit- und Kostenpläne erstellt, die während der Projektlaufzeit in Abstimmung mit den Kooperationspartnern des Vorhabens, externen Beteiligten und dem Projektträger wiederholt an die jeweils aktuelle Situation angepasst wurden. Unvorhergesehene Änderungen der ursprünglichen Planung wurden insbesondere durch zeitliche Verzögerungen und notwendige Neuorientierungen bei der Besetzung des Projektpersonals sowie bei der Suche nach einem Standort für die Definition und Parametrisierung von Testbeispielen erforderlich. Dabei bereits zu Projektbeginn entstandene Verzögerungen konnten im weiteren Projektverlauf ausgeglichen werden. Dazu haben neben der Umorganisation einzelner Arbeiten und der verstärkten bzw. vorgezogenen Unterstützung durch Personal der Kooperationspartner insbesondere zwei ausgabenneutrale Projektverlängerungen bis insgesamt März 2017 beigetragen. Mit den Verzögerungen und den kostenneutralen Verlängerungen waren Mittelverschiebungen verbunden, die intensiv aufbereitet sowie begründet und anschließend den jeweiligen Anträgen gemäß vom Projektträger bewilligt wurden. Wesentliche Teile der Projektarbeiten nahmen Konzept- und Modellentwicklung, numerische Implementierung sowie Modell- und Softwarevalidierung durch Benchmarking ein, die im ursprünglich beantragten Rahmen erfolgten. Davon abweichende, spezifische Änderungen des Arbeitsplans mit alternativen Lösungen gegenüber ursprünglich geplanten Aspekten betrafen:

- Für standortorientierte Simulationen wurde zunächst ein Testbeispiel mit für die Region Leipzig typischen geologischen Strukturen definiert und anhand von Literaturwerten parametrisiert. Unter Annahme hypothetischer, realitätsnaher Prozessbedingungen konnten mit diesem Beispiel erste Szenariensimulationen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Basierend auf einer im Rahmen eines anderen Verbundvorhabens durchgeführten Feldstudie des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien des Kooperationspartners UFZ für ein geplantes Neubaugebiet der Stadt Taucha bei Leipzig wurde ein zweites Testbeispiel definiert und mit gemessenen Daten parametrisiert. An diesem Modell konnten reale Szenarien unter Einwirkung bekannter Grundwasserflüsse sowie potenzieller Vereisung des Untergrundes betrachtet werden. Im späteren Projektverlauf gelang es zudem, auf dem Gelände des UFZ ein vorhandenes Geothermietestfeld mit Projektmitteln weiter zu erschließen, so dass ein drittes Testbeispiel für den Vergleich der Auswirkung unterschiedlich aufgelöster Parametrisierungen (Thermal Response Tests mit integraler Parameterermittlung über die Tiefe vs. hochaufgelöste lokale Parametererfassung) definiert und vorbereitet werden konnte.
- Um die geplante numerische Bewertungsstudie während der Projektbearbeitung abschließen zu können, wurden standardisierte Modellierungs- und Simulationsabläufe basierend auf konkreten Szenarien des ersten Testbeispiels ohne Möglichkeit des Vergleichs mit Daten eines Prozessmonitorings getestet und in Form eines Tutorials dokumentiert (vgl. Abschnitt II.6 dieses Sachberichts zum Schlussbericht für SAGS).

- Nach intensiven gemeinsamen Überlegungen vor allem mit den SAGS-Kooperationspartnern aus dem Praxisbereich sowie im Ergebnis der Diskussionen des Anwenderworkshops mit der Präsentation von Zielen, Methoden, Ergebnissen und Schlussfolgerungen des Vorhabens wurde entschieden, einen geplanten Leitfaden zur Unterstützung von Raumplanungsmaßnahmen nicht als Leitfaden zu bezeichnen. Im engeren Sinne stellt dieser eine Handlungsvorschrift mit bindendem Charakter dar, die von Regulierungsbehörden oder Fachverbänden erlassen wird. Die Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen wurden vielmehr in einem Dokument zusammengefasst, das als Studie mit Anregungen für die Planung und Auslegung oberflächennaher Geothermiesysteme gekennzeichnet ist und Hinweise für zweckmäßige Anpassungen von Leitfäden und Richtlinien enthält (vgl. Abschnitt II.6 dieses Sachberichts zum Schlussbericht für SAGS).

Mit den erläuterten Anpassungen der Arbeits-, Zeit- und Kostenpläne verlief das F&E-Vorhaben SAGS insgesamt und über die gesamte Laufzeit betrachtet im Wesentlichen nach Plan. Die angestrebten Projektziele konnten vollständig erreicht werden.

Basierend auf den Forschungsergebnissen des F&E-Vorhabens SAGS, mit dem Ziel, verbliebene Erkenntnis- und Wissenslücken zu schließen, wurde im April 2017 im Rahmen der Ausschreibung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ beim BMWi die Projektskizze für ein Nachfolgevorhaben „Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes“ (EASy-Quart) eingereicht. Für dieses Verbundvorhaben konnten das UFZ sowie ein Unternehmen aus dem Bereich der geothermischen Planung als Partner gewonnen werden, was die erfolgreichen Bemühungen um langfristige Netzwerkbildung in SAGS unterstreicht. Die Projektskizze greift wesentliche Grundzüge des Vorhabens SAGS im Sinne der Kombination von Modellentwicklung, Parametrisierung, Sensitivitätsanalysen, Szenariestudien und Analyse regulativer Rahmenbedingungen auf. Neue Schwerpunkte werden mit der integrativen Einbeziehung der Haustechniksimulation, der Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Parametrisierung von Berechnungsmodellen, der Gestaltung eines Versorgungsinformationssystems unter Nutzung integrierter 3D-Visualisierungsmodelle und der Entwicklung spezifischer Elemente für standortbezogene daten- und wissensbasierte Entscheidungshilfesysteme zur Auslegung und Planung oberflächennaher geothermischer Systeme gesetzt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In der Gebäudeversorgung spielen lokale geothermische Konzepte eine immer größere Rolle beim energieeffizienten Heizen und/oder Kühlen von privaten und öffentlichen Bauwerken. Bei diesen Technologien wird der geologische Untergrund direkt als Wärmequelle oder -senke genutzt, wobei dem Boden über ein in Rohrschleifen zirkulierendes Trägermedium Wärme entzogen oder in ihn eingetragen wird. Für den Einsatz von Erdwärmesonden, in der Regel als Einzelanlagen, liegen umfangreiche Erfahrungswerte und ein breites Literaturangebot vor, welches hier lediglich exemplarisch mit ausgewählten Quellen zitiert werden kann. Beispielsweise existieren Regelwerke und Leitfäden der Verbände und Bundesländer, die Auslegungsrichtlinien und Hinweise für Bau und Betrieb der Anlagen liefern und spezifische Anforderungen an Modellierung und Simulation zu deren Auslegung skizzieren (Bockelmann et al., 2011; Erdwärmesonden, 2011; Geothermi-

sches Kartenwerk, 2009; Koenigsdorff, 2011; VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie, 2008; VDI Richtlinie 4640, 2001).

Für die Konzeption und Genehmigung der Anlagen sind Aussagen über die konkreten hydrogeologischen, thermischen und bodenphysikalischen Vorgänge im Untergrund von essenzieller Bedeutung hinsichtlich der prinzipiellen Umsetzbarkeit und der zu erwartenden Effizienz der Anlage über einen längeren Zeithorizont. Wesentliche thermophysikalische Materialkennwerte wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit oder die spezifische Wärmekapazität des Untergrundes werden zur Auslegung der Anlagen benötigt. Diese können u. a. im Labor an Proben bestimmt werden, die während der Bohrung gewonnen wurden. Hierbei wird aber ein möglicher Einfluss einer Grundwasserströmung nicht erfasst. Mittels Thermal Response Tests können diese thermischen Eigenschaften des Untergrundes in situ bestimmt werden (Sanner et al., 2000). Untersuchungen haben gezeigt, dass in dieser Form ermittelte Materialparameter häufig von den allein über die Lithologie geschätzten Werten abweichen, was zu Über- oder Unterdimensionierung der Geothermieanlage führen kann (Koenigsdorff, 2011; Sauer et al., 2007).

Beim Betrieb von mehreren Erdwärmesonden bzw. bei Geothermiefeldern können aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Sonden und eventueller Strömungen im Grundwasser Langzeiteffekte bezüglich der thermodynamischen Prozesse im Untergrund auftreten. Hier kann es mehrere Jahre bis Jahrzehnte dauern, bis sich ein stationärer Zustand ausbildet. Derzeit gibt es noch relativ wenig Literatur, in der konkrete Aussagen zum Betrieb und besonders zur Auslegung von großflächigen Geothermiesystemen getroffen werden. Der Leitfaden Erdwärme, BWP (2011) weist beispielsweise auf die Wichtigkeit eines sachgemäßen Designs von Erdwärmesondenanlagen hin, ohne detaillierte Handlungsempfehlungen zu geben. So kann es bei zu starkem Wärmeentzug zu Gefriererscheinungen im Untergrund kommen, die besonders im Wechsel mit Tauphasen Schäden im Boden, an den Sonden oder der Hinterfüllung im Bohrloch hervorrufen können. Damit kann die Effizienz des Systems deutlich vermindert werden (Stober und Bucher, 2012). Die Relevanz dieser Prozesse ist im Zusammenhang mit dem Betrieb geothermischer Systeme bisher kaum untersucht.

Zur qualitativen und quantitativen Untersuchung der Prozesse, die bei einer Nutzung des oberflächennahen Untergrundes als Wärmequelle oder -senke mittels Erdwärmesonden ablaufen, stehen derzeit verschiedene Simulationsinstrumente zur Verfügung (Bauer, 2011; Koenigsdorff, 2011; Stober und Bucher, 2012). Bereits Mitte der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurden in den USA spezifische Modelle entwickelt und teilweise in wissenschaftliche Software implementiert, um im geologischen Untergrund ablaufende thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse zu beschreiben, die mit der thermischen Nutzung des Untergrundes als Energiequelle oder Energiespeicher verbunden sind (u. a. Bödvarsson et al., 1982; Doughty et al., 1982; Tsang et al., 1981). Molson (Molson et al., 1992) stellte beispielsweise ein dreidimensionales Finite-Element-Modell zur Simulation der Kopplung zwischen Grundwasserströmung und Wärmetransport ohne Berücksichtigung der Geomechanik vor. Diese Untersuchungen hatten jedoch vorrangig Grundlagencharakter.

Dynamische Prozesse in Gebäuden und Anlagen wie z.B. Wärmeleitung, Konvektion, Luftströmung u. a. können mit dem Programm TRNSYS simuliert werden (TRNSYS, 1995). Für die Betrachtung von Erdwärmesonden und anderen geothermischen Baugruppen werden spezielle Software-Module zur Verfügung gestellt bzw. können auch vom

Anwender selbst über offene Schnittstellen entwickelt werden. TRNSYS und andere spezialisierte Programmsysteme für die Simulation von Erdwärmesonden, wie beispielsweise SBM (Eskilson, 1986), COSOND (Eugster, 1991) oder EWS (Huber und Schuler, 1997) betrachten jedoch im Wesentlichen technische Systemkomponenten und berücksichtigen das Erdreich nur in stark vereinfachter Form.

Geotechnische Anwendungen können darüber hinaus mit einer Reihe etablierter kommerzieller Programmsysteme simuliert werden, wie ECLIPSE (Schlumberger, 2007) oder TOUGH (Pruess, 2004). Während ECLIPSE das klassische Simulationswerkzeug für die Erdölindustrie ist und somit für den tiefen geologischen Bereich spezialisierte Module anbietet, stellt die TOUGH-Familie eine kommerziell vertriebene Hochschulentwicklung dar, für die zur Berücksichtigung von Deformationsprozessen Kopplungen zu anderen Programmsystemen benötigt werden (Rutqvist, 2011). Die genannten Programmsysteme werden vorrangig für großskalige geotechnische Probleme genutzt, die deutlich andere Fragestellungen als die hier untersuchten oberflächennahen geothermischen Systeme betrachten. Hingegen wurde das kommerzielle Softwareprogramm FEFLOW insbesondere für die Simulation von Wasserströmungen sowie Masse- und Wärmetransport in porösen Medien entwickelt und spricht damit ein Anwendungsgebiet an, dem auch die im F&E-Vorhaben SAGS untersuchten Systeme zuzuordnen sind (Diersch et al., 2011b). So findet FEFLOW beispielsweise breite Anwendung bei der Simulation verschiedener geotechnischer Konzepte, wie z. B. der Berechnung des Wärmetransports und der Strömung in der Umgebung von Erdwärmesonden (Bauer et al., 2009). FEFLOW wird auch im VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie (2008) als Referenzprogramm angegeben.

Die genannten komplexen wissenschaftlichen und kommerziellen Simulatoren bieten teilweise keine interne Kopplung der physikalischen Prozesse, müssen daher in diesen Fällen mittels Dateiaustausch an externe Spezialprogramme gekoppelt werden, was die Effizienz und Genauigkeit der Gesamtberechnung beeinträchtigt. So werden beispielsweise Deformationsprozesse in keinem der o. g. Simulationsprogramme berücksichtigt. Des Weiteren ist die Anschaffung der Programme für klein- und mittelständische Unternehmen wirtschaftlich in der Regel nicht vertretbar.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das übergeordnete Ziel des F&E-Vorhabens SAGS bestand in der Entwicklung, numerischen Realisierung, Validierung und Anwendung eines Modellierungsinstrumentariums zur Unterstützung von Entwicklungs-, Planungs- und Genehmigungsaktivitäten im Bereich der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen bei besonderer Berücksichtigung großflächiger Systeme. Zur Einbeziehung spezifischer fachlicher Expertisen, die beim Zuwendungsempfänger bei Antragstellung nicht in ausreichendem Maße vorhanden waren, sowie zur Unterstützung der Netzwerkbildung und des Wissenstransfers wurden eine außeruniversitäre wissenschaftliche Einrichtung (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ) und zwei Planungsbüros aus dem Geothermiebereich (BET Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH (vormals Ingenieurbüro J. Döhler); JB-ingconsult) als Kooperationspartner in das Vorhaben eingebunden.

Für die Realisierung eines integrierten Modellierungs- und Softwareansatzes im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS war die intensive Zusammenarbeit mit dem Department Umweltinformatik des Kooperationspartners UFZ unter Leitung von Prof. Dr. Olaf Kolditz

unerlässlich, da als gemeinsame Softwaregrundlage der wissenschaftliche Open-Source-Code OpenGeoSys genutzt und für die Bearbeitung der spezifischen Projektaufgaben weiterentwickelt wurde. Das UFZ ist Hauptentwickler von OpenGeoSys und koordiniert die internationale Entwicklergemeinschaft für dieses Softwareprojekt zur Simulation thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelter Prozesse in geklüfteten, porösen Medien. Bezüglich der in den betrachteten geotechnischen Systemen beobachteten wesentlichen Prozesse wurden in SAGS folgende Problemstellungen gemeinsam mit dem Kooperationspartner UFZ aufbereitet und analysiert:

- Untersuchung des Wärme- und Fluidtransportverhaltens an großflächigen oberflächennahen Geothermiestandorten und den angrenzenden Bereichen und
- Untersuchung von Phasenwechsellvorgängen und deren Systemauswirkungen beim potenziellen Gefrieren von Bodenbereichen im Nahfeldbereich von Erdwärmesonden.

Gemeinsam mit Mitarbeitern des Kooperationspartners UFZ entwickelten die Projektbearbeiter ebenso Benchmarks für die Validierung von Modellen sowie Software.

Eine wesentliche Aufgabenstellung von SAGS war die Definition und Parametrisierung von Testbeispielen basierend auf realen Standortdaten, um mit Hilfe umfangreicher Sensitivitätsanalysen und Szenarienstudien Hinweise für die zweckmäßige Anpassung von regulativen Rahmenbedingungen zur Planung und Genehmigung großflächiger oberflächennaher Geothermieanlagen zu erlangen. Die Suche nach einem geeigneten Testfeld wurde maßgeblich durch die beiden Kooperationspartner aus dem Bereich der geothermischen Planungsbüros unterstützt. Als externer Partner wurde zeitweilig auch die Leipziger Stadtbau AG in die Testfeldsuche einbezogen, ein Projektentwickler, der nach intensiven Verhandlungen auch einen konkreten Standort zur Verfügung stellen konnte. Erste Arbeiten zur geophysikalischen Vorerkundung des Standorts wurden vom Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des Kooperationspartners UFZ unter Leitung von Prof. Dr. Peter Dietrich vorgenommen. Von einer endgültigen Erschließung für die Definition eines Testbeispiels musste jedoch aus Zeitmangel wegen des umfangreichen Genehmigungsaufwandes Abstand genommen werden. Mit starker Unterstützung des Kooperationspartners UFZ konnte letztlich ein vorhandenes Testfeld auf dessen Gelände als Grundlage für die Definition eines realen Beispiels ausgewählt werden. Für die Parametrisierung des Standortmodells wurden zum Vergleich Thermal Response Tests (TRT) beauftragt und andererseits vom Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des Kooperationspartners UFZ Daten hochauflösender innovativer Messverfahren genutzt. Die Installation der Erdwärmesonden und die Durchführung der TRT wurden von der aQua-thermic Ingenieurgesellschaft mbH Strausberg im Rahmen eines Auftrags realisiert. Zur Analyse der Reproduzierbarkeit von TRT-Daten wurden diese am betrachteten Standort gegen Projektende von der geoENERGIE Konzept GmbH Freiberg wiederholt. Beide Unternehmen aus dem KMU-Bereich sind langjährig als Planungsunternehmen im Bereich Erdwärme tätig.

Wie bereits erwähnt, konnten aus den Projektergebnissen des F&E-Vorhabens SAGS gezogene Schlussfolgerungen genutzt werden, Anregungen für die Anpassung regulativer Rahmenbedingungen (Leitfäden, Richtlinien etc.) zu formulieren. Für einen Abgleich des aktuellen Standes der Auslegungspraxis (z. B. Verfahren, Workflows, Dokumente, Datenquellen) wurde regelmäßig Kontakt zu allen Kooperationspartnern des Vorhabens gehalten und in der letzten Projektphase auch der neu entstandene Bezug zur geoENERGIE

Konzept GmbH genutzt, da die genannten Unternehmen in ihrer täglichen Praxis in relevante Planungs- und Genehmigungsverfahren einbezogen sind und sich das Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des UFZ bereits in anderen Forschungsprojekten eine spezifische Expertise zu dieser Thematik erarbeiten konnte.

Um die Konzepte, Methoden und Ergebnisse des hier dargelegten Projekts bekannt zu machen, wurde am 23. November 2016 beim Kooperationspartner UFZ ein SAGS-Anwenderworkshop ausgerichtet. Eingeladen waren Vertreter der Kooperationspartner, von Planern (u. a. geoENERGIE Konzept GmbH), Genehmigungsbehörden (u. a. Untere Wasserbehörde Leipzig) und wissenschaftlichen Einrichtungen (u. a. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel), um die Thematik aus unterschiedlicher Sicht kritisch zu diskutieren und Kontakte zu knüpfen, die in eine langfristige Netzwerkbildung münden können. Insbesondere im Bereich der Methodenentwicklung und der Diskussion von Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen war diese Abstimmung hilfreich, um die Anwendbarkeit der Methoden und Konzepte zu prüfen sowie die durchgeführten Forschungsarbeiten unter den geltenden wirtschaftlichen, rechtlichen, wissenschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen einordnen zu können. Weitere Möglichkeiten, die Projektergebnisse Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft aber auch einer breiten, interessierten Öffentlichkeit vorzustellen waren die UFZ EnergyDays 2017 sowie der Tag der Wissenschaft beim Zuwendungsempfänger HTWK, zu dem jeweils in den Jahren 2015 und 2016 von der Projektleiterin bzw. von Projektmitarbeitern Vorträge gehalten wurden.

I.6 Danksagung

Die Autorinnen und Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung, den kooperierenden Partnern Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, BET Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH (vormals Ingenieurbüro J. Döhler) und der JB-ingconsult für die effektive Zusammenarbeit, die professionelle Betreuung der Projektbearbeiter und die erbrachten konzeptionellen und methodischen Leistung sowie dem Projektträger Jülich und der VDI Technologiezentrum GmbH für die herausragende und unterstützende Betreuung des Vorhabens SAGS.

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielt es Ergebnis im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Erdwärmesonden(systeme) gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen haben in den vergangenen Jahren wachsendes Interesse beim Heizen und Kühlen von Gebäuden geweckt. Zu Heizungszwecken wird dem oberflächennahen Untergrund Energie über ein Wärmeträgerfluid (meist Wasser mit Frostschutzmitteln) entzogen, das durch Erdwärmesonden zirkuliert. Im Fall der Gebäudekühlung kann die dabei entstehende Überschusswärme über Erdwärmesonden in den Untergrund eingebracht werden. Das am weitesten verbreitete Konzept zur Nutzung oberflächennaher geothermischer Systeme ist gegenwärtig die vertikale Installation von Erdwärmesonden zum Wärmeaustausch mit dem Untergrund bestehend aus Lockergestein (hier und im Weiteren als Boden bezeichnet) und/oder Fest-

gestein. Die aus dem Untergrund gewonnene Wärmeenergie muss in der Regel durch Wärmepumpen auf die für die Gebäudeversorgung (z. B. Fußbodenheizung, Warmwasserbereitstellung) notwendigen Temperaturen angehoben werden. Die Temperatur im Untergrund wird in den oberen 10...15 m unterhalb der Erdoberfläche vorrangig durch Variationen der Oberflächentemperatur und konvektiven, meist horizontalen Wärmetransport durch Grundwasserströmungen beeinflusst. Für die Bodentemperatur in tieferen Schichten sind hingegen maßgeblich der geothermische Gradient (charakterisiert den Wärmetransport durch Prozesse im Erdkern) und damit vertikale geothermische Wärmeströme entscheidend. Die Entwicklung verbesserter Instrumentarien zur Modellierung der in oberflächennahen geothermischen Systemen ablaufenden komplexen Prozesse war primäres Ziel des F&E-Vorhabens SAGS.

Wissenschaftlicher Kern der Forschungsarbeiten in SAGS war die Modellierung und numerische Simulation gekoppelter thermischer, hydrogeologischer und geomechanischer Prozesse im oberflächennahen Untergrund an geothermisch genutzten Standorten. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch Ableitung von Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen, die geeignet sind, Anregungen zur potenziellen Anpassung regulatorischer Rahmenbedingungen für Errichtung und Betrieb großflächiger oberflächennaher Geothermieanlagen zu geben. An geothermisch genutzten Standorten werden durch langfristigen Wärmeentzug aber auch Wärmeeintrag zu Speicherzwecken in Abhängigkeit von den geologischen und Prozessbedingungen signifikante Änderungen insbesondere der Bodentemperatur erwartet und beobachtet, die Rückwirkungen auf hydraulische und geomechanische Bodencharakteristika sowie die Effizienz des Systems Erdwärmesonden-Wärmepumpe haben. Somit kann auf elementare Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen physikalischen Prozessen geschlossen werden. Es war beabsichtigt, einige dieser gekoppelten Prozesse (z. B. Temperaturentwicklung mit und ohne Grundwasserströmung, Gefriervorgänge) zu quantifizieren, die zum Zeitpunkt der Antragstellung mit kommerzieller Standardsimulationssoftware nicht oder nur unter spezifischen Bedingungen erfasst werden konnten. Zu diesem Zweck wurden in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern von SAGS adäquate Komponenten für die wissenschaftliche Open-Source-Softwareplattform OpenGeoSys entwickelt und unter Berücksichtigung von Aspekten eines modernen Softwareengineering realisiert.

In diesem Bericht werden die Modellierungskonzepte und -ansätze sowie exemplarische Ergebnisse von Benchmark- und Anwendungssimulationen unterschiedlicher Kopplungsszenarien komplexer physikalischer Prozesse mit Schwerpunkt auf

- Analyse von nichtisothermem Einphasenfluss in deformierbaren porösen Medien,
- Entwicklung flexibler, effizienter numerischer Erdwärmesondenmodelle und
- Untersuchung von Phasenwechsellvorgängen bei Gefrierprozessen im Boden und deren potenzielle Auswirkungen auf mechanisches Schädigungsverhalten

dargestellt. Die hier diskutierten fundamentalen Konzepte, Modelle und Algorithmen sind von übergeordneter Relevanz und lassen sich mit problemspezifischen Modifikationen auf unterschiedliche Aufgabenstellungen im Bereich der porösen Medien anwenden.

Entsprechend der nachfolgend im Detail beschriebenen Projektergebnisse wurde das angestrebte Ziel der Forschungsarbeiten, die Entwicklung von Modellierungskonzepten und -instrumentarien für die Analyse gekoppelter Prozesse in großflächigen oberflächennahen Geothermiesystemen als Beitrag für die Bewertung der Potenziale und der Sicherheit

dieser Anlagen sowie deren Auswirkungen auf Schutzgüter, in vollem Umfang erreicht. Dabei wurden in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern aus Wissenschaft und Wirtschaft die nachstehenden Themenfelder bearbeitet und die aufgeführten Ergebnisse erzielt. Die Struktur der folgenden Abschnitte entspricht im Wesentlichen der in Abschnitt I.3. dieses Sachberichts vorgestellten Arbeitspakete des F&E-Vorhabens SAGS, deren spezifische Ziele ebenfalls erreicht werden konnten. Mit der Anwendung des entwickelten Modellierungs- und Simulationsinstrumentariums auf praxisorientierte Testbeispiele konnten die Modelle, numerischen Verfahren und Softwarekomponenten an realistischen Szenarien validiert werden. Darauf basierend wurde zudem das für Auslegungs- und Planungsprozesse großflächiger oberflächennaher Geothermiesysteme grundlegende Ziel erreicht, anhand der Simulationsergebnisse Erkundungs- sowie Monitoringkonzepte zu bewerten und gegebenenfalls anzupassen.

II.1.1 Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes: Bilanz- und Konstitutivbeziehungen

Konzeptionelle Grundlage der im Projekt entwickelten Modelle zur Simulation von Transport- und Deformationsprozessen in porösen Medien stellt die Mischungstheorie ergänzt um das Konzept der Volumenanteile dar. Im Rahmen dieser erweiterten Mischungstheorie können alle kinematischen und physikalischen Größen auf der Makroebene in einem kontinuumsmechanischen Sinn als lokale statistische Mittelungen ihrer Werte auf der unterliegenden Mikroebene angesehen werden. Diese Vorstellung ist gleichbedeutend mit der Annahme, dass die Masseanteile aller Bestandteile eines Mehrphasenmediums gleichzeitig präsent und statistisch gleichförmig über das gesamte Kontrollvolumen verteilt sind. In diesem Sinn wird der reale poröse materielle Körper theoretisch durch ein Gesamtkontinuum ersetzt, das vollständig und gleichmäßig durch sich überlappende homogenisierte Partialkontinua ausgefüllt ist. Mit anderen Worten, alle Phasen und/oder Komponenten eines porösen Mediums werden im Rahmen der modifizierten Mischungstheorie als „verschmierte“ Ersatzkontinua mit reduzierter Massedichte dargestellt. Folglich können die Bewegungsvorgänge und die physikalischen Prozesse der einzelnen Bestandteile eines porösen Mediums sowie auch des Gesamtkontinuums mit anerkannten phänomenologischen Methoden der Kontinuumsmechanik beschrieben werden. Zur Erfassung der Mikrostruktur eines porösen Mediums auf makroskopischer Ebene werden skalare Variablen wie die Volumenanteile (z. B. die Porosität als summarischer Volumenanteil aller fluiden Bestandteile des Gesamtkontinuums) oder die Sättigungen definiert.

Entsprechend den Annahmen über poröse Medien können oberflächennahe geologische Formationen, die für eine geothermische Bewirtschaftung vorgesehen sind, als Mischung eines Feststoffgerüsts und eines Porenfluidanteils bestehend aus

- einer partikulären Flüssigkeit bzw. einem partikulären Gas (Einphasenfluss in gesättigten porösen Medien) oder
- einem nicht mischbaren Gemenge von Flüssigkeiten und/oder Gasen (Mehrphasenfluss in (ungesättigten) porösen Medien) bzw.
- einem nicht mischbaren Fluidgemenge mit möglichen Phasenübergängen basierend auf Eiskristallisation

angesehen werden.

Die bestimmenden Feldgleichungen für die Modellierung von Transport- und Deformationsprozessen in porösen Medien werden auf der Basis der lokalen, partikulären Bilanzbeziehungen der Bestandteile eines porösen Mediums formuliert. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die Masse- und Impulsbilanzen sowie, bei nichtisothermen Prozessen, die Energiebilanzen. Zusätzlich wird angenommen, dass die Bilanzbeziehungen sowohl der Bestandteile eines porösen Mediums als auch des Gesamtkontinuums analog zu den klassischen Beziehungen der Kontinuumsmechanik für Einphasenmaterialien formuliert werden können. Wechselwirkungsmechanismen zwischen den einzelnen Bestandteilen eines porösen Mediums werden mit Hilfe so genannter Austauschterme (in der Literatur häufig auch Produktionsterme genannt) in den partikulären Bilanzbeziehungen beschrieben. Zur Definition der Bilanzbeziehungen des Gesamtkontinuums wird die Superposition der partikulären Relationen genutzt.

Entsprechend der konkreten Aufgabenstellung für die Betrachtung komplexer Vorgänge im geotechnischen Bereich werden die Bilanzbeziehungen unter Berücksichtigung spezifischer Annahmen in den erforderlichen Primärvariablen formuliert. Beispielsweise wird im isothermen Fall des Zweiphasenflusses in deformierbaren porösen Medien (z. B. Porenwasser und Luft in ungesättigten Böden) in der Regel der Masseaustausch zwischen den einzelnen Phasen vernachlässigt, zusätzlich werden alle Phasen als intrinsisch inkompressibel angesehen. Zu den erforderlichen Feldgleichungen gehören in diesem Fall die Massebilanzen der beiden fluiden Phasen (unter Berücksichtigung der Massebilanz der festen Phase) sowie die Impulsbilanz des Gesamtkontinuums. Die Verschiebungen der festen Phase („verschmierte“ Feststoffmatrix) des porösen Mediums beschreiben die Deformationsprozesse als Primärvariable, Transportvorgänge der fluiden Phasen können durch Druck- und/oder Sättigungsgrößen charakterisiert werden. In den Satz an Feldgleichungen für nichtisotherme Prozesse in porösen Medien wird zudem die aus der Energiebilanz abgeleitete Wärmeleitungsgleichung für das Gesamtkontinuum integriert. Zu den oben genannten Primärvariablen wird in diesem Fall die Temperatur hinzugefügt. Für die Herleitung der Wärmeleitungsgleichung wird dabei hier, der üblichen Vorgehensweise für die betrachteten Anwendungen folgend, die Existenz lokaler thermischer Gleichgewichtszustände angenommen (einheitliche Temperatur aller beteiligten Phasen und Komponenten des porösen Mediums im betrachteten materiellen Punkt).

Während die aus den Bilanzbeziehungen abgeleiteten Feldgleichungen fundamentale physikalische und thermodynamische Eigenschaften der betrachteten Materie unabhängig derer spezifischer Materialeigenschaften beschreiben, differiert die Reaktion eines physikalischen Körpers auf äußere Einflüsse in der Realität je nach dessen Beschaffenheit und konstitutiven Eigenschaften. Aus diesem Grund sind die Bilanzgleichungen um Materialgleichungen (konstitutive Beziehungen) zu ergänzen, die das materialspezifische Verhalten charakterisieren. Im mathematischen Sinn ist diese Feststellung äquivalent mit der Formulierung eines geschlossenen Gleichungssystems zur Modellierung der betrachteten Prozesse (übereinstimmende Anzahl von Gleichungen und Unbekannten), das aus Bilanz- und konstitutiven Beziehungen besteht. Im Kontext der Simulation gekoppelter Vorgänge in oberflächennahen geothermischen Reservoiren werden je nach Komplexität der Aufgabenstellung folgende konstitutive Beziehungen relevant:

- Relationen für die Austauschterme in spezifischen Bilanzbeziehungen individueller Bestandteile des Gesamtkontinuums (beispielhaft sind Annahmen für die Impulsaustauschterme zwischen der festen und fluiden Phasen, mit deren Hilfe sich aus

den Impulsbilanzen der fluiden Phasen die partikulären Darcyschen Gesetze zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen der festen und den unterschiedlichen fluiden Phasen ableiten lassen),

- Konstitutiv- und Zustandsgleichungen für Porenfluideigenschaften, wie Druck, Dichte, Viskosität, kritische Parameter, relative Permeabilität sowie Sättigung (z. B. Ansätze von Brooks-Corey oder van Genuchten für Beziehungen zwischen Kapillardruck sowie relativer Permeabilität und Sättigung),
- Beziehungen zwischen dem Tensor der Effektivspannungen und dem elastischen Anteil des Verzerrungstensors bezüglich der festen Phase des porösen Mediums (z. B. Hookesches Gesetz der linearen Elastizität) sowie gegebenenfalls Entwicklungsgleichungen für spezifische innere Variable bei inelastischem Materialverhalten der festen Phase (z. B. Fließregeln bei elastisch-plastischen Effekten),
- Entwicklungsgleichungen für Schädigungsvariablen im Fall zu erwartender Mikrorissbildung in der Gesteinsmatrix,
- Relationen für die thermischen Parameter des Gesamtkontinuums ausgehend von den partikulären Werten für dessen Bestandteile sowie gegebenenfalls Gleichungen für die Temperaturabhängigkeit spezifischer Materialparameter.

In Übereinstimmung mit der Zielstellung des F&E-Vorhabens SAGS wurden in einer ersten Bearbeitungsphase die relevanten, spezifischen Feld- und Konstitutivgleichungen entwickelt und in die wissenschaftliche Open-Source-Softwareplattform OpenGeoSys implementiert (thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Simulation). Zu Details der konzeptionellen Grundlagen der verwendeten erweiterten Mischungstheorie sowie den konkreten Feld- und Konstitutivgleichungen, die als Basis für die im Vorhaben durchgeführte Modellierung und Simulation gekoppelter thermisch-hydraulisch-mechanischer Probleme bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen dienen, wird insbesondere auf die Arbeiten Hein et al. (2011a,c) sowie Shao et al. (2016a) der Projektbearbeiter sowie die darin zitierte Literatur verwiesen.

II.1.2 Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes: Numerische Modelle zur Abbildung von Erdwärmesonden

In der Praxis werden gegenwärtig vier gängige Typen von Erdwärmesonden für die Bewirtschaftung oberflächennaher geothermischer Systeme verwendet: einfaches U-Rohr, Doppel-U-Rohr, zentrierte Koaxialsonde, ringförmige Koaxialsonde. Wie bereits oben beschrieben erfolgt der Wärmeaustausch zwischen dem Untergrund und der Erdwärmesonde über ein in dieser zirkulierendes Wärmeträgerfluid (in der Regel Wasser versetzt mit Frostschutzmittel), das Wärme aus dem Untergrund absorbiert (Heizmodus) oder in diesen einträgt (Kühlmodus, d. h. Injektion von Überschusswärme aus dem Betrieb von Anlagen zur Gebäudeklimatisierung in den Untergrund).

Erdwärmesonden sind in der Regel nicht in direktem Kontakt mit dem Untergrund. Zur Stabilisierung der Sonde sowie für einen möglichst lückenlosen Kontakt zwischen der Sonde und deren Umgebung wird das Bohrloch zur Installation einer Erdwärmesonde durch ein wärmeleitfähiges Hinterfüllmaterial abgedichtet. Die Abbildung des komplexen Systems Untergrund/Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde im Rahmen eines Berechnungsgitters für die Nutzung von Ortsdiskretisierungsverfahren, wie beispielsweise der Finite-Element-Methode, zur numerischen Simulation der in diesem System ablaufenden

Prozesse ist bereits strukturell anspruchsvoll. Grund hierfür sind besonders die gravierenden Unterschiede in den horizontalen Dimensionen der einzelnen Systemkomponenten. Bezogen auf ein komplexes Standortmodell stellen Erdwärmesonden lediglich linienförmige Strukturen dar, die von Hinterfüllmaterial mit gleichfalls geringer horizontaler Ausdehnung umgeben sind. In der Vergangenheit wurden besonders zwei Modellansätze zur Integration von Erdwärmesonden in Untergrundsimulationen favorisiert: analytische oder semianalytische Methoden zur Simulation der thermodynamischen Wirkung der Erdwärmesonde in einem räumlichen Untergrundmodell oder vollständige 3D-Vernetzung aller Systemkomponenten mit entsprechend hoher Gitterauflösung des Systems Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde. Ein kurzer Literaturüberblick und eine Diskussion von Vor- und Nachteilen dieser Ansätze werden in Abschnitt II.5. dieses Sachberichts dargeboten.

Mit dem von Al-Khoury und Bonnier (2006) sowie Al-Khoury et al. (2005, 2010) erstmals vorgestellten und von Diersch et al. (2011a, 2011b) wesentlich weiterentwickelten so genannten Doppel-Kontinuum-Ansatz gelang es, ein ausreichend flexibles Erdwärmesondenmodell zu entwickeln, um unterschiedliche Randbedingungen und heterogene Bodeneigenschaften bei deutlich reduziertem Bedarf an Rechenressourcen zu simulieren. Grundgedanke dieses Ansatzes ist es, die Erdwärmesonde als ein eindimensionales Kontinuum zu formulieren, das die Wärmetransportprozesse in der Sonde und im Hinterfüllmaterial beschreibt und als Linienelement in 3D-Finite-Element-Gitter des betrachteten Standorts integriert wird, um so die Kopplung an die Wärmetransportprozesse zu realisieren. Diese Form numerischer Erdwärmesondenmodelle wurde auch im F&E-Vorhaben SAGS genutzt und weiterentwickelt. Nachfolgend werden die Grundlagen und das Konzept dieses Ansatzes näher erläutert. Für weitere Details, auch zu den konkreten Gleichungen und Funktionen wird auf die Arbeiten Hein et al. (2016a) sowie Shao et al. (2016a) verwiesen.

Im Rahmen eines Doppel-Kontinuums-Ansatzes für die Integration von Erdwärmesonden in Simulationsmodelle für oberflächennahe geothermische Standorte wird der Wärmeaustausch zwischen den Systemkomponenten (zirkulierendes Fluid in den Rohren der Erdwärmesonde, Hinterfüllmaterial, Bohrlochwand) mit Hilfe thermischer Widerstands-Kapazitäts-Netzwerke in Analogie zu elektrischen Schaltkreisen modelliert. Derartige Netzwerke dienen als mathematische Ersatzmodelle für den Wärmetransport im System Untergrund/Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde. Analog zu entsprechenden Schaltkreismodellen der Elektrizitätslehre beschreiben dabei die Widerstände Prozesse der Wärmeleitung und die Kondensatoren Prozesse der Wärmespeicherung.

Der Wärmetransport im System Untergrund/Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde wird über fünf Pfade realisiert: i) zwischen dem Einlassstrang der Erdwärmesonde und dem entsprechenden Bereich des Hinterfüllmaterials; ii) zwischen dem Auslassstrang der Erdwärmesonde und dem entsprechenden Bereich des Hinterfüllmaterials; iii) zwischen den beiden Bereichen des Hinterfüllmaterials; iv) und v) zwischen den beiden Bereichen des Hinterfüllmaterials und dem Untergrund (vgl. Abb. II.1-1). Für jeden dieser einzelnen Pfade wird der Wärmestrom zwischen den beteiligten Systemkomponenten als Produkt der Temperaturdifferenz zwischen den jeweiligen Systemkomponenten und einem Wärmeübergangskoeffizienten betrachtet. Die Wärmeübergangskoeffizienten sind ihrerseits durch die Parameter der thermischen Widerstände und die Fläche charakterisiert, über die der Wärmetransfer zwischen den betrachteten Systemkomponenten stattfindet.

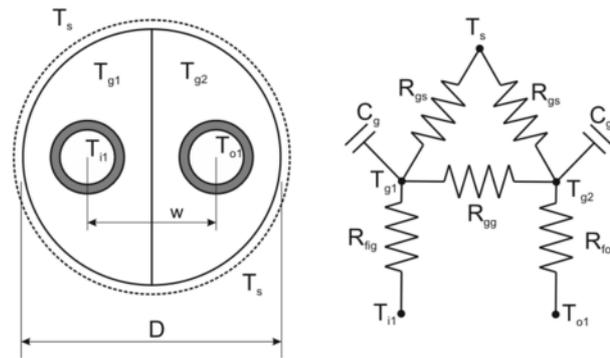


Abbildung II.1-1: Horizontalschnitt durch die Konfiguration einer Erdwärmesonde vom Typ eines einfachen U-Rohrs (links) und schematische Darstellung des korrespondierenden Widerstands-Kapazitäts-Konzepts zur Simulation der Prozesse im System Erdwärmesonde/Hinterfüllmaterial (rechts). Mit $i1$ wird der Einlassstrang der Erdwärmesonde bezeichnet, mit $o1$ der Auslassstrang, $g1$ und $g2$ bezeichnen entsprechend die Bereiche des Hinterfüllmaterials auf der Seite des Einlass- bzw. des Auslassstrangs und der Index S kennzeichnet Größen, die auf den Untergrund bezogen sind (Abb. aus Shao et al. 2016a nach Diersch, 2014).

Auf der Basis klassischer kontinuumsmechanischer Ansätze für den Untergrund sowie der Netzwerkmodelle für das System Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde wird ein System von Wärmeleitungsgleichungen formuliert, das die Wärmetransportprozesse im Gesamtsystem und seinen einzelnen Komponenten charakterisiert.

Die Wärmeleitung im Untergrund wird wesentlich durch Wärmekonvektion mit dem Porenfluid (z. B. Grundwasserströmung) und Wärmeleitung im Festkörpergerüst der porösen Bodenmaterialien bestimmt. Somit basieren die Feldgleichungen für den Wärmetransport im Untergrund auf den spezifischen Formulierungen der Masse-, Impuls- und Energiebilanzen für Festkörpergerüst und Porenfluid unter Berücksichtigung des Darcy-Ansatzes für den Zusammenhang zwischen Porenwasserdruck und Strömungsgeschwindigkeit. Im Rahmen der Modellentwicklung für das F&E-Vorhaben SAGS wird zunächst von vollständiger Sättigung des Bodens ausgegangen.

Während der Wärmetransport im Hinterfüllmaterial primär durch Wärmedispersion gekennzeichnet ist, ist für thermische Prozesse in der Erdwärmesonde vorrangig die Wärmekonvektion durch die Strömung des zirkulierenden Wärmeträgerfluids charakteristisch. Bestimmende Größen sind dabei die Fließgeschwindigkeit des Fluids sowie die Ein- und Auslasstemperaturen an der Wärmesonde.

Der Wärmeaustausch zwischen den Komponenten des Systems Untergrund/Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde und damit die Kopplung zwischen den separaten Wärmeleitungsgleichungen werden über Cauchy-Randbedingungen beschrieben. Nach Multiplikation der lokalen Formulierungen der Wärmeleitungsgleichungen mit geeigneten Testfunktionen und Integration über das jeweils betrachtete Volumen folgt das System der schwachen Formulierungen. Dessen räumliche Diskretisierung wurde im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS mit der Galerkin-Finite-Element-Methode realisiert. Für die Zeitdiskretisierung der Ratenterme des Gesamtsystems kamen Einschrittverfahren (z. B. Euler-Schemata) zum Einsatz. Neu gegenüber der den Autoren bekannten Literatur ist die vollständig gekoppelte, monolithische Lösung des Gesamtsystems, wobei für die Lösung des nichtlinearen Anfangs-Randwert-Problems zunächst Picard-Iterationen genutzt wurden. Das erläuterte mathematische und numerische Modell ist in der Lage, Erdwärmesonden vom Typ einfaches U-Rohr (siehe Abb. II.1.2), Doppel-U-Rohr und Koaxialsonde

zu beschreiben. Für Details zur numerischen Implementierung in OpenGeoSys und zur Modellvalidierung siehe auch Zheng et al. (2016).

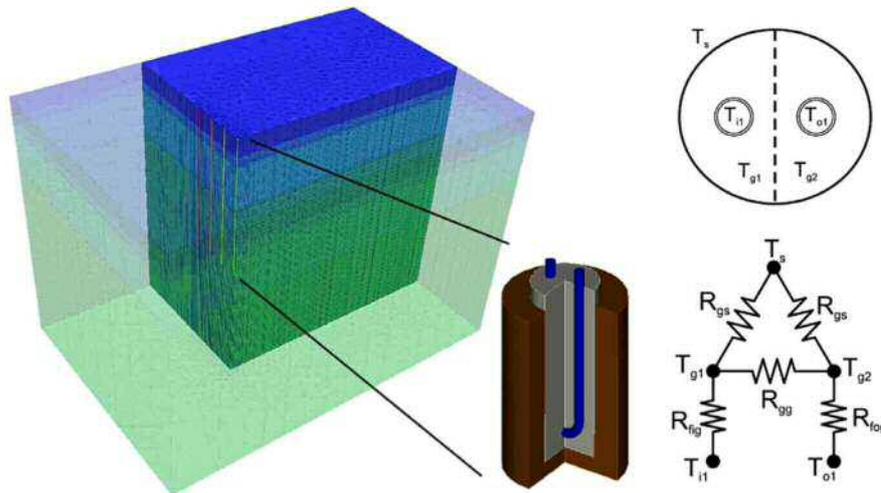


Abbildung II.1-2: Strukturmodell für eine Erdwärmesonde vom Typ des einfachen U-Rohrs nach dem Doppel-Kontinuum-Ansatz mit Sondenquerschnitt und thermischem Widerstand-Netzwerk als Ersatzmodell für das System Erdwärmesonde-Hinterfüllmaterial. Bezeichnungen: $i1$ – Einlassrohr; $o1$ – Auslassrohr; $g1$, $g2$ – Zonen des Hinterfüllmaterials (Abb. aus Zheng et al., 2016).

Die Einlasstemperatur des Wärmeträgerfluids an einer Erdwärmesonde stellt eine natürliche Randbedingung für die Wirkung dieser Sonde im Rahmen numerischer Simulationsmodelle zu oberflächennahen geothermischen Systemen dar. In der Regel wird in der Literatur die thermische Gebäudelast unmittelbar als an der Erdwärmesonde wirkende thermische Last betrachtet und für die Berechnung der Einlasstemperatur verwendet. Diese Vorgehensweise ist nicht vollkommen korrekt, da die thermische Last einer Erdwärmesonde durch die Differenz von Ein- und Auslasstemperatur an der Sonde sowie die Durchflussrate, die Massedichte und die spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids charakterisiert wird. Während die Parameter des Wärmeträgerfluids bekannt sind, wird die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde mit Hilfe der elektrisch betriebenen Wärmepumpe in der Regel auf ein höheres Temperaturniveau, wie für das Gebäude benötigt, angehoben. Der Elektroenergieverbrauch der Wärmepumpenanlage ist dabei vom Temperaturgradienten zwischen Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde und der im Gebäude benötigten Temperatur abhängig und führt dazu, dass die thermische Gebäudelast nicht gleich der thermischen Last an der Erdwärmesonde ist und somit auch die Einlasstemperatur an der Erdwärmesonde von der Wirkung der Wärmepumpenanlage abhängig ist. Um diesen Effekt numerisch zu erfassen, wurde im F&E-Vorhaben SAGS eine verbesserte, realistischere Randbedingung zur Ermittlung der Einlasstemperatur an der Erdwärmesonde entwickelt und angewendet, bei der die thermische Last an der Erdwärmesonde aus der thermischen Gebäudelast berechnet wird, die mit einem die Leistungszahl der Wärmepumpe berücksichtigenden Faktor gewichtetet (vgl. Abb. II.1-3). Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist der Quotient aus entzogener oder eingebrachter Wärmeleistung durch die Erdwärmesonde und der elektrischen Leistung für den Betrieb der Wärmepumpe und stellt vorrangig eine Funktion der Auslasstemperatur der Erdwärmesonde dar. In SAGS wurde dieser Zusammenhang in Form einer linearen Funktion angenommen. Nichtlineare Zusammenhänge können problemlos in das Modell integriert werden. Aktuell ergeben sich aber keine derartigen Ansätze aus den Angaben

auf den Datenblättern der Wärmepumpenhersteller ist (für nähere Angaben zum in SAGS entwickelten Wärmepumpenmodell siehe Hein et al., 2016a; Zheng et al., 2016).

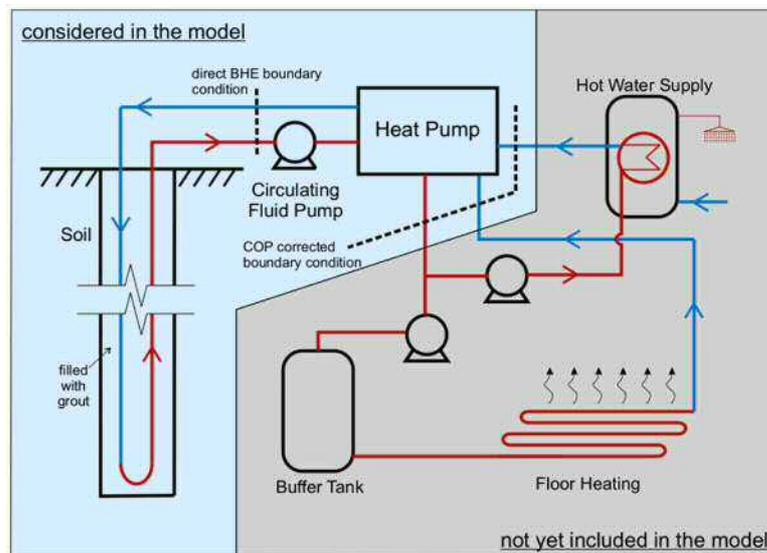


Abbildung II.1-3: Schematische Darstellung eines Modells für den Betrieb einer Erdwärmesonde, gekoppelt mit einer Wärmepumpenanlage zur thermischen Gebäudeversorgung. Die Verknüpfung zwischen der Erdwärmesonde und der Wärmepumpe (linker Teil des Schemas) wurde über entsprechende Betriebsparameter und Randbedingungen in der Softwareplattform OpenGeoSys, die Verbindung zum Gebäude über dessen thermische Last realisiert (rechter Teil des Schemas; Module zur Gebäudesimulation sind in OpenGeoSys aktuell nicht integriert; Abb. aus Zheng et al., 2016).

Das Modell ist letztlich auch geeignet, den Elektroenergieverbrauch beim Betrieb eines Erdwärmesondensystems, gekoppelt mit einer Wärmepumpenanlage aus der thermischen Last der Erdwärmesonde und der Leistungszahl der Wärmepumpenanlage zu ermitteln und somit unter Berücksichtigung bekannter Strompreise für Analysen zur ökonomischen Effizienz des Gesamtsystems heranzuziehen.

II.1.3 Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes: Gefrierprozesse

In kühleren Regionen ist das Gefrieren des Untergrundes in der Nähe von Erdwärmesonden ein latentes Risiko beim Betrieb von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen. Die ungestörte Bodentemperatur liegt in solchen Gebieten teils unter 10°C. Da das in der Erdwärmesonde zirkulierende Wärmeträgerfluid einen Anteil Frostschutzmittel enthält, kann es Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts annehmen ohne selbst zu gefrieren. Gefrieren kann in solchen Fällen jedoch das Grundwasser (das Porenwasser des Bodenmaterials) in der Umgebung der betroffenen Erdwärmesonde. Durch Gefriervorgänge im Untergrund können z. B. die folgenden komplexen Prozesse induziert werden (Zheng et al., 2016):

- Die latente Wärme, die während des Phasenwechsels vom Wasser zum Eis abgegeben wird, kann zusätzliche thermische Energie für die mit der Erdwärmesonde beabsichtigten Heizzwecke bereitstellen
- Gefrierprozesse im Untergrund beeinflussen teils drastisch die Bodentemperaturverteilung, nachfolgend die Ein- und Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde und somit letztlich die Effizienz der Wärmepumpe.

- Durch Ausdehnung des (teil)gesättigten Bodens während seiner Vereisung werden mechanische Vorgänge bewirkt, die zu Schädigungen der Erdwärmesonde führen können. Mögliche Bodenhebungen bergen das Potenzial von Schäden an Gebäudefundamenten oder selbst an Einrichtungen an der Oberfläche in sich (z. B. Risse an Gebäuden).

Diese Betrachtungen implizieren, dass für ein modernes Systemdesign und für Szenarienanalysen zur Auslegung oberflächennaher Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen die Entwicklung vollständig thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Ansätze der Wärmeleitung unter Einbeziehung von Modellen zur Beschreibung der Prozesse des Gefrierens/Tauens erforderlich ist. Im F&E-Vorhaben SAGS wurde für diese Zwecke ein Dreiphasenmodell im Rahmen der Theorie poröser Medien unter Annahme vollständiger Sättigung für dessen Lösung im Rahmen von Finite-Element-Ansätzen erarbeitet (siehe Shao et al., 2016b; Zheng et al., 2016, 2017a, 2018). Die Eisbildung in porösen Medien resultiert aus komplexen, gekoppelten Wärme- und Massetransportproblemen mit Phasenwechselaspekten und wird von Volumendehnungsvorgängen begleitet. In Anlehnung an einschlägige Literatur wurden folgende Grundannahmen für die Modellbildung getroffen (Zheng et al., 2017a):

- es wird ein Gemisch aus den drei Phasen Feststoffgerüst des Bodens/Gesteins im Untergrund, Porenflüssigkeit (Wasser) und Eis betrachtet,
- alle Phasen werden als materiell inkompressibel angenommen (d. h. bezogen auf das jeweilige Phasenvolumen),
- es werden quasistatische Vorgänge betrachtet und Beschleunigungsterme damit vernachlässigt,
- es wird ein lokales thermische Gleichgewicht angenommen (d. h. alle Phasen haben lokal die gleiche Temperatur),
- Massetransfer findet nur zwischen der Wasser- und der Eisphase statt und
- ab dem Zeitpunkt von Eisbildung sind das Feststoffgerüst und die Eisphase am betreffenden materiellen Punkt kinematisch miteinander verknüpft.

Basierend auf diesen Annahmen wurden als Feldgleichungen zur Modellierung der betrachteten gekoppelten Prozesse

- die Massebilanz des Gesamtkontinuums (bestehend aus den drei oben genannten Phasen) unter Berücksichtigung der Darcy-Beziehung zwischen der Sickergeschwindigkeit des Porenfluids und dem Porenflüssigkeitsdruck,
- die Impulsbilanz des Gesamtkontinuums unter Berücksichtigung linear elastischen Materialverhaltens und linearer Beziehungen der Wärmeausdehnung des Feststoffgerüsts des Bodens/Gesteins bei kleinen Deformationen sowie linearer, isothermer Ausdehnung der Eisphase beim Phasenwechsel und
- die Wärmeleitungsgleichung, abgeleitet aus der Energiebilanz des Gesamtkontinuums

formuliert (Zheng et al., 2018). Dabei wurde für die Wärmeleitungsgleichung im Untergrund ein klassischer, kontinuumsmechanisch basierter Ansatz gewählt und die Wärmeleitung innerhalb des Bohrlochs (Erdwärmesonde und Hinterfüllmaterial) mit den lokalen Wärmeleitungsgleichungen für das oben erläuterte Erdwärmesondenmodell nach einem Doppel-Kontinuum-Schema beschrieben. Die Kopplung der Wärmeleitungsgleichungen für die Komponenten des Gesamtsystems (Boden, Porenflüssigkeit, Eis, latente Wärme)

erfolgte mit Cauchy-Randbedingungen an der Grenze zwischen Erdwärmesonde und Boden zur Charakterisierung der thermischen Wechselwirkungen.

Die Eisbildung in der Porenflüssigkeit des Untergrundmaterials führt zur Verringerung der partiellen Massedichte des Wassers. Um diesen physikalischen Prozess zu modellieren, wird die Massebilanz der Wasser- und Eisphasen betrachtet. Zur Behandlung derartiger Phasenwechsellvorgänge wurden in SAGS sowohl ein kinetischer als auch ein Gleichgewichtszugang betrachtet und numerisch realisiert (Shao et al., 2016a).

Im Rahmen des kinetischen Ansatzes werden Phasenwechselprozesse durch einen Dichteproduktionsterm betrachtet, der für beide Phasen den gleichen Betrag jedoch umgekehrte Vorzeichen hat. Für ein einfaches Vereisungsmodell wird dieser Produktionsterm als linear Funktion der Temperaturdifferenz zwischen dem Gefrierpunkt und der aktuellen Temperatur angenommen. Das Produkt aus Latentwärme und dem Dichteproduktionsterm wird Bestandteil der Wärmeleitungsgleichung für den Untergrund und charakterisiert dort den Anteil an Wärmeenergie, der während der Phasenwechselprozesse freigesetzt oder verbraucht wird. Die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität des Bodens/Gesteins sind bei diesen Phasenwechselprozessen jeweils als Funktion der Eisvolumenanteile zu betrachten. Hier wurden dafür zunächst lineare Funktionen gewählt.

Der wesentliche Unterschied des Gleichgewichtszugangs zum kinetischen Ansatz für die Modellierung von Phasenwechselprozessen liegt in der Methodik zur Berechnung des Dichteproduktionsterms. Beim Gleichgewichtszugang wird der Phasenwechsel als sehr schnell ablaufend und innerhalb eines typischen Zeitintervalls ein Gleichgewicht erreichend betrachtet. Anstatt eine Produktionsrate für die Dichteterme zu berechnen, wird die partielle Massedichte der Eisphase direkt als Funktion der Temperatur angenommen. Wie beim kinetischen Ansatz werden die entsprechenden Terme in die Wärmeleitungsgleichung für den Untergrund integriert.

Das System der Feldgleichungen für die Modellierung von Wärmeleitungs- und Deformationsprozessen unter Berücksichtigung des potenziellen Gefrierens/Tauens wurde durch konstitutive Beziehungen für den hydrostatischen Spannungszustand in der Porenflüssigkeit, die Spannungstensoren im Feststoffgerüst und im Eis, den Wärmeflussvektor, die Beziehung zwischen der Sickergeschwindigkeit der Wasserphase und dem Porenflüssigkeitsdruck und einer Beziehung für den Dichteproduktionsterm zur Beschreibung des Phasenwechsels zwischen Wasser und Eis ergänzt, die aus Entropiebilanz (Clausius-Duhem-Beziehung) abgeleitet wurden.

Für die Linearisierung der schwachen Formulierungen der um konstitutive Beziehungen ergänzten Feldgleichungen wurden sowohl der Picard- als auch der Newton-Raphson-Ansatz genutzt. Als Primärvariable für das monolithisch gekoppelte und auch monolithisch gelöste lineare Gleichungssystem im Lastschritt wurden die Verschiebungen des Feststoffgerüsts des Untergrundmaterials, der Porenflüssigkeitsdruck und die Temperatur festgelegt.

Das entwickelte Modell wurde in die Simulationsplattform OpenGeoSys implementiert (siehe nachfolgender Abschnitt) und ist in der Lage, eine Reihe gekoppelter physikalischer Effekte während des Gefrierens/Tauens in porösen Medien zu erfassen, z. B. Bildung/Verbrauch latenter Wärme im Zusammenhang mit Phasenwechselprozessen,

Ausbreitung einer Vereisungsfront im Untergrund, Grundwasserströmung mit Porositätsänderung und mechanische Deformationen.

II.1.4 Numerische Realisierung im Rahmen der objektorientierten wissenschaftlichen Open-Source-Softwareplattform OpenGeoSys

OpenGeoSys ist eine wissenschaftliche Open-Source-Initiative für die numerische Simulation thermisch-hydraulisch-mechanisch/chemisch gekoppelter Prozesse in geklüfteten, porösen Medien, die seit Mitte der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts kontinuierlich weiterentwickelt wird. Heute ist OpenGeoSys ein internationales Softwareprojekt, dessen Entwicklung vom Kooperationspartner UFZ des F&E-Vorhabens SAGS koordiniert wird (vgl. Kolditz et al., 2012). Diese Softwareplattform wird aktuell primär für Anwendungen in den Umweltgeowissenschaften genutzt (z. B. Schadstoffhydrologie, Wasserressourcenmanagement, geologische Schadstoffeinträge, tiefe und oberflächennahe geothermische Systeme, Energiespeicherung).

Die numerische Behandlung der betrachteten nichtlinearen, gekoppelten Probleme zur Simulation thermischer, hydrogeologischer und geomechanischer Prozesse sowie deren Wechselwirkungen basiert auf der Auswertung der relevanten Feldgleichungen in Verbindung mit geeigneten Zeit- und Ortsdiskretisierungsverfahren. Unter Nutzung des Verfahrens der gewichteten Residuen werden zunächst die schwachen Formulierungen (integrale Variationsdarstellungen über das gesamte betrachtete Simulationsgebiet) der als lokales System von Differenzialgleichungen vorliegenden Feldgleichungen abgeleitet. Dabei werden, im Rahmen einer Standard-Galerkin-Prozedur, die lokalen Bilanzbeziehungen mit geeigneten Testfunktionen multipliziert und über das Simulationsgebiet integriert, das über das Volumen der Gesteinsmatrix definiert wird. Als geeignete Testfunktionen gelten beliebige Funktionen mit angemessenen Anforderungen an Stetigkeit und Differenzierbarkeit, die notwendig die Realisierung homogener wesentlicher Randbedingungen (Dirichlet-Randbedingungen) erfüllen (vgl. Görke et al., 2012).

Um das System der schwachen Formulierungen in den gewünschten Primärvariablen zu definieren, werden zweckmäßige konstitutive Beziehungen integriert (z. B. Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen der festen Phase des porösen Mediums für das Einführen des Verschiebungsvektors bzw. Druck-Dichte- und/oder Druck-Sättigungs-Relationen für die fluiden Phasen des porösen Mediums). Nachfolgend werden die kontinuierlichen Funktionen der Primärvariablen durch Ansatzfunktionen in geeigneten Finite-Element-Räumen ersetzt (Ortsdiskretisierung), die Interpolationsfunktionen unter Nutzung diskreter Werte der Variablen in den Gitterknoten des Finite-Element-Netzes darstellen. Als Ergebnis dieser Ortsdiskretisierung liegt in der Regel ein algebraisches System nichtlinearer, miteinander gekoppelter Gleichungen mit den Knotenwerten der Primärvariablen als Unbekannte vor. Es enthält im allgemeinen Fall auf seiner linken Seite ein Produkt der Massenmatrix mit dem Vektor der partiellen oder materiellen Zeitableitung der Primärvariablen, ein Produkt der Advektionsmatrix mit dem Vektor der Gradienten der Primärvariablen sowie ein Produkt der Laplace-Matrix mit dem Vektor der Knotenwerte der Primärvariablen selbst. In die rechte Seite des Gleichungssystems sind die Wirkungen äußerer Einflüsse integriert (Oberflächenbelastungen, Flüsse durch die Oberfläche des betrachteten Berechnungsgebiets).

Im partiellen Lastschritt (auch: Zeitschritt) einer Finite-Element-Simulation, die die vollständige Belastungsgeschichte betrachtet, ist jeweils ein, gegebenenfalls gekoppeltes,

lineares algebraisches Gleichungssystem zu lösen. Aus diesem Grund sind die Ableitungen der Primärvariablen in dem oben genannten, nach dem Ort diskretisierten System der schwachen Formulierungen durch geeignete Zeitdiskretisierungsverfahren zu eliminieren. Anschließend ist eine Linearisierung des Systems nach einem gängigen inkrementell-iterativen Verfahren vorzunehmen. Somit ist in jedem Lastschritt ein lineares Gleichungssystem mit den Inkrementen der Knotenwerte der Primärvariablen als Unbekannte zu lösen. Für den Fall, dass dieses System miteinander gekoppelte Gleichungen enthält (Primärvariable unterschiedlichen physikalischen Typs – z. B. Temperatur, Poren drücke und Verschiebungen der Feststoffmatrix), existieren prinzipiell die folgenden Lösungskonzepte:

- **Monolithischer Ansatz:** Das gekoppelte Gleichungssystem wird im Rahmen einer gemischten Finite-Element-Methode gleichzeitig gelöst. Dieser Ansatz zeichnet sich in der Regel durch hohe numerische Genauigkeit und Effizienz aus. Eine mathematische Herausforderung ist hingegen die Entwicklung stabiler Elementformulierungen für die gemischten Finite-Element-Ansatzfunktionen insbesondere bei mehr als zwei unterschiedlichen Typen von Primärvariablen.
- **Partitionierter Ansatz:** Bei dieser Vorgehensweise werden die einzelnen Gleichungen im Lastschritt nacheinander gelöst, wobei die jeweils nicht als Unbekannte betrachteten Primärvariablen aus vorherigen Lösungen als bekannt angenommen werden. Kopplungsterme werden mit diesen Annahmen auf der rechten Seite der aktuell bearbeiteten Gleichung berücksichtigt oder durch geeignete Approximationen in die Lösung integriert. Der gesamte Lösungsprozess wird im Lastschritt so oft iterativ wiederholt, bis alle Primärvariablen eine vorgegebene Genauigkeit erreicht haben. Dieses Verfahren ist gegenüber dem monolithischen Ansatz deutlich zeitaufwendiger und nicht in allen Fällen zwingend stabil.
- **Gemischter Ansatz:** Beinhaltet das gekoppelte Gleichungssystem mehr als zwei unterschiedliche Primärvariable, bietet die Behandlung eines Teils des Systems im monolithischen Verfahren mit partitionierter Kopplung zum Rest des Systems häufig den besten Kompromiss hinsichtlich Stabilität, Genauigkeit und Effizienz der Lösung.

Die im F&E-Vorhaben SAGS entwickelten numerischen Modelle und Algorithmen wurden in die objektorientierte, wissenschaftliche Open-Source-Softwareplattform OpenGeoSys (www.opengeosys.net) implementiert. Zur Herleitung der in SAGS betrachteten numerischen Modelle wurde bezüglich der Zeitdiskretisierung ein verallgemeinertes Einschritt-Differenzenverfahren genutzt. Das Diskretisierungsschema enthält einen Wichtungsfaktor, mit dem spezifische Ansätze eingestellt werden können, von denen das implizite Euler-Verfahren (auch: Euler Rückwärts) wegen seiner unbedingten numerischen Stabilität das in der Praxis komplexer Problemstellungen am häufigsten genutzte und auch von den Autoren favorisierte ist. Für die Linearisierung der nichtlinearen Finite-Element-Gleichungen können in OpenGeoSys wahlweise die konsistente Linearisierung nach der Newton-Raphson-Methode oder das Picard-Verfahren genutzt werden, bei dem die Systemmatrizen vereinfachend während der Iterationen innerhalb eines Lastschritts konstant gehalten werden.

Nach Orts- und Zeitdiskretisierung sowie Linearisierung der schwachen Formulierungen ist im Rahmen der Lösung des gemischten Anfangs-Randwert-Problems in jedem Linearisierungsschritt ein lineares algebraisches Gleichungssystem auszuwerten, für dessen

Lösung in OpenGeoSys vorrangig iterative Verfahren (z. B. Methode der konjugierten Gradienten) mit Vorkonditionierung verwendet werden. Details zur allgemeinen Finite-Element-Theorie gekoppelter Problemstellungen sowie der numerischen Realisierung der im Projekt entwickelten Modelle im Rahmen von OpenGeoSys sind besonders in den Arbeiten von Hein et al. (2016a,c), Kolditz et al. (2012), Shao et al. (2016a) und Zheng et al. (2016) sowie der darin angegebenen Literatur dargestellt.

Durch einen der Bearbeiter des F&E-Vorhabens SAGS wurden wesentliche Grundlagen zur Konzeptionierung einer neuen Version der Softwareplattform OpenGeoSys entwickelt und grundlegende Softwarekomponenten erarbeitet (Naumov et al., 2016a). OpenGeoSys in der seit etwa sechs Jahren entwickelten Version 5 (OGS5) wurde und wird erfolgreich in verschiedenen Anwendungsbereichen genutzt. Der aktuelle Stand an Softwareflexibilität erlaubt dabei das Implementieren numerischer Algorithmen, die spezialisiert sind für die Lösung vielfältiger gekoppelter Probleme wie Grundwasserströmung, geotechnische Systeme, Energietransformationstechnologien u. a. Der Erfolg von OGS5 beruht vorrangig auf vielfältigen Zuarbeiten von Partnern im Rahmen einer Gemeinschaftsentwicklung, was andererseits aber auch einige Probleme durch nicht ausreichend abgestimmte Softwareentwicklungen hervorruft. Zu diesen Hemmnissen einer effizienten Softwareentwicklung gehören:

- Substanziellen Änderungen in fundamentalen Bereichen der Simulation (z. B. Änderung von Verfahren zur automatischen Zeitschrittsteuerung) bedeuten einen größeren Aufwand für den Nutzer, da die Bearbeitung fundamentaler numerischer Algorithmen in der Regel über verschiedene Programmteile und Bibliotheken verteilt und nicht an zentraler Stelle konzentriert ist.
- Ein generelles Problem gemeinsamer Softwareentwicklungen unterschiedlicher Partner ist die Tendenz zu großen Verzweigungsgraden und singulären Softwareversionen, deren spezifische Inhalte nicht mehr in den Hauptentwicklungsstrang integriert werden und/oder zum teilweisen Verlust bisheriger Funktionalitäten durch spezifische Code-Entwicklungen führen.
- Ein Mangel an Modularisierung der Softwareentwicklung führt häufig zur Dopplung von Softwareversionen, da, anstelle spezifische Algorithmen auf Basis neuer Erkenntnisse zu verallgemeinern, diese vollständig in andere Versionen übernommen und nur in Teilen lokal verändert werden.
- Die Parallelisierung zur Nutzung von Höchstleistungsrechentechnik wird ebenfalls durch eine Verzweigung von Algorithmen und Datenstrukturen über das gesamte Softwareprojekt erschwert.

Die neue Version 6 von OpenGeoSys, OGS6, soll diese Probleme beheben und dem Nutzer eine höchst flexible Softwareplattform auf dem neusten Stand von Forschung und Technik zur Verfügung stellen. Der Kernaspekt ist dabei die Vermeidung von Redundanzen durch konsequente Modularisierung der Softwareentwicklung, d. h. eine abgestimmte und zentralisierte Änderung spezifischer, fundamentaler Algorithmen ohne Änderung interner und externer Datenstrukturen. Es wird angestrebt, gemeinsame Schnittstellen für Algorithmen der linearen Algebra mit dem Ziel der Integration unterschiedlicher Nutzerbibliotheken zur Behandlung derartiger Problemstellungen zu nutzen. Datentypen werden ebenso strikt getrennt wie deren Semantik und deren Ressourcen. Zur Modularisierung soll insbesondere auch die Entwicklung lokaler Datenstrukturen für spezifische, verallgemeinerbare numerische Operationen beitragen (z. B. Berechnung lokaler Matrizen und

Vektoren). Automatisierte numerische Tests und Benchmark-Simulationen werden nach jeder Änderung des Hauptentwicklungsstrangs durchgeführt, in dem alle fundamentalen Algorithmen zusammengefasst sind. Der Softwarevalidierung dient die Begutachtung und Kontrolle jeglicher Softwareimplementierungen im Hauptentwicklungsstrang durch mindestens einen zweiten Entwickler.

II.1.5 Benchmarking

Geschlossene Lösungen für Problemstellungen aus Natur- und Ingenieurwissenschaften sind auf Situationen beschränkt, die unter stark vereinfachenden Annahmen definiert sind, verglichen mit den Prozessen, Eigenschaften und Bedingungen, die in der Realität typischerweise modelliert werden. Das ist besonders für geotechnische Anwendungen relevant, die durch das miteinander gekoppelte Wirken unterschiedlicher physikalischer und chemischer Prozesse in porösen Mehrphasenmedien, ausgeprägte Heterogenitäten der Untersuchungsgebiete, anisotropes Materialverhalten und eingeschränkte Verfügbarkeit von In-situ-Messergebnissen charakterisiert sind. Die Entwicklung geeigneter numerischer Modelle und die Nutzung entsprechender Simulationssoftware sind die alleinigen Optionen für komplexe Zustandsanalysen und Prognosestudien geotechnischer Problemstellungen, wie der im F&E-Vorhaben SAGS betrachteten Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen.

Um ihre Übereinstimmung mit den in der Geoingenieurwissenschaft gültigen Normen zu demonstrieren, müssen Modelle und Software zur Analyse geotechnischer Anwendungen vor ihrem Praxiseinsatz hinreichend validiert werden. Eine anerkannte Methode für Modell- und Softwarevalidierung ist mit dem so genannten Benchmarking verfügbar. In diesem Zusammenhang stellen Benchmarks klar definierte Beispiele für die Prozesssimulation unter vereinfachenden Annahmen dar, die mit existierenden analytischen Lösungen und/oder experimentellen Daten verglichen werden können. Liegen für komplexe Situationen weder analytische noch experimentelle Ergebnisse vor, ist der Vergleich zwischen unterschiedlichen wissenschaftlichen und/oder kommerziellen Softwarelösungen eine erprobte Methode, die Funktionalität, Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Softwareentwicklungen objektiv zu beurteilen.

Die Entwicklung und Analyse von Benchmarks, die die Anforderungen an Modellierung und Simulation der spezifischen Aufgabenstellungen im F&E-Vorhaben SAGS in breitem Umfang reflektieren, gehörten zu den übergreifenden Querschnittsaufgaben der Zusammenarbeit des Zuwendungsempfängers mit den Kooperationspartnern des Vorhabens. Unter Koordination des Kooperationspartners UFZ wurden sowohl die Methodologie des Validierungsprozesses als auch konkrete Testbeispiele systematisiert. In diesem Zusammenhang wurden Benchmarks definiert, die Geometrie, Geologie, Materialeigenschaften und Prozessbedingungen der im Vorhaben betrachteten realen Anwendungssituation in vereinfachender Form berücksichtigen. Methodisch basiert die Validierung von Modellen und Software sowohl auf klassischen Benchmarks mit verfügbaren analytischen und/oder experimentellen Ergebnissen als auch auf der vergleichenden Simulation unter Nutzung unterschiedlicher Softwarelösungen. Die Strategie zur Benchmarkauswahl und -entwicklung stützt sich auf drei wesentlichen Aspekte:

- Prozessorientierte Benchmarks für die numerischen Analyse partikulärer und gekoppelter Prozesse: Zur Validierung von Projektergebnissen für partikuläre physikalische Prozesse wurden systematisch geeignete Benchmarks aus der Literatur

ausgewählt. Weiterhin konnte auf existierende Benchmarks zur Simulation gekoppelter Prozesse zunehmender Komplexität in porösen Medien zurückgegriffen werden (z. B. Wärmeleitungs- und Konsolidierungsprobleme, Thermomechanik).

- Konstitutiv orientierte Benchmarks: Die Auswahl von zweckmäßigen konstitutiven Beziehungen für die Bestandteile der betrachteten porösen Medien (thermodynamische Zustandsgleichungen für die Fluideigenschaften, Deformationsgesetze der Feststoffmatrix) ist wesentlich für das Erzielen realitätsnaher Simulationsergebnisse.
- Szenarienbasierte Benchmarks: Numerischen Modelle für nichtlineare, gekoppelte Probleme mit hohem Komplexitätsgrad wurden in vergleichenden Studien von OpenGeoSys mit unterschiedlichen kommerziellen Softwarelösungen (z. B. Eclipse, TOUGH) validiert. Zu diesem Zweck wurden neben der Analyse von Literaturbeispielen vereinfachte Testfälle definiert, die auf Daten realer geologischer Strukturen basieren.

An der Entwicklung prozessorientierter Benchmarks waren neben dem Zuwendungsempfänger alle Kooperationspartner des F&E-Verbundes SAGS beteiligt. Die Definition von Benchmarks umfasst jeweils eine Zusammenfassung der Motivation, eine kurze Problembeschreibung, die Eingangsdaten, die Modellparametrisierung, Informationen zu den numerischen Algorithmen und Details zur Darstellung der Ergebnisse. Ein Überblick zu vorrangig szenarienbasierten Benchmarks, die speziell für die Validierung von in SAGS entwickelten Prozessmodellen definiert wurden, wird mit den nachfolgenden Erläuterungen gegeben. Weitere Details können der angegebenen Literatur entnommen werden.

Benchmark: Vergleich des numerischen Modells mit Linienquellenmodellen (Shao et al., 2016a,b)

Das Linienquellenmodell ist ein gängiges analytisches Modell zur Berechnung charakteristischer Prozesse, die beim Betrieb einer Erdwärmesonde im oberflächennahen Untergrund ablaufen. Es beruht auf der Annahme, dass dem Untergrund die Wärme über die gesamte Länge der Erdwärmesonde gleichmäßig entzogen wird.

Für einen Vergleich numerischer Ergebnisse mit der analytischen Lösung wurde eine einfache Geometrie für einen hypothetischen Geothermiestandort betrachtet. Es wurden zwei numerische Modelle definiert. Bei einem dieser Modelle wurde ebenfalls die Annahme getroffen, dass die Wärme dem Untergrund über die gesamte Länge der Erdwärmesonde gleichmäßig entzogen wird (konstante Neumannrandbedingung entlang eines Linienzugs, der eine Knotenreihe des Simulationsmodells verbindet, welche die Erdwärmesonde repräsentieren – numerisches Linienquellenmodell). Mit dem zweiten numerischen Ansatz wurde das oben beschriebene Erdwärmesondenmodell im Rahmen eines Doppel-Kontinuum-Schemas validiert. Für alle drei Modelle wurden die gleiche Geometrie, gleiche Anfangsbedingungen und gleiche Materialparameter verwendet.

Ein Vergleich der Bodentemperatur an zwei Punkten in Abständen von 1,6 m bzw. 6,0 m von der Erdwärmesonde am oberen Abschluss des Gebiets zeigte gute Übereinstimmungen zwischen den verwendeten Modellen. Es ist bekannt, dass das analytische Linienquellenmodell in unmittelbarer Nähe der Erdwärmesonde inakkurate Ergebnisse für das Temperaturfeld liefert, die Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle aber wenige Meter entfernt von der Erdwärmesonde konvergieren sollten. Beide Aspekte konnten in diesem Benchmark bestätigt werden.

Benchmark: Sandkasten-Experiment (Shao et al., 2016b)

Ein komplexeres Beispiel, verglichen mit der Modellvalidierung basierend auf dem Linienquellenmodell, stellt ein in der Literatur beschriebenes Sandkasten-Experiment mit integrierter Erdwärmesonde vom Typ des einfachen U-Rohrs dar (vgl. Abb. II.1-4). Dieses Experiment diente der kontrollierten Durchführung eines Thermal Responses Tests.

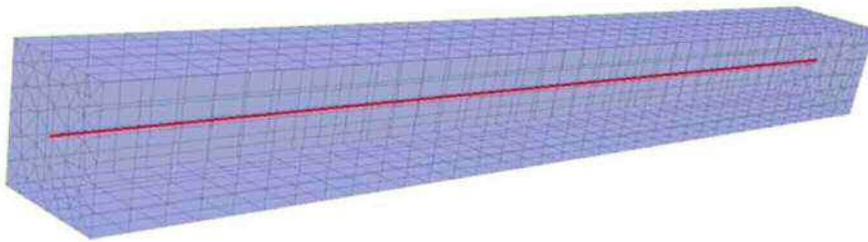


Abbildung II.1-4: Simulationsmodell für den Benchmark zur numerischen Modellierung des Sandkasten-Experiments (Abb. aus Shao et al., 2016b).

Die Länge des Sandkastens beträgt 18 m, die Seitenlänge des quadratischen Querschnitts des Sandkastens jeweils 1,8 m. Für die Temperaturanfangsbedingungen der numerischen Simulation wurden entsprechende Messwerte zu Beginn des Experiments genutzt. Die Randbedingungen für die numerische Simulation wurden entsprechend der gemessenen Einlasstemperatur an der Erdwärmesonde und der gemessenen Durchflussrate des Wärmeträgerfluids (hier: Wasser) definiert. Zu weiteren Details, wie z. B. den thermischen und hydraulischen Parametern, siehe Shao et al. (2016b) sowie die darin zitierte Literatur. Für die Modell- und Softwarevalidierung wurden die Ein- und Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde sowie die Temperatur an der Außenwand der Erdwärmesonde und in verschiedenen Messstellen im Sandkasten verglichen.

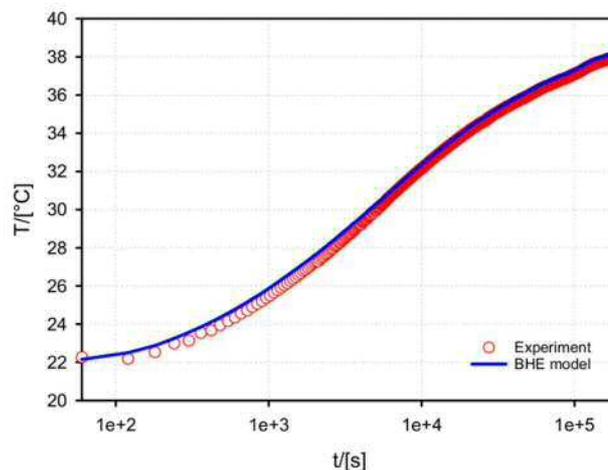


Abbildung II.1-5: Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde im Sandkasten-Beispiel als Vergleich zwischen gemessenen Werten und numerischer Lösung (Abb. aus Shao et al., 2016b).

Zwischen den Messwerten und numerischen Ergebnissen konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Der größte relative Fehler mit 2,5% wurde für die Temperatur an der Außenwand der Erdwärmesonde beobachtet. Abweichungen, wie sie für den Beginn des Experiments für die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde beobachtet wurden (vgl. Abb. II.1-5) können vernachlässigt werden, da insbesondere das Langzeitverhalten von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen von Interesse für die

effiziente und nachhaltige Systemauslegung ist. Zudem sind diese Abweichungen vorrangig darin begründet, dass die Erdwärmesonde im Experiment von einem Aluminium-Rohr ummantelt war, was zur Modellvereinfachung für die Simulation nicht explizit im Strukturmodell, sondern durch modifizierte thermische Modellparameter abgebildet wurde.

Da die Messfehler für Temperatur, Durchflussrate und Wärmeleitfähigkeit mindestens im Bereich der angegebenen Abweichungen zwischen numerischen und experimentellen Werten liegen, können das oben beschriebene numerische Erdwärmesondenmodell sowie dessen numerische Realisierung in der Softwareplattform OpenGeoSys mit diesem Beispiel als hinreichend validiert angesehen werden.

Benchmark: Ausbreitung einer Vereisungsfront in einer Wassersäule (Shao et al., 2016b; Zheng et al., 2016):

Ein allgemein anerkanntes Testbeispiel für die Validierung von Modellen zur Simulation von Prozessen des Gefrierens/Tauens in Bodenmaterialien beschreibt die Ausbreitung einer Vereisungsfront in einer 1 m langen Wassersäule, die von einer gefrierenden Wand abgeschlossen wird. Für die Ausbreitung der Vereisungsfront, die in unmittelbarer Wandnähe beginnt, existiert eine analytische Lösung.

Im Rahmen eines Finite-Elemente-Strukturmodells für numerische Simulation mittels OpenGeoSys wurde die Wassersäule in 1.000 Linienelemente aufgeteilt. Als Anfangsbedingung wurde die Temperatur in der Wassersäule auf 0°C eingestellt, die Temperatur an der Wand als Dirichlet-Randbedingung mit -3°C definiert. Da die analytische Lösung den reinen Phasenwechsel beschreibt, d. h. nur Wasser und Eis als Phasen betrachtet werden, wird die Porosität im numerischen Modell auf 1,0 gesetzt.

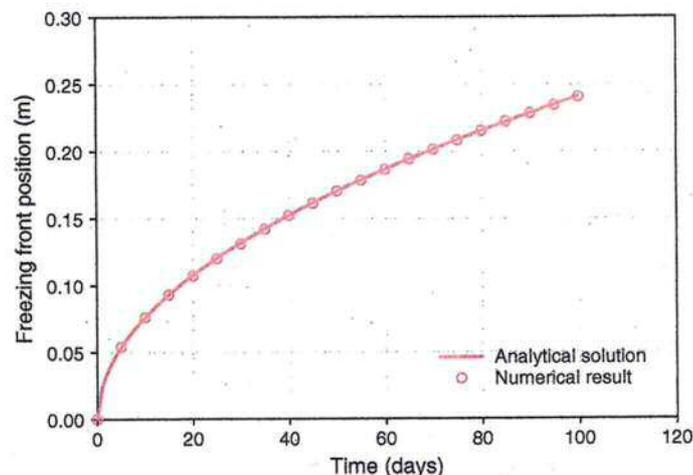


Abbildung II.1-6: Ausbreitung der Vereisungsfront in der Wassersäule für den Benchmark zum Gefrieren/Tauen im Vergleich zwischen analytischer und numerischer Lösung. Verwendung des Gleichgewichtsansatzes für die Modellierung der Phasenwechselforgänge mit Darstellung der partiellen Massedichte der Eisphase als Exponentialfunktion der Temperatur. Numerische Simulation mit OpenGeoSys (Abb. aus Shao et al., 2016b).

Die Ergebnisse der numerischen und der analytischen Lösungen korrespondieren sehr gut miteinander (siehe Abb. II.1-6). Dieses Beispiel wurde auch für einen Vergleich des Picard- und des Newton-Raphson-Ansatz für die Lösung des nichtlinearen Anfangs-Randwert-Problems genutzt. Wie zu erwarten haben diese Alternativen keine Auswirkun-

gen auf die Ergebnisse der numerischen Simulation, lediglich das Konvergenzverhalten verbessert sich bei Verwendung des Newton-Raphson-Schemas.

Benchmark: Numerische Simulation des CIF-Tests (Zheng et al, 2018):

Der in der Literatur beschriebene CIF-Test (Capillary suction, Internal damage, Freezing/Thawing) dient zur Validierung von Modellen zur Beschreibung von Prozessen mit Kapillarwirkung, interner Schädigung und des Gefrieren/Tauen in porösen Medien. Dabei wird ein Kubus mit einer Breite und Tiefe von jeweils 15 cm sowie einer Höhe von 7,5 cm über einen Zeitraum von insgesamt 12 Stunden zuerst abgekühlt und später wieder aufgeheizt (davon je vier Stunden Kühlen und Heizen; vgl. Abb. II.1-7). Für die numerische Simulation mit OpenGeoSys wurde dieser Prozess über eine Dirichlet-Temperatur-Randbedingung am unteren Gebietsrand abgebildet. An den übrigen Gebietsrändern wurden adiabatische Randbedingungen angenommen.

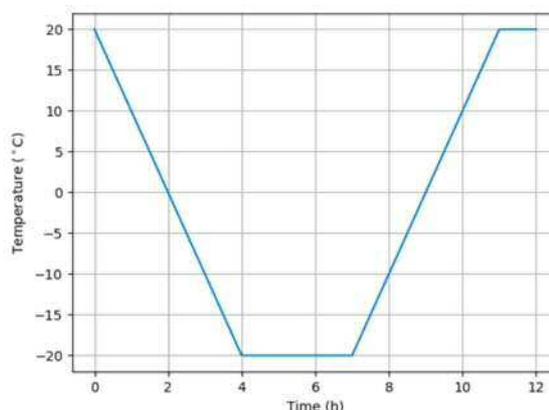


Abbildung II.1-7: Temperaturlast am unteren Rand des Simulationsgebiets für den CIF-Test (Abb. aus Zheng et al., 2018).

Der untere Gebietsrand wurde zudem abgedichtet und seine Vertikalverschiebung verhindert. Alle anderen Gebietsränder waren frei von hydraulischen und mechanischen Randbedingungen (d. h. freier Fluss von Porenflüssigkeit über die Gebietsgrenze und keine Beschränkungen der Verschiebungsfreiheitsgrade). Die Materialeigenschaften und numerische Parameter sind in Zheng et al. (2018) sowie darin zitierter Literatur angegeben. Wie in den oben erläuterten, für das F&E-Vorhaben SAGS definierten und berechneten Benchmarks, zeigten die Simulationsergebnisse auch für dieses Beispiel eine sehr gute Übereinstimmungen mit Literaturwerten.

II.1.6 Anwendungssimulationen und Szenarienstudien: Erdwärmesonden(systeme)

Die Nutzung der validierten Modelle und Softwarekomponenten für die Simulation verschiedener Szenarien an ausgewählten Testbeispielen war eine essentielle und die umfangreichste Projektphase im F&E-Vorhaben SAGS. Für diese Testbeispiele war ursprünglich die Erschließung und Erkundung eines realen Standorts vorgesehen. Aus verschiedenen Gründen erwies sich die Standortsuche trotz ausgezeichneter Unterstützung durch alle Kooperationspartner als langwierig und schwierig (siehe auch Ausführungen im Abschnitt I.3 dieses Berichts). Nachdem Versuche, einen für reale geothermische Nutzungen im urbanen Raum vorgesehenen Standort zu definieren nicht umgesetzt werden konnten, gelang es im letzten Drittel der Projektlaufzeit, ein Geothermie-Testfeld auf dem Gelände des Kooperationspartners UFZ für SAGS zu erweitern. Mit Hilfe der Koope-

rationspartner konnten bis zu diesem Zeitraum ein hypothetischer oberflächennaher geothermischer Standort definiert und ein vom Kooperationspartner UFZ in anderen Projekten erschlossener Standort für umfangreiche Sensitivitätsanalysen genutzt werden.

Für den Betreiber eines oberflächennahen geothermischen Systems ist insbesondere dessen Langzeitverhalten von Interesse, da ein solches System mit vergleichsweise hohen Anfangsinvestitionen verbunden ist. Wärmepumpenanlagen arbeiten bei höheren Temperaturen effizienter, folglich sinkt deren Effizienz mit sinkenden Auslasstemperaturen an den Erdwärmesonden infolge potenziell zu starken Wärmeentzugs im Untergrund. In Extremfällen kann es dabei zu automatischen Systemabschaltungen und damit zu Systemausfällen in der Wärmepumpenanlage kommen. Für einen nachhaltigen Systembetrieb muss der Temperaturabfall in der Umgebung von Erdwärmesonden daher so gering wie möglich gehalten werden.

Es ist bekannt, dass sich das Erdreich im Sommer, wenn die Erdwärmesonden(systeme) inaktiv sind, thermisch erholt. Im Jahresverlauf kann eine thermische Balance des Untergrundes jedoch nur erzielt werden, wenn Wärmezug und Wärmeeintrag ausgeglichen sind, andererseits kühlt sich der Erdboden um Erdwärmesonden kontinuierlich ab bis ein quasistatischer Zustand erreicht wird. Die thermische Erholung des Untergrundes kann allerdings im Zusammenhang mit einer Gebäudekühlung forciert werden, indem Überschusswärme aus Gebäuden in das Erdreich eingetragen wird.

Das Systemverhalten von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen hängt von einer Vielzahl verschiedener Parameter ab. Zu diesen gehören insbesondere:

- geologische Standortbedingungen einschließlich der lokalen geothermischen Gradienten,
- Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Massedichte sowie weitere geophysikalische Parameter des Untergrundmaterials (Boden/Gestein)
- Bodensättigung und Grundwasserströmungen,
- Tages- und jahreszeitliche Variationen der Oberflächentemperatur,
- thermische Gebäudelast und Kühlungsbedarf in den Gebäuden,
- Design des Erdwärmesondensystems (Anordnung, Einbringtiefen) sowie
- Leistungszahl (Wirkungsgrad) der Wärmepumpenanlage.

Die Bedeutung dieser Einflussfaktoren, insbesondere deren Auswirkungen auf die Kosten im Langzeitbetrieb von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit einer Wärmepumpenanlage, ist ein entscheidendes Kriterium für die Auslegung und Dimensionierung der Systeme durch entsprechende Planungsunternehmen und die Betreiber der Systeme. In Hein et al. (2016a) werden umfangreiche Sensitivitätsstudien vorgestellt. Diese haben als Ziel zu ergründen, welche dieser Faktoren den größten Einfluss haben, um Systemstörungen oder gar -ausfälle zu vermeiden. Die Publikation stellt auf der Basis oben diskutierter Modellkomponenten ein generalisiertes numerisches Modell zur gekoppelten Simulation von hydraulischen und Wärmeleitungsprozessen vor, das die folgenden relevanten Phänomene im Rahmen eines realistischen Szenarios berücksichtigt:

- inhomogene Untergrundeigenschaften,
- Grundwasserströmungen,
- geothermische Gradienten und Wärmeflüsse,
- Variationen der Oberflächentemperatur sowie die

- Integration eines Wärmepumpenmodells zur Berücksichtigung des dynamischen Einflusses der Änderung dessen Leistungszahl.

Der zuletzt genannte Aspekt erlaubt die Ermittlung des Elektroenergieverbrauchs für die Wärmepumpenanlage und somit eine Kostenanalyse des Langzeitbetriebs des oberflächennahen geothermischen Systems.

Für die Sensitivitätsanalysen und Szenarienstudien wurde ein quaderförmiges Untergrundmodell der Größe 300x300x200 m an einem hypothetischen Standort mit homogenen und isotropen Bodeneigenschaften über das gesamte Gebiet betrachtet, die typisch für den Leipziger Raum sind. Das betrachtete oberflächennahe geothermische System bestand aus einem virtuellen Wärmepumpenmodell verknüpft mit einer einzelnen Erdwärmesonde. Dieses System wurde nach den Anforderungen der VDI 4640 zum Zwecke des Heizens und Kühlens eines Einfamilienhauses mit einer Wohnfläche von 150 m² konfiguriert. Die Leistungszahl der Wärmepumpe wurde mit 4,0 festgelegt und die erforderliche Länge der Erdwärmesonde entsprechend den Richtlinien der VDI 4640 mit 111 m ermittelt. Bezüglich der physikalischen Eigenschaften des zirkulierenden Wärmeträgerfluids wurden die Werte für ein Gemisch aus Wasser mit 30% Äthylenglykol als Frostschutzmittel bei einer Temperatur von 277 K der Literatur entnommen.

Im Gegensatz zu den meisten bekannten numerischen Untersuchungen zu oberflächennaher Geothermie wurde in den Testbeispielen des F&E-Vorhabens SAGS der geothermische Gradient als wesentlicher Systemparameter berücksichtigt (hier mit dem Wert von 0,016 K m⁻¹). Dieser Parameter beeinflusst neben der Oberflächentemperatur das Temperaturfeld im Untergrund maßgeblich (besonders in Tiefen unter 15 m) und charakterisiert die thermische Erholung des Bodens. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde ein realistisches, inhomogenes Temperaturfeld als Anfangsbedingung ermittelt (vgl. Abb. II.1-8), während in vielen Publikationen ein homogenes Temperaturfeld über das gesamte Gebiet angenommen wird. Ein weiterer Ausgangspunkt für die Berechnung der Anfangstemperaturverteilung war die Annahme einer Bodentemperatur von 13°C in 100 m Tiefe.

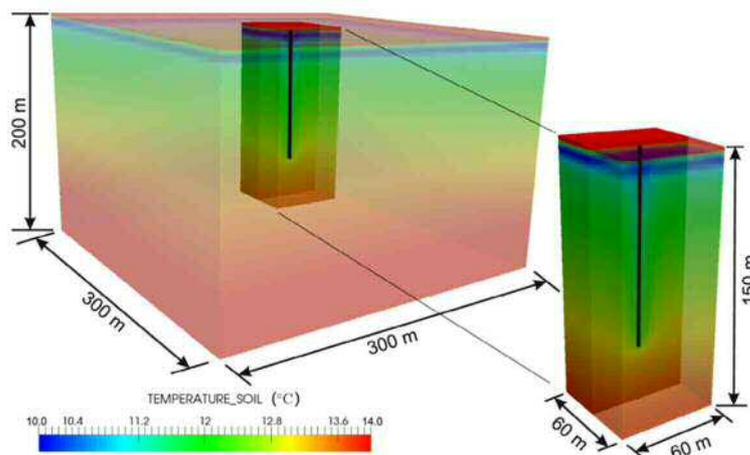


Abbildung II.1-8: Numerisch ermittelte Verteilung der Anfangstemperatur (Abb. aus Hein et al., 2016a).

Am oberen Gebietsrand wurden vorgegebene Oberflächentemperaturen in Form von Dirichlet-Randbedingungen mit Werten angegeben, die das Institut für Meteorologie der Universität Leipzig für das Jahr 2013 zur Verfügung gestellt hat. Monatlich variierende, typische Werte für die Heiz- und Kühllast des betrachteten Einfamilienhauses wurden der

Literatur entnommen und daraus monatlich konstante Lastkurven für die Wärmepumpe ermittelt (siehe Abb. II.1-9). Der geothermische Gradient spielte gemeinsam mit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens auch eine große Rolle bei der Ermittlung von Wärmeflüssen als Randbedingungen am unteren Gebietsrand.

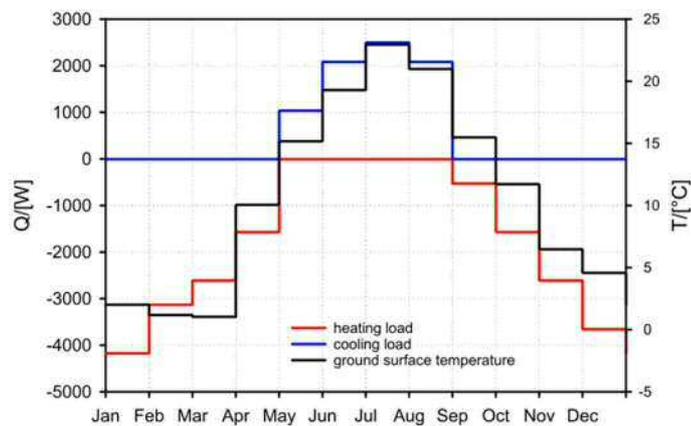


Abbildung II.1-9: Lastkurve für die Wärmepumpe (linke Achse) und die Oberflächentemperatur (rechte Achse) im Jahresverlauf (mit monatlich konstanten Werten; Abb. aus Hein et al., 2016a).

Ein Referenzszenario zur Modellvalidierung ohne Integration der Erdwärmesonde (Betrachtung der ausschließlichen Wirkung der Temperaturanfangs- und -randbedingungen) über einen Zeitraum von einem Jahr zeigte, dass der Wärmeeintrag durch die variierende Oberflächentemperatur mit 98% zur Gesamtenergiebilanz des Systems beiträgt, der Wärmefluss über den unteren Gebietsrand jedoch nur zu 2%. Im Vergleich mit diesem Referenzszenario wurden folgende Parameter für Szenariensimulationen zur Analyse der Langzeitnachhaltigkeit von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen betrachtet:

- Systemverhalten ohne/mit Wärmepumpenmodell,
- Variation der spezifischen Wärmekapazität,
- Variation der Wärmeleitfähigkeit mit Anpassung der Länge der Erdwärmesonde nach VDI 4640,
- Variation der Geschwindigkeit von Grundwasserströmungen,
- Berücksichtigung einer aktiven Gebäudekühlung im Gegensatz zu natürlicher thermischer Erholung des Untergrundes,
- Variation der Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials an der Erdwärmesonde,
- Variation der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bei konstanter Länge der Erdwärmesonde und
- Variation der thermischen Gebäudelast bei konstanter Länge der Erdwärmesonde.

Mit den zwei letztgenannten Aspekten wurde, nach Kenntnis der Autoren erstmals, systematisch der Einfluss von Fehlern bei den Auslegungs- und Betriebsprozessen eines oberflächennahen geothermischen Systems untersucht, die potenziell mit dem Risiko einer Über- oder Unterdimensionierung des Systems verbunden sind. Diese Analysen sollen Motivation sein für eine geophysikalische Vorerkundung am Standort sowie für eine realistische Ermittlung der tatsächlichen Gebäudelast unter Berücksichtigung eventuell vorhandener zusätzlicher Heizungssysteme (z. B. Solarthermie) anstelle der Übernahme von Literaturwerten für die geophysikalischen Untergrundparameter und die Gebäudelast.

Die Simulationsergebnisse zeigten erwartungsgemäß, dass die Untergrundtemperatur und damit die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde über den betrachteten Zeitraum von 30 Jahren ausschließlich im Heizbetrieb exponentiell absinken und asymptotisch einen quasistationären Zustand anstreben. Nach einem Jahr des Betriebs der Erdwärmesonde beträgt der Erholungswert der thermischen Energie des Untergrundes lediglich etwa 89% der zuvor entzogenen Energie. Dabei werden Untergrund- und Auslasstemperatur ohne Berücksichtigung der Wirkung der Wärmepumpe auf das Gesamtsystem unterschätzt (siehe Abb. II.1-10), was bei der Auslegung zu einer Unterdimensionierung der Erdwärmesondenkomponenten führen kann, um das Risiko einer zu starken Abkühlung des Bodens zu vermeiden.

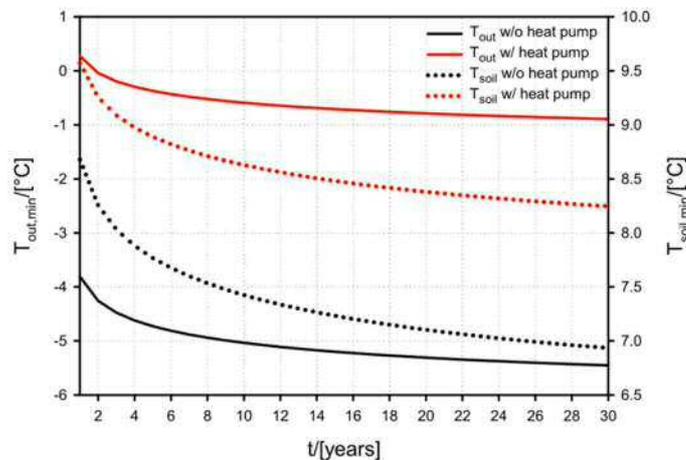


Abbildung II.1-10: Minimaltemperaturen in den einzelnen Heizperioden im Verlaufe eines Anlagenbetriebs von 30 Jahren ausschließlich zu Heizzwecken. Durchgezogene Linien: Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde (linke Achse). Gestrichelte Linien: Bodentemperatur in 60,5 m Tiefe und 1 m Entfernung von der Erdwärmesonde (Abb. aus Hein et al., 2016a).

Aus den hier beschriebenen Szenarienstudien konnte die physikalische Gegebenheit bestätigt werden, dass eine geringere spezifische Wärmekapazität des Untergrundmaterials zu geringeren Boden- und Auslasstemperaturen an der Erdwärmesonde führt. Allerdings wurde festgestellt, dass der Einfluss der spezifischen Wärmekapazität auf die thermische Erholung des Untergrundes und auf die Leistung der Wärmepumpe wenig signifikant ist: Bei einer Änderung der spezifischen Wärmekapazität um 50% ändert sich die Bodentemperatur nach 30 Jahren ausschließlichem Heizbetrieb bei den angenommenen Parametern lediglich um 0,27 K die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde um 0,31 K.

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bei gleichzeitiger Variation der Erdwärmesondenlänge nach VDI 4640 mit dem Ziel, die thermische Last je Längeneinheit der Sonde konstant zu halten, ergab in den numerischen Studien nahezu keine Auswirkungen auf die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde. Bezüglich der Auswirkung auf die Bodentemperatur erweist sich eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zwar als signifikanter verglichen mit der Änderung der spezifischen Wärmekapazität, sie ist jedoch immer noch als eher gering einzuschätzen: Bei einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit um 50% ändert sich Bodentemperatur nach 30 Jahren ausschließlichem Heizbetrieb bei den angenommenen Parametern um 0,46 K. Wie für die Sensitivitätsanalyse bezüglich der spezifischen Wärmekapazität resultieren auch geringere Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes in geringeren Boden- und Auslasstemperaturen an der Erdwärmesonde.

Wie erwartet zeigten die Szenarienstudien an dem betrachteten hypothetischen Standort eine zunehmende Erholungsrate der thermischen Energie des Untergrundes bei zunehmender Fließgeschwindigkeit vorhandener Grundwasserströmungen (siehe Abb. II.1-11). Die ist durch den verbesserten Wärmeenergiezufluss bei einer permanenten Grundwasserströmung bedingt. Für die Langzeiteffizienz und die Nachhaltigkeit von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit einer Wärmepumpenanlage ist es somit erstrebenswert, die Sonden möglichst in Schichten mit ausgeprägter Grundwasserströmung zu installieren. Gleichzeitig ist aber zu beachten, dass die Grundwasserverhältnisse durch Ausbreitung einer „Kältefahne“ (Abkühlung des Grundwassers durch Wärmeentzug an einer Erdwärmesonde) zu potenziellen Störungen von Nachbaranlagen in oberflächennahen Geothermiesystemen führen können. Diese widerstreitenden Aspekte zeigen die Wichtigkeit der Berücksichtigung vorhandener Grundwasserströmungen im Prozess der Auslegung und Planung oberflächennaher geothermischer Systeme. Eine solche Funktion wird derzeit nicht in allen kommerziellen Simulationsinstrumentarien standardmäßig angeboten, was zur Überdimensionierung der Anlagen führen kann, da das thermische Erholungspotenzials des Standorts wegen fehlender Grundwassereinflüsse unterschätzt wird.

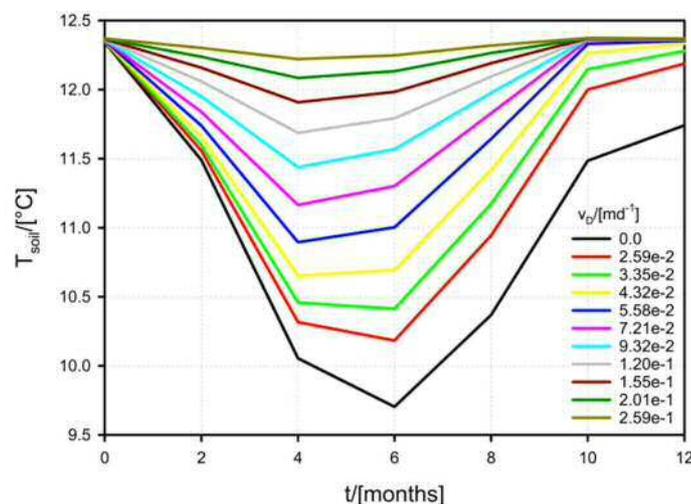


Abbildung II.1-11: Einfluss von Grundwasserströmungen (Geschwindigkeit in Meter pro Tag) auf die Bodentemperatur im Verlaufe des ersten Jahres des Anlagenbetriebs (erste Heizperiode). Bodentemperatur berechnet in 60,5 m Tiefe und 1 m Entfernung von der Erdwärmesonde (Abb. aus Hein et al., 2016a).

Mit einem exemplarischen Szenario konnte gezeigt werden, dass sich die thermische Erholungsrate des Untergrundes deutlich verbessert, wenn die Wärmepumpe im Sommer im Reverse-Modus betrieben wird, d. h., wenn sie benutzt wird, um Überschusswärme aus einer Gebäudeklimatisierung über die Erdwärmesonde im Untergrund zu speichern (aktive Gebäudekühlung; siehe Abb. II.1-12). Die Bodentemperatur und die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde sind in diesem Fall deutlich höher im Vergleich zum ausschließlichen Heizbetrieb des Systems, verbunden mit dem Abschalten der Wärmepumpe in der Sommerperiode. Aus der höheren Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde resultiert eine verbesserte Leistung der Wärmepumpe (d. h. eine höhere Leistungszahl). Gleichzeitig wird durch den Eintrag von Wärme in den Untergrund der quasistatische Zustand des thermodynamischen Systems schneller erreicht.

Numerische Sensitivitätsanalysen bezüglich der thermischen Parameter des Hinterfüllmaterials zeigten, dass die Bodentemperatur durch eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials aufgrund dessen geringen Volumens im Gesamtsystem nicht

beeinflusst wird. Die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde steigt hingegen mit steigender Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials nichtlinear an, da die Temperatur des zirkulierenden Wärmeträgerfluids von der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und (bedingt durch den direkten Kontakt) des Hinterfüllmaterials beeinflusst wird. Somit verbessert sich die Leistung der Wärmepumpe mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials. Im Verlaufe entsprechender Szenarienstudien konnte festgestellt werden, dass die optimale Konfiguration bezüglich der Wärmetransportprozesse dann gegeben ist, wenn die Wärmeleitfähigkeiten von Untergrund und Hinterfüllmaterial identisch sind.

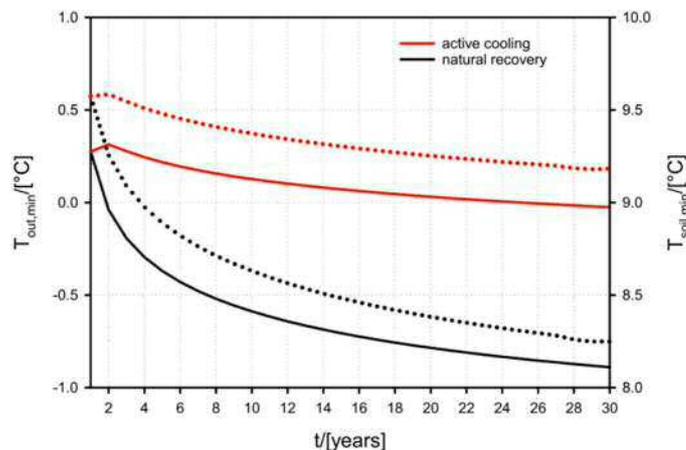


Abbildung II.1-12: Minimaltemperaturen in den einzelnen Heizperioden im Verlaufe eines Anlagenbetriebs von 30 Jahren bei aktiver Gebäudekühlung (rote Linien) verglichen mit einem reinen Heizbetrieb (schwarze Linien). Durchgezogene Linien: Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde (linke Achse). Gestrichelte Linien: Bodentemperatur in 60,5 m Tiefe und 1 m Entfernung von der Erdwärmesonde (Abb. aus Hein et al., 2016a).

Wie oben ausgeführt wurde, erwies sich in den hier diskutierten Studien, dass die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes nur geringe Auswirkungen auf die thermische Erholung des Bodens und die Leistung der Wärmepumpe hat. Dies impliziert jedoch, dass reale Werte für die Wärmeleitfähigkeit bekannt sind und bei der Ermittlung der Erdwärmesondenlänge berücksichtigt werden (beispielsweise nach VDI 4640). In der aktuellen Auslegungspraxis wird (bei bekannter geologischer Schichtung des betrachteten Standorts) insbesondere für Kleinanlagen der oberflächennahen Geothermie in der Regel auf eine geophysikalische Vorerkundung am Standort selbst verzichtet, sondern auf Literaturwerte, z. B. für die Wärmeleitfähigkeit, zurückgegriffen. In der Literatur (etwa VDI 4640) werden jedoch typische Intervalle für diese Werte angegeben, so dass die realen Standortparameter nicht unerheblich von willkürlich aus diesen Intervallen gewählten Werten differieren können. Dies kann im Planungsprozess zu merklichen Abweichungen in den Leistungsparametern des Systems führen. Eines der betrachteten Szenarien mit realistischer Parametrisierung zeigte z. B., dass bereits ein realer Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, der etwa zwei Drittel des angenommenen Wertes entspricht, nach wenigen Jahren ausschließlichen Heizbetriebs zu Auslasstemperaturen an der Erdwärmesonde führen kann, die unter dem Gefrierpunkt des Wärmeträgerfluids liegen. Für solche Fälle verfügen Wärmepumpen in der Regel über einen automatischen Abschaltmechanismus, um mechanische Schädigungen des Systems zu vermeiden.

Auch die zu erwartende Gebäudelast sollte über den gesamten Planungszeitraum so realistisch wie möglich unter Berücksichtigung weiterer Systeme der Wärme- und Kälteversorgung sowie unter Einbeziehung eines zu erwartenden Nutzerverhaltens eingeschätzt

und nicht nur basierend auf Bauunterlagen (z. B. Heizflächen und geplante, generelle Nutzung) angenommen und als konstant angesehen werden. Andernfalls besteht auch in diesem Fall das Risiko der Unter- oder Überdimensionierung der geothermischen Anlage. Für das untersuchte Beispiel konnte beispielsweise gezeigt werden, dass bereits eine reale thermische Gebäudelast, die um bis zu 30% über dem bei der Planung angenommenen Wert liegt, zu einem deutlichen Abfall der Systemeffizienz führt. Bei einer realen Überlast von 40% schaltete sich das System in der Simulation nach wenigen Jahren automatisch ab, da die Auslasstemperatur des Wärmeträgerfluids an der Erdwärmesonde unter dem Gefrierpunkt absank. Im Fall einer Überlast von 50% begann das hypothetische System seine Arbeit erst gar nicht, da es dafür deutlich unterdimensioniert war.

Zusammengefasst konnten aus den im F&E-Vorhaben SAGS durchgeführten Sensitivitätsanalysen und Szenarienstudien für den Betrieb von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen folgende grundlegende, für die Auslegungspraxis relevante Schlussfolgerungen erarbeitet werden:

- Der geothermische Gradient, der räumliche und zeitliche Verlauf der Oberflächentemperaturen sowie der vertikale geothermische Wärmefluss sind in die Modellierung einzubeziehen, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen. Die mit diesen Parametern gesteuerten Mechanismen beeinflussen die Temperaturfeldentwicklung in der Umgebung von Erdwärmesonden, die Systemleistung und die thermische Erholung des Untergrundes wesentlich. In der Regel werden diese Parameter in analytischen Modellen nicht berücksichtigt. Vielmehr wird dort meist von einer konstanten thermischen Last an der Erdwärmesonde sowie homogenen thermischen Eigenschaften des Untergrundes, homogenen Anfangsbedingungen und homogenen Randbedingungen ausgegangen.
- Eine Vernachlässigung der Wirkung der Wärmepumpenanlage, respektive deren Leistungszahl, bei der Ermittlung der realen thermischen Last an der Erdwärmesonde führt zur Unterschätzung der Bodentemperatur sowie der Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde. Das resultiert in einer Überdimensionierung der gesamten geothermischen Anlage und damit in unnötig hohen Investitionskosten. Dieser Effekt verstärkt sich bei der Planung eines Erdwärmesondenfeldes mit gegenseitiger Beeinflussung der Sonden untereinander noch.
- Die Berücksichtigung der realen Grundwasserverhältnisse kann die Investitionskosten deutlich senken, da beispielsweise die Länge von Erdwärmesonden bei vorhandener Grundwasserströmung reduziert werden kann.
- Der Eintrag von Überschusswärme aus einer Gebäudekühlung oder von Prozessabwärme sowie die Verwendung von thermisch verbesserten Hinterfüllmaterialien (d. h. hohe Wärmeleitfähigkeit) beim Einbau von Erdwärmesonden führen jeweils zur Steigerung der Systemeffizienz.
- Eine Erkundung der realen Untergrundstruktur inklusive der Messung entsprechender thermischer, hydraulischer und petrophysikalischer Parameter am Standort ist von hoher Priorität für eine zuverlässige Systemauslegung nicht nur für oberflächennahe Geothermiesysteme, sondern auch für Einzelanlagen.
- Besonders für großflächige Erdwärmesondensysteme sollte ein räumliches und zeitliches thermisches Ungleichgewicht des Untergrundes so gering wie möglich gehalten werden, um die Langzeit-Effizienz und Nachhaltigkeit der Gesamtanlage zu garantieren.

In der Literatur wird der Betrag der nutzbaren oberflächennahen geothermischen Energie zur Abschätzung des geothermischen Potenzials eines Standorts in der Regel mit einer einfachen analytischen Formel abgeschätzt. Diese verknüpft das betroffene Volumen im Untergrund, die spezifischen Wärmekapazitäten von Bodens/Gestein und Porenfluid sowie den Temperaturgradienten miteinander, der bei der geothermischen Nutzung des Untergrundes zu erwarten ist. Damit liegt ein attraktives und praktisches Vorplanungsinstrument für Stadtplaner, Grundstückseigentümer, Planungsbüros und Politiker vor. Der Temperaturgradient wird in diesem Fall als im betrachteten Volumen homogen verteilt und die thermische Energie als hundertprozentig nutzbar angenommen, ohne den Einfluss der Wärmepumpenanlage zu berücksichtigen

Während die geologische Schichtung relativ einfach in die Beziehung zur Ermittlung der nutzbaren oberflächennahen geothermischen Energie einbezogen werden kann, stellt die Berechnung des Temperaturgradienten den wichtigsten und wissenschaftlich anspruchsvollsten Aspekt dar. Bei Nutzung von Erdwärmesonden(systemen) wird in der Realität die Wärme dem Untergrund lokal entzogen, d. h., der Temperaturgradient ist in unmittelbarer Nähe der Sonden am größten, nimmt schnell mit wachsender Entfernung davon ab und entwickelt sich zudem bei Präsenz von Grundwasserströmungen in Form einer Kältefahne in Strömungsrichtung. Weiterhin wird das Temperaturfeld im Untergrund von der Oberflächentemperatur und der (in der Regel inhomogenen) geologischen Schichtung des Untergrundes beeinflusst. Somit liefert die oben erwähnte analytische Formel zwar eine einfache und direkte Abschätzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials am Standort, basiert aber auf unrealistischen Annahmen.

Von Hein et al. (2016c) wird das Konzept eines äquivalenten Bodentemperaturgradienten diskutiert, das im F&E-Vorhaben SAGS entwickelt wurde und zu realistischeren Ergebnissen bei der Abschätzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials führt. In der genannten Arbeit werden zudem unterschiedliche Einflussfaktoren auf Gestaltung und Entwicklung des äquivalenten Bodentemperaturgradienten numerisch untersucht.

Nach VDI 4640 errechnet sich der Betrag an geothermischer Energie, der dem Untergrund durch eine Erdwärmesonde entzogen werden kann, aus dem Produkt der Länge der Erdwärmesonde und der spezifischen Wärmeentzugsleistung. Letztere ist vom Boden- bzw. Gesteinstyp abhängig und wird in der Literatur mit vielfältigen empirischen Beziehungen charakterisiert. Dabei berücksichtigen die meisten Ansätze nur die Wärmediffusion im Boden/Gestein und nur wenige auch die Grundwasserströmung.

In Hein et al. (2016c) wurde ein modifizierter Parameter, die technisch nutzbare geothermische Energie im oberflächennahen Untergrund, definiert und in verschiedenen Szenarien untersucht. Dabei wurde das oben beschriebene Standortmodell (vgl. Hein et al., 2016a) genutzt und eine einzelne Erdwärmesonde mit der fixen Länge von 100 m betrachtet. Für Simulationen mit Grundwasserströmung wurde dieses Modell in Strömungsrichtung auf eine Länge von 600 m erweitert, um Überlagerungen der sich ausbreitenden Wärme- bzw. Kältefahne mit dem Modellrand zu vermeiden. Zudem wurde die Erdwärmesonde dabei nicht zentral, sondern in einer Entfernung von 100 m von dem Modellrand platziert, an dem das Grundwasser in das Gebiet einströmt. Die Anfangs- und Randbedingungen waren mit den in Hein et al. (2016a) beschriebenen identisch, lediglich für den geothermischen Gradienten und die jahreszeitliche Variation der Oberflächentemperatur wurden nicht die Werte der Leipziger Region, sondern Mittelwerte für Deutschland genutzt. Mit diesem Modell wurden folgende Szenarien betrachtet:

- Variation der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zwischen den in der VDI 4640 angegebenen Minima und Maxima für unterschiedliche Bodentypen,
- Variation der Fließgeschwindigkeit einer angenommenen Grundwasserströmung in einem Aquifer zwischen 15 und 35 m Tiefe unterhalb der Oberfläche und
- zwei Szenarien betreffs einer kleinen Quartierslösung mit jeweils vier Eigenheimen, die je eine eigene Erdwärmesonde, gekoppelt mit einer Wärmepumpenanlage betreiben.

Für die Simulation eines Modells mit Referenzparametern zeigte sich nach 30 Jahren ausschließlichen Heizbetriebs des Systems mit einer einzelnen Erdwärmesonde, dass das Temperaturfeld eine inhomogene Verteilung aufweist (siehe Abb. II.1-13). Die niedrigste Temperatur wird unmittelbar an der Erdwärmesonde beobachtet. Bei Präsenz einer ausgeprägten Grundwasserströmung bildet sich durch Wärmekonvektion und -dispersion eine Temperaturfahne in Richtung der Grundwasserströmung aus.

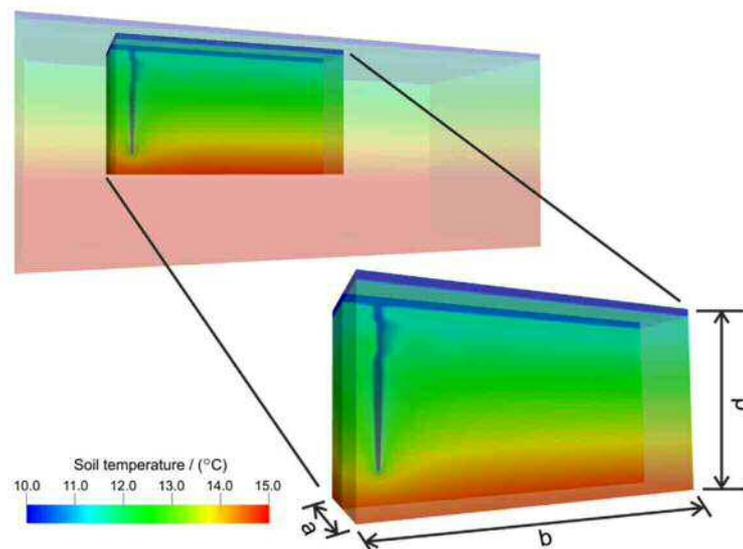


Abbildung II.1-13: Isoflächendarstellung des Temperaturfeldes für Ende Dezember nach einem ausschließlichen Heizbetrieb der Anlage im Zeitraum von 30 Jahren (Abb. aus Hein et al., 2016c).

Die Simulationsergebnisse bestätigten deutlich, dass das Temperaturfeld an einem oberflächennahen Geothermiestandort zeitlich und räumlich inhomogen ist. Um dennoch die oben beschriebene analytische Beziehung zur Ermittlung der nutzbaren geothermischen Energie anwenden zu können, wurde im F&E-Vorhaben SAGS eine mittlere Bodentemperatur definiert. Dieses stellt ein gewichtetes Integral über die räumliche Temperaturverteilung im betrachteten Gebiet für ein bestimmtes Volumen des Untergrundes zu einer fixierten Zeit dar (vgl. Hein et al., 2016c). Der in oben erwähnter Berechnungsformel benötigte Temperaturgradient ergibt sich dann aus der Differenz zweier Werte für die mittlere Bodentemperatur zu unterschiedlichen Zeitpunkten. In Hein et al. (2016a) sind dies beispielsweise der letzte und der erste Zeitschritt der numerischen Simulation, d. h. der Zustand nach 30 Jahren Anlagenbetrieb und der ungestörte Anfangszustand.

Bei Berücksichtigung von Grundwasserströmungen im numerischen Modelle wird der räumliche Temperaturgradient in der Umgebung einer Erdwärmesonde steiler (siehe Abb. II.1-14). Zudem ergibt sich die kuriose Situation, dass die mit oben beschriebener analytischer Beziehung berechnete nutzbare oberflächennahe geothermische Energie mit steigender Fließgeschwindigkeit einer Grundwasserströmung immer geringer wird, da wegen

des verbesserten thermischen Erholungspotenzials des Untergrundes der dort beobachtete zeitliche Temperaturgradient in diesem Fall immer geringer wird. Dies widerspricht zunächst der Intention, dass das verfügbare geothermische Potenzial mit zusätzlich in das betrachtete Gebiet eingebrachter thermischer Energie (z. B. eben über eine Grundwasserströmung) wachsen sollte.

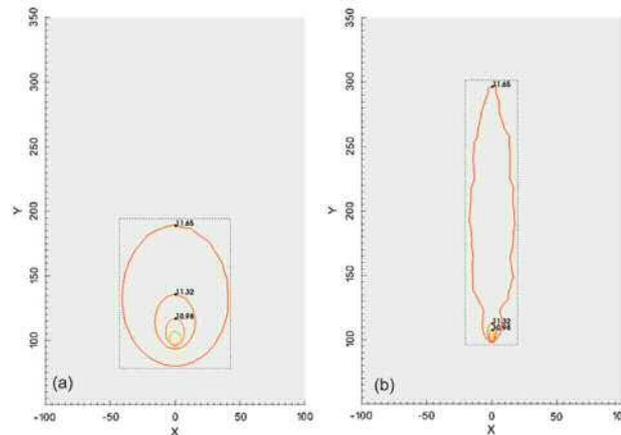


Abbildung II.1-14: Temperaturisolinien in einer Tiefe von 25 m (vertikale Mitte des Grundwasserleiters (Aquifers)) bei Fließgeschwindigkeiten der Grundwasserströmung von 0,005 m d-1 (a) bzw. 0,0646 m d-1 (b) nach einem ausschließlichen Heizbetrieb der Anlage im Zeitraum von 30 Jahren (Abb. aus Hein et al., 2016c).

Zur Auflösung dieses durch die Modellannahmen bedingten Widerspruchs ist es erforderlich, die Wirkung der Wärmepumpenanlage in das Modell einzubeziehen. Da die Wärmepumpe bei einer höheren Bodentemperatur einen geringeren Bedarf an Elektroenergie aufweist, um die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde auf die im Gebäude benötigte Temperatur anzuheben, muss die tatsächlich (technisch) nutzbare geothermische Energie gegenüber obiger Formel korrigiert werden. Das ist auch aus dem Grund erforderlich, da die Gesamtenergiebilanz des Systems ebenfalls von zusätzlich über die Oberfläche oder interne volumetrische Quellen (z. B. urbane Wärmeinseln im städtischen Raum) eingebrachte thermische Energie mitbestimmt wird, die teils nicht explizit durch die Erdwärmesonde entzogen, sondern über den Rand weitertransportiert wird.

Folgende Schlussfolgerungen konnten aus den theoretischen und numerischen Untersuchungen zur Charakterisierung des geothermischen Potenzials eines oberflächennahen Geothermiestandorts gezogen werden:

- Zur Abschätzung der theoretisch technisch nutzbaren oberflächennahen geothermischen Energie ist die oben erwähnte analytische Formel prinzipiell anwendbar.
- Dazu sind jedoch realistischere Abschätzungen für den zeitlichen Temperaturgradienten erforderlich, zu dessen Ermittlung in SAGS das numerische Konzept zur Berechnung eines äquivalenten Temperaturgradienten entwickelt wurde.
- Dieser äquivalente Temperaturgradient erweist sich als Funktion der thermischen Eigenschaften des Untergrundes, hydrologischer Parameter, des Systemdesigns (z. B. Zahl und Anordnung der Erdwärmesonden) sowie von Lastannahmen (z. B. Präsenz zusätzlicher thermischer Energiequellen).
- Es wurde gezeigt, dass der Temperaturgradient im Untergrund bei Nutzung einer einzelnen Erdwärmesonde und ausschließlichem Heizbetrieb über einen Zeitraum von 30 Jahren in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens unter den getroffenen Annahmen und Parametrisierungen zwischen -2,8 K und -1,8 K

beträgt, bei Systemen von vier Erdwärmesonden je nach Anordnung der Sonden zwischen -4,4 K und -3,9 K.

- Der äquivalente Temperaturgradient muss wegen Randeffekten (z. B. Fluktuationen der Oberflächentemperatur oder Wärmeflüsse zusätzlich zu den durch den geothermischen Gradienten hervorgerufenen) korrigiert werden – der entsprechende Wert wurde im Fall der in Hein et al. (2016c) verwendeten Modellparametrisierung zu bis zu 0,26 K ermittelt.

Wie oben erwähnt konnte im letzten Projektjahr des F&E-Vorhabens SAGS noch ein realer Standort auf einem Geothermie-Testfeld des Kooperationspartners UFZ erschlossen und für numerische Szenarienanalysen vorbereitet werden. Auf diesem Testfeld sind insgesamt vier Erdwärmesonden installiert (ein einfaches U-Rohr, zwei Doppel-U-Rohre, eine Koaxialsonde). Von beauftragten Unternehmen wurden an diesen Sonden Thermal Response Tests zur Ermittlung thermischer Untergrundparameter durchgeführt und protokolliert. Im Rahmen einer studentischen Arbeit (Fenz, 2017) wurde ein erstes Simulationsmodell für den Teststandort aufgesetzt und für numerische Simulationen der Thermal Response Tests mit OpenGeoSys genutzt. Das geometrische Modell besteht in einem Würfel mit Seitenlängen von jeweils 30 m. Für Einzelsimulationen wurde die Erdwärmesonde jeweils im Zentrum des Modellgebiets platziert (vgl. Abb. II.1-15).

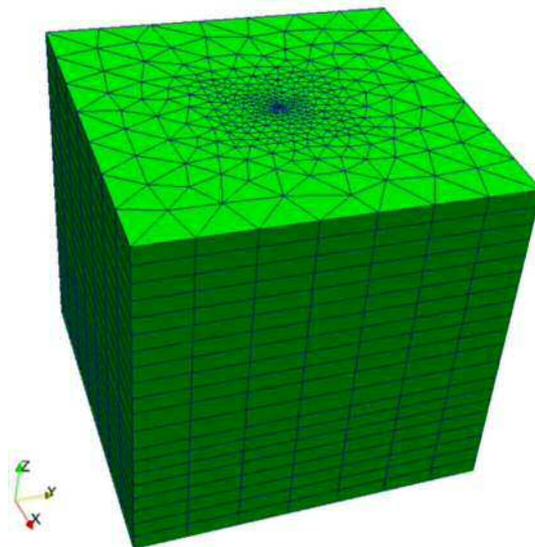


Abbildung II.1-15: Vernetztes Geometriemodell für den Standort des Geothermieszenarios auf dem Gelände des UFZ (Abb. aus Fenz, 2017).

Die Dicke der Bodenschichten im Modell wurde mit Werten zwischen 1,3 m und 1,9 m festgelegt und die Simulationen der jeweiligen Thermal Response Tests erfolgte einzeln und unabhängig voneinander. Im Ergebnis konnten die Auslasstemperaturen an den Erdwärmesonden mit sehr guter Näherung an die in den Thermal Response Tests gemessenen Werte berechnet werden.

Bei der Installation einer der Erdwärmesonden auf dem Testfeld wurde ein Bohrkern gezogen und an diesem durch den Kooperationspartner UFZ hochaufgelöst hydraulische und thermische Parameter gemessen. Damit konnte ein Vergleich der Modellierung der thermischen Nutzung des betrachteten Simulationsgebiets mit unterschiedlichen Parametrisierungen vorbereitet werden: i) Annahme homogener Untergrundeigenschaften auf der Basis der Parametrisierung mit den aus den Thermal Response Tests gewonnenen inte-

gralen Werten und ii) Berücksichtigung der inhomogenen Untergrundeigenschaften auf den Basis der hochauflösenden Messreihen durch das UFZ. Die Simulationsarbeiten zu diesem Vergleich sind aktuell noch nicht abgeschlossen, Ergebnisse sollen später gemeinsam mit dem UFZ in der Fachliteratur veröffentlicht werden. Ebenso sind die Sichtung, Aufbereitung und Publikation des umfangreichen Datenmaterials noch nicht vollständig abgeschlossen, die vom Department Monitoring- und Erkundungstechnologien als ein Beitrag des Kooperationspartners UFZ zum F&E-Vorhaben SAGS mit unterschiedlichen Verfahren erhoben wurden. Diese Arbeiten und erste Ergebnisse werden im Folgenden ausführlicher erläutert. Da die Ergebnisse vielversprechende Hinweise auf wünschenswerte Ergänzungen zur aktuellen Auslegungspraxis oberflächennaher geothermischer Systeme erwarten lassen, werden die experimentellen und numerischen Untersuchungen im Rahmen studentischer Arbeiten und vorhandener Ressourcen des Zuwendungsempfängers sowie des UFZ weitergeführt und veröffentlicht

Die Kenntnis über den Aufbau des geologischen Untergrundes ist Grundvoraussetzung für den Bau und Betrieb von Systemen zur Nutzung oberflächennaher Geothermie. Dabei muss zunächst untersucht werden, ob der geologische Untergrund den Anforderung der geplanten Nutzung (Heizen, Kühlen, saisonale Wärmespeicherung) genügt und welche Nutzungsform (z. B. offene oder geschlossenen Systeme) in Anbetracht der ermittelten (hydro)geologischen Bedingungen eingesetzt werden können. Bei der Planung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen ist daher das Verständnis über den Aufbau des geologischen Untergrundes für eine zuverlässige Systemdimensionierung zwingend notwendig, um eine Unter- oder Überdimensionierung zu vermeiden. Beispielsweise zeigen Schelenz et al. (2017) anhand eines Fallbeispiels, wie Unsicherheiten in der Parametrisierung des Untergrundes zu Unsicherheiten in der Dimensionierung von Systemen zur Nutzung oberflächennaher Geothermie führen. Erdwärmesonden, d. h. geschlossene Systeme, werden in Deutschland sehr häufig zur Nutzung oberflächennaher Geothermie eingesetzt. Wie auch die oben diskutierten Szenarienstudien bestätigten, ist die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes eine der wesentlichen Messgrößen bei der Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen und dient als Grundlage zur Errechnung der Wärmeentzugsleistung aus dem Untergrund (siehe u. a. Panteleit und Reichling, 2006; Schelenz et al., 2017).

Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit bei der Nutzung oberflächennaher Geothermie wird häufig der sogenannte Thermal Response Test eingesetzt. Dabei wird eine Erdwärmesonde im Untergrund installiert und in der Regel über einen Zeitraum von 72 Stunden mit einer Heizlast beaufschlagt. Mittels gemessener Vor- und Rücklauftemperaturen (Ein- und Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde) sowie weiterer Systemparameter wird die scheinbare effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes bestimmt (Eklöf und Gehlin, 1996; Gehlin, 2002). Ein Thermal Response Test liefert dabei einen integralen Wert der Wärmeleitfähigkeit des durchteuften Untergrundes, gibt jedoch keine Auskunft über die vertikale Variation der Wärmeleitfähigkeit. Eine Ausnahme hierzu bildet der Enhanced Thermal Response Test, bei dem die Ermittlung der Verteilung der Wärmeleitfähigkeit allerdings mit einem wesentlich größeren technischem und finanziellem Aufwand verbunden ist.

Im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS sollten anhand von experimentellen Untersuchungen durch das Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des Kooperationspartners UFZ die folgenden Aufgaben bearbeitet werden:

- Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit und Genauigkeit von Thermal Response Tests in der Praxis, insbesondere im heterogenen Untergrund sowie
- Erhebung von hochparametrisierten Beispieldatensätzen von Thermal Response Tests als Benchmarks für die Modellierung.

Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit und Genauigkeit von Thermal Response Tests, insbesondere im heterogenen Untergrund wurden im Rahmen von SAGS durch eine beauftragte Firma drei Erdwärmesonden auf dem hydrogeologischen Testfeld am UFZ in Leipzig installiert und entsprechende Thermal Response Tests durchgeführt. Informationen zu den jeweiligen Erdwärmesonden sind in Tab. II.1-1 aufgeführt. Der Installation der Erdwärmesonden ging eine hochauflösende Direct Push Untergrunderkundung zur Modellparametrisierung durch das UFZ voraus. Direct Push beschreibt dabei ein geringinvasives Sondierverfahren, bei dem ein Stahlhohlgestänge entweder dynamisch mit Hilfe eines Perkussionshammers in den Boden gehämmert und/oder statisch gedrückt wird. Am Ende des Hohlgestänges können Sensoren bzw. Sensorsonden zur quasikontinuierlichen oder tiefenorientierten Messungen von geotechnischen, geohydraulischen oder geochemischen Parametern angebracht werden (Dietrich und Leven, 2006). Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Electrical Conductivity Logging (EC) zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes. Hierbei können unter nicht-salinen und nicht-kontaminierten Bedingungen grundwasserleitende von grundwasserstauenden Schichten unterschieden werden, da ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit oftmals mit einer Zunahme von Tonmineralen in der Bodenmatrix einhergeht.
- Cone Penetration Testing (CPT) zur Ermittlung geotechnischer Parameter. Bei diesem Verfahren wird eine Sonde (Penetrometer) mit genormten Dimensionen mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 cm s^{-1} statisch in den Untergrund gedrückt. Während des Sondiervorgangs werden der Spitzendruck und die lokale Mantelreibung an der Sonde erfasst. Das Verhältnis dieser beiden Parameter dient hierbei der vertikalen Differenzierung zwischen rolligen und bindigen Schichten.
- Hydraulic Profiling Tool (HPT) zur Ermittlung hydrostratigraphischer Einheiten im Untergrund. Über eine Sensorsonde wird Wasser in den Boden injiziert. Aus dem Verhältnis von Durchfluss und dem dabei entstehenden Injektionsdruck können Aussagen zu den hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes getroffen werden.
- Direct Push basierter Slug Test (DPST) zur vertikal hochaufgelösten Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes im Untergrund.

Wie bereits oben erwähnt, wurde vor Installation der Erdwärmesonde EWS 1 ein Bohrkern bis 25 m unter Geländeoberkante entnommen. Dieser Bohrkern wurde geologisch angesprochen und aus repräsentativen Schichten wurden Proben zur Messung der Wärmeleitfähigkeit im Labor entnommen. Dafür wurden Messungen an insgesamt 34 Proben mittels der Nadelsonde KD2pro der Fa. Decagon Devices vorgenommen. Pro Probe wurden zwei Messzyklen aus jeweils mehreren Einzelmessungen durchgeführt, was insgesamt 391 Einzelmessungen entspricht.

Die Ergebnisse der Vorerkundung am betrachteten Standort sind in Abb. II.1-16 zusammengefasst, weitere Infos zu der Testfläche finden sich in Seibertz et al. (2016). Der Bereich, in dem die Erdwärmesonden installiert wurden, besteht aus einer etwa 10 m

mächtigen ungesättigten Zone aus tonigem Geschiebemergel mit einzelnen Sandlinien, gefolgt vom obersten, leicht gespannten Grundwasserleiter, der wiederum aus einer Wechsellagerung von Sanden und Kiesen sowie lokalen Toneinschlaltungen besteht.

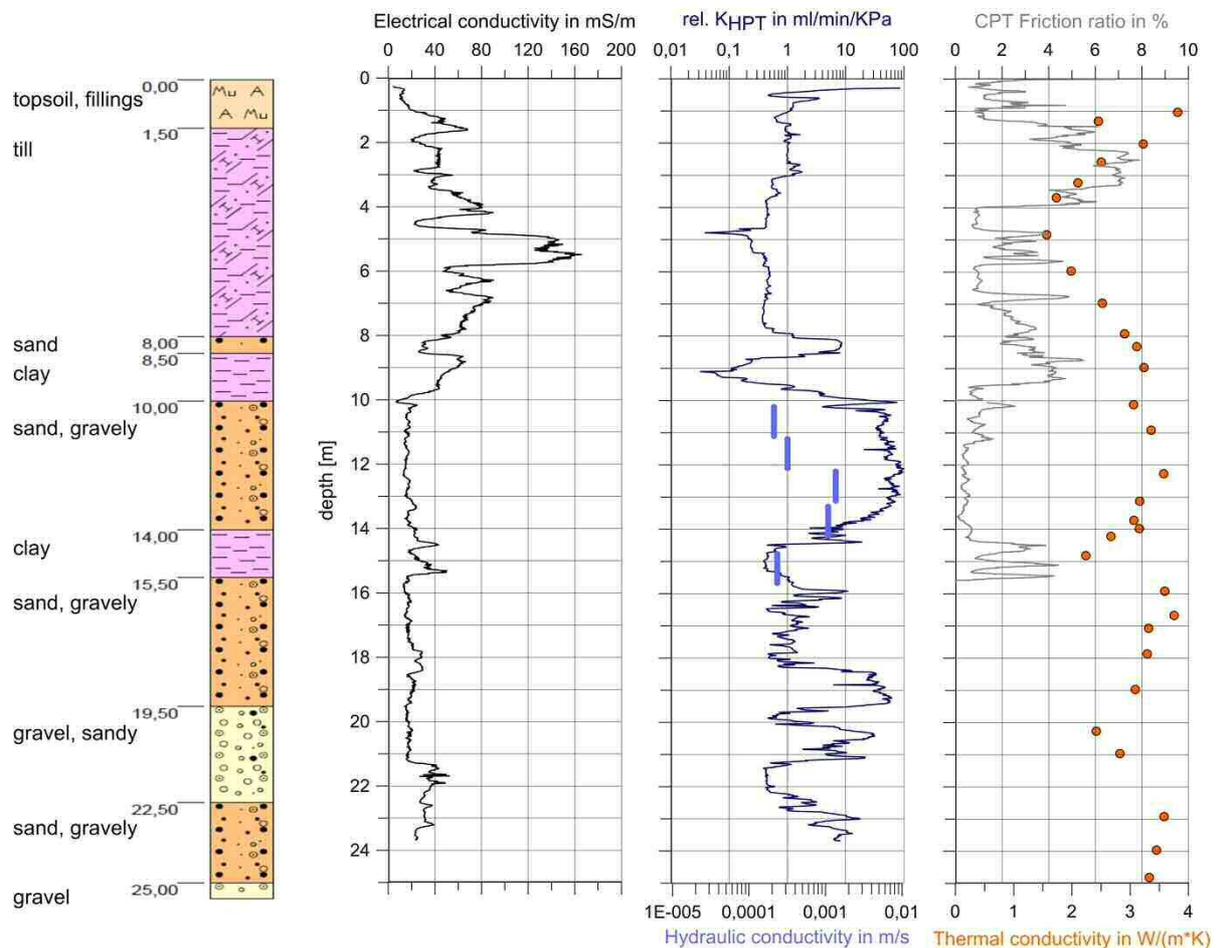


Abbildung II.1-16: Übersicht über die am hydrogeologischen Testfeld gesammelten Vorerkundungsdaten zur Modellparametrisierung, Vienken (2017).

Im November 2016 wurden die Erdwärmesonden durch ein Fachunternehmen auf dem hydrogeologischen Testfeld installiert. Nachdem sich das durch die Bohrarbeiten gestörte Temperaturfeld im Untergrund wieder an die natürlichen Bedingungen angepasst hatte, wurden im Zeitraum 28.11-12.12.2016 sowie 03.-20.05.2017 Thermal Response Tests an den Erdwärmesonden durch zwei verschiedene Fachfirmen durchgeführt. Tab. II.1-1 bietet einen Überblick über die erhobenen Messwerte. Zusätzlich wurden die Thermal Response Tests durch Messungen der Temperaturen an den Außenseiten der einzelnen Erdwärmesondenstränge begleitet, um ein Verständnis über die vertikale Temperaturverteilung, insbesondere für die Modellierung der Thermal Response Tests, zu erhalten. Dafür wurde ein biegeoptimiertes faseroptisches Kabel außen entlang der Erdwärmesondenstränge geführt, das aufgrund seines geringen Durchmessers und des Metallüberzuges einen guten Wärmeübergang in das Kabel ermöglicht. Die faseroptischen Temperaturmessungen beruhen darauf, dass durch einen Laser ein Lichtimpuls in das Kabel emittiert wird. An Unreinheiten oder kleinsten Beschädigungen wird das Licht reflektiert. Über den Raman-Effekt, bei dem die Wellenlänge eines gewissen Teils des

reflektierten Lichtes temperaturabhängig ist, kann das Lichtwellenleiterkabel mit einer Auflösung von einem Messpunkt pro Meter Kabellänge als Thermometer genutzt werden.

*Tabelle II.1-1: Installationsdetails der Erdwärmesonden sowie erhobene Messwerte (Vienken, 2017); * keine Messung aufgrund eines Defektes an der Koaxialsonde möglich.*

Bezeichnung	EWS 1	EWS 2	EWS 3
<i>Typ</i>	<i>Doppel-U</i>	<i>Doppel-U</i>	<i>Koaxial</i>
<i>Installationstiefe in m</i>	21,4	22,8	21,5
<i>Messwert Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K) Firma 1</i>	2,05	3,27	2,28
<i>Messwert Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K) Firma 2</i>	2,60	3,00	*
<i>Wärmeleitfähigkeit Labor in W/(m*K), geom. Mittel</i>	2,79	2,82	2,79

Aus den Daten in Tab. II.1-1 wird deutlich, dass große Unterschiede in den Messwerten zwischen den einzelnen Erdwärmesonden bestehen, obgleich diese ähnlich tief und nur wenige Meter voneinander entfernt installiert wurden. Hierbei spielt offenbar vor allem die Hinterfüllung der Erdwärmesonde, die u. a. über die thermische Ankopplung entscheidet, eine wesentliche Rolle. In der Praxis kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Ankopplung der Sonden u. a. durch Spülverluste unterscheidet und zu den Abweichungen in den Messwerten führen. Insgesamt zeigen die an der Erdwärmesonde EWS 2 erhobenen Daten im Vergleich zu den an den Kernen gemessenen Wärmeleitfähigkeiten die beste Übereinstimmung. Die mittels der Thermal Response Tests gemessenen Wärmeleitfähigkeiten liegen an der Erdwärmesonde EWS 2 etwas über den anhand der Kerne erhobenen Messdaten. Dies kann durch die Grundwasserströmung am Standort erklärt werden. Durch diese wird die Erdwärmesonde zusätzlich gekühlt und der Eindruck einer höheren scheinbaren Wärmeleitfähigkeit entsteht. Insgesamt belegen die Vergleichsmessungen wie wichtig das Verständnis von Einflussfaktoren bei der Durchführung und Auswertung von Thermal Response Tests in der Praxis ist.

II.1.7 Anwendungssimulationen und Szenarienstudien: Gefrierprozesse

Im F&E-Vorhaben SAGS konnten auch erste Szenariensimulationen zu potenziellen Gefrierprozessen im Untergrund beim Betrieb von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen durchgeführt werden. Die Methodik und Ergebnisse wurden besonders in der Publikation von Zheng et al. (2016) dokumentiert und dienen vorrangig der Analyse des Einflusses von Vereisungsvorgängen des Bodens/Gesteins auf die Gesamtsystemleistung und insbesondere auf die Leistungszahl der Wärmepumpenanlage.

Konkret wurde das hypothetische, realistische Szenario des Betriebs einer einzelnen Erdwärmesonde (einfaches U-Rohr), gekoppelt mit einer Wärmepumpe zur Versorgung eines Einfamilienhauses mit 140 m² Wohnfläche betrachtet. Die geologischen Konditionen

wurden entsprechend des Simulationsmodells eines Standorts in der Stadt Taucha bei Leipzig gewählt. Dieses Modell basierte auf einer im Rahmen eines anderen Verbundvorhabens durchgeführten Feldstudie des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien des Kooperationspartners UFZ für ein geplantes Neubaugebiet in Taucha (vgl. Schelenz et al., 2017). Das numerische Simulationsmodell ist in Abb. II.1-17 dargestellt.

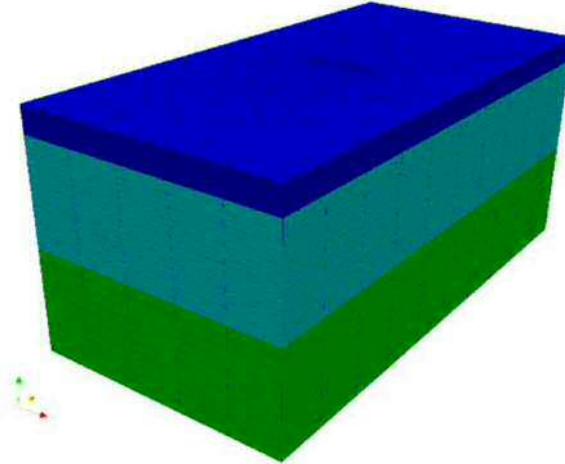


Abbildung II.1-17: Numerisches Simulationsmodell (3D-Gitter) für das Testbeispiel Taucha bei Leipzig (Abb. aus Shao et al., 2016a).

Für die Szenarienstudien wurde ausschließlich ein Heizzeitraum von drei Monaten in zwei unterschiedlichen Konfigurationen betrachtet, die sich durch die Länge der Erdwärmesonde unterscheiden: (i) Erdwärmesonde von 92 m Länge laut VDI 4640 für die spezifischen Standortbedingungen; (ii) Erdwärmesonde von 46 m Länge. Während bei der Konfiguration mit der längeren Sonde eine Vereisung des Untergrundes nicht erwartet wurde, bildet die zweite Konfiguration ein potenzielles Auslegungsergebnis ab, falls beispielsweise Gesteinsschichten eine tiefere Bohrung behindern oder die Wärmeleitfähigkeit des Bodens überbewertet wurde. Im Fall der zweiten Konfiguration sind Vereisungen in der Umgebung der Erdwärmesonde während der Heizperiode nicht auszuschließen.

Als eine der Randbedingungen für die numerische Simulation wird eine konstante thermische Last anstelle einer konstanten Einlasstemperatur an der Erdwärmesonde. Diese Annahme ist realistischer, da sie durch die thermische Gebäudelast bestimmt wird und den Einfluss der Wärmepumpenanlage (über deren Leistungszahl) berücksichtigt. Dadurch kann u. a. die thermische Gebäudelast dynamisch zwischen der Erdwärmesonde und dem Verbrauch elektrischer Energie aufgeteilt werden.

Die Szenariensimulationen führten in Abhängigkeit von der Länge der Erdwärmesonde und der Berücksichtigung oder Vernachlässigung von Prozessen des Gefrierens/Tauens zu unterschiedlichen Temperaturverteilungen im Untergrund (siehe Abb. II.1-18). Dabei wurde im Fall der längeren Erdwärmesonde erwartungsgemäß keine Bodenvereisung festgestellt. Für die kürzere Sonde zeigten die Simulationen signifikante Unterschiede, je nachdem, ob die Prozesse des Gefrierens/Tauens (charakterisiert durch die latente Wärme beim Phasenübergang) im Modell Berücksichtigung fanden oder nicht. Wurden potenzielle Vereisungsprozesse nicht in die Modellbetrachtung einbezogen, ergab sich für das betrachtete Szenario ein Temperaturabfall auf -9°C , mit Berücksichtigung der Gefriervorgänge jedoch lediglich ein Temperaturabfall auf -5°C . Das unterstreicht die Bedeutung

der Berücksichtigung potenzieller Phasenwechselprozesse der Porenflüssigkeit bei der Modellierung und numerischen Simulation oberflächennaher geothermischer Systeme.

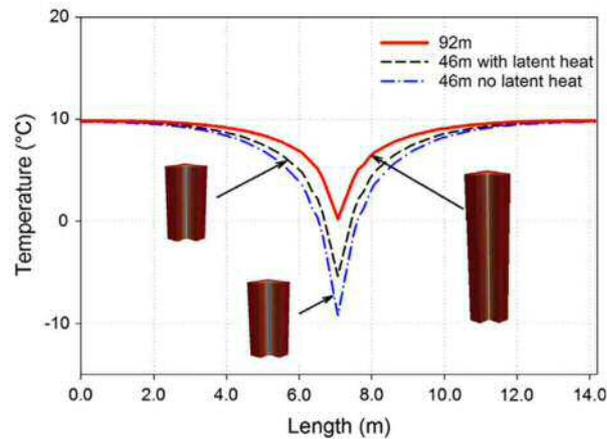


Abbildung II.1-18: Verteilung der Bodentemperatur an der Erdoberfläche entlang einer Diagonale des oberen Randes des geometrischen Simulationsmodells mit der Erdwärmesonde im Zentrum am Ende einer dreimonatigen Heizperiode (Abb. aus Zheng et al., 2016).

Noch deutlicher wird die Bedeutung der Berücksichtigung des Einflusses der latenten Wärme, die beim Phasenübergang von Wasser zu Eis abgegeben wird, bei Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde im Vergleich der betrachteten Szenarien (siehe Abb. II.1-19).

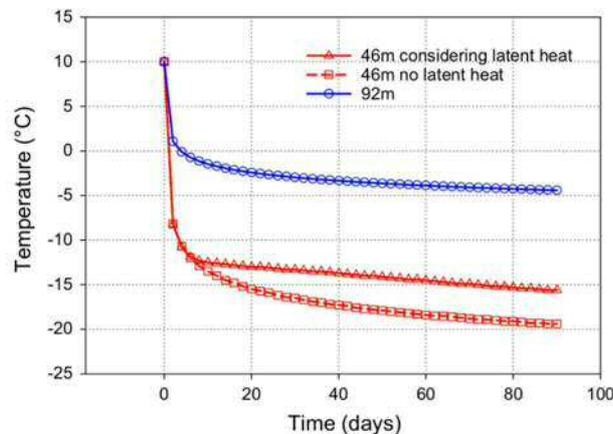


Abbildung II.1-19: Zeitliche Entwicklung der Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde im Vergleich der Szenarien mit unterschiedlichen Längen der Erdwärmesonde sowie bei Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung von Modellkomponenten zur Simulation von Vereisungsvorgängen im Boden während einer dreimonatigen Heizperiode (Abb. aus Zheng et al., 2016).

Es zeigt sich, dass die Auslasstemperatur an der Erdwärmesonde deutlich unterbewertet wird, wenn Modellkomponenten zur Beschreibung der Phasenwechselvorgänge bei potenzieller Vereisung des Untergrundes nicht berücksichtigt werden. Da die Auslasstemperatur der Erdwärmesonde wesentlich die Effizienz der Wärmepumpenanlage beeinflusst (deren Leistungszahl sinkt, wenn das Wärmeträgerfluid von einer niedrigeren Temperatur auf den Bedarf im Gebäude angehoben werden muss), wird in diesem Fall auch die Leistungszahl der Wärmepumpenanlage unterbewertet.

Das betrachtete Beispiel zeigt auch deutlich einen Aspekt, der bei der planerischen Auslegung einer oberflächennahen geothermischen Anlage mit Blick auf deren Langzeit-

wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen ist: Sollte eher eine längere Erdwärmesonde mit höheren Bohr- und Installationskosten jedoch geringeren Betriebskosten wegen der besseren Effizienz der Wärmepumpenanlage favorisiert werden oder ist es vorteilhafter, eine kürzere Sonde mit geringeren Anfangsinvestitionen aber höheren Betriebskosten zu installieren. Diese Optimierungsaufgabe bezüglich einer Gesamtkostenanalyse ist nur mit Hilfe numerischer Simulationen realistisch zu lösen. Bei deren Bearbeitung stellen die Berücksichtigung der Auswirkungen des Betriebs der Wärmepumpenanlage sowie von Phasenwechselprozessen bei potenziellem Gefrieren/Tauen des Untergrundes wichtige Aspekte dar. In Zheng et al. (2016) wird ein solches Optimierungsszenario als Teil der im F&E-Vorhaben SAGS durchgeführten Bewertungsstudie exemplarisch diskutiert. Details sollen hier nicht vertieft werden, in der Tendenz zeigt sich jedoch, dass die Gesamtkosten für Installation und langjährigen Betrieb einer oberflächennahen geothermischen Anlage geringer sind, je länger die Erdwärmesonde ist. Dabei gibt es ein deutlich ausgeprägtes Minimum im Optimierungsprozess mit folgender asymptotischer Annäherung an einen fixen Wert (etwas größer als das Minimum) mit weiter zunehmender Sondenlänge.

II.1.8 Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen und Anregungen zur Flexibilisierung regulativer Rahmenbedingungen

Die oberflächennahe Geothermie als dezentrales Energiesystem zur Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, Gebäudekomplexen und urbaner Areale gewinnt eine immer größere Bedeutung. Dabei ist es zwingend notwendig, die Anlagen effizient und nachhaltig auszulegen. In diesem Zusammenhang entstehen durch die intensivere Nutzung des geologischen Untergrundes neue Herausforderungen für eine zuverlässige Planung und Auslegung der geothermischen Anlagen, da diese sich bei örtlicher Nähe gegenseitig beeinflussen können. Damit werden Planer, Nutzer und Behörden beim Untergrundmanagement vor neue Herausforderungen gestellt. Daher ist es wünschenswert, die notwendigen Daten für die Auslegung aufzuführen und den Auslegungsprozess selbst für größere Erdwärmesondensysteme, gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen klar strukturiert darzustellen. Dieses ist das Ziel der im Anhang zu diesem Bericht beigefügten Studie, in der Schlussfolgerungen aus den oben dargestellten fachspezifischen Projektarbeiten des F&E-Vorhabens SAGS gezogen und Anregungen für Modifikationen und/oder Ergänzungen der regulativen Rahmenbedingungen formuliert werden.

In dieser Studie wird u. a. der aktuelle Stand der Technik in der Auslegungspraxis dargestellt. Dabei wurden die in den einzelnen Bundesländern vorhandenen Leitfäden und Merkblätter zur geothermischen Nutzung des Untergrundes analysiert und miteinander verglichen. Erhebliche Unterschiede in der Bereitstellung von Informationen als auch in den technischen Vorgaben für die Auslegung der Anlagen wurden zwischen den unterschiedlichen Bundesländern ersichtlich. Beispielhaft sei in Abb. I.1- der unterschiedliche web-basierte Datenbestand bezüglich des Untergrunds für die einzelnen Bundesländer aufgelistet. Dabei fällt auf, dass keines dieser Dokumente eine Empfehlung zur strukturierten Vorgehensweise bei der Planung und Auslegung von großflächigen oberflächennahen geothermischen Anlagen unter Berücksichtigung der relevanten Aspekte enthält – weder hinsichtlich der Überprüfung administrativ-rechtlicher als auch hydrogeologischer Voraussetzungen noch hinsichtlich der Auslegung selbst.

Land	Wasserschutzgebiete	Bohrungen	Grundwasserleiter	Hydraulische Durchlässigkeit	Grundwasser-messstellen	Grundwassergleichen	Flurabstand	Wärmeleitfähigkeit	Spezifische Entzugsleistung	Untergrund-temperaturen	Installierte Anlagen	Standortierung
Baden-Württemberg	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗
Bayern	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓
Berlin	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Brandenburg	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Bremen	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Hamburg	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Hessen	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Mecklenburg-Vorpommern	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Niedersachsen	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Nordrhein-Westfalen	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓
Rheinland-Pfalz	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Saarland	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Sachsen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Sachsen-Anhalt	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Schleswig-Holstein	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Thüringen	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓

Abbildung II.1-20: Übersicht über die Berücksichtigung potenziell planungsrelevanter Aspekte bei der Auslegung oberflächennaher geothermischer Systeme in web-basierten Karten der einzelnen Bundesländer (aus Vortrag von Bucher zum SAGS-Anwenderworkshop, 2016)).

Die VDI-Richtlinie 4640 empfiehlt für Einzelanlagen ein Auslegungsverfahren basierend auf der spezifischen Entzugsleistung. Die Gültigkeit dieses Verfahrens ist an bestimmte Randbedingungen gekoppelt (keine Grundwasserströmung, Heizleistung bis 30 kW, Anzahl der Jahresvolllaststunden 1200-1400, Doppel-U-Sonde 32x2,9 mm, Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials $0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, homogene Untergrundtemperatur von 11°C) und damit eingeschränkt. Bei Abweichungen der geplanten Anlage von dem Gültigkeitsrahmen müssen weiterführende Berechnungen durchgeführt werden. Die Anwendung der bereitgestellten Tabellenwerte zur Auslegung abweichender Anlagen/Szenarien kann sowohl zur Über- als auch Unterdimensionierung der Erdwärmesonden(systeme) führen, da relevante Effekte wie die über den Jahresverlauf schwankende Oberflächentemperatur,

unterschiedliche geothermische Gradienten, mögliche Grundwasserströmungen, variierende Wärmepumpenleistungen vernachlässigt werden. Weiterhin wird in der VDI-Richtlinie ein fester Mindestabstand zwischen Erdwärmesonden festgelegt. Dieser Abstand dient dazu, dass sich benachbarte Anlagen nicht gegenseitig beeinflussen sollen. Wie bereits bei den oben erläuterten Szenarienstudien diskutiert, hängt die gegenseitige Beeinflussung u. a. in großem Maße von vorhandenen Grundwasserströmungen ab, d. h. in bestimmten Fällen ist der vorgegebene Mindestabstand möglicherweise nicht ausreichend (z. B. im Bereich einer durch den Abstrom des Grundwassers charakterisierten Kältefahne), in anderen Fällen kann er ohne Probleme unterschritten werden.

Für Großanlagen verlangt die Richtlinie VDI 4640 für die Auslegung der Systeme einen Berechnungsnachweis. Vorgeschlagene Werkzeuge sind dabei analytische Rechenmodelle, Nomogramme, semi-analytische Näherungslösungen durch so genannte g-Funktionen und numerische Simulationen. Erstere Verfahren basieren ebenfalls auf einschränkenden Randbedingungen, die nicht für jeden Standort gültig sind. In diesen Fällen können nur numerische Simulationen zuverlässige Vorhersagen liefern. Die Richtlinie gibt jedoch weder zu den ersten drei Varianten, noch zur numerischen Simulation Hinweise für eine strukturierte Vorgehensweise zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung entsprechender Berechnungen/Simulationen.

Tabelle II.1-2: Daten und Bezugsquellen für Standortbewertung, Planung und Auslegung von oberflächennahen geothermischen Systemen.

Art der Daten	Form	Bezugsquelle
Wasserschutzgebiete	Karten	Geologische Dienste, Wasserbehörden
Aufschlüsse, Bohrungen	Karten, Verzeichnisse	Geologische Dienste, BGR (s.o.)
Thermische Untergrundparameter	Tabellenwerke, Literaturwerte, Karten (Wärmeleitfähigkeit), Messwerte	Fachliteratur, VDI 4640, Geologische Dienste, Erkundung
Hydraulische Leitfähigkeit	Literaturwerte, Karten, Messwerte	Fachliteratur, VDI 4640, Geologische Dienste, Wasserbehörden, Erkundung
Grundwasserströmung (Richtung, Gradient, Geschwindigkeit), Flurabstand	Grundwassermessstellen, Karten, Messwerte	Geologische Dienste, Wasserbehörden, Erkundung
Oberflächentemperatur	Karten, Messwerte	DWD, Meteorologische Institute
Geothermischer Gradient	Messwerte, Literaturwerte	Bohrdaten LIAG, Fachliteratur
Spezifische Entzugsleistung	Tabellen, Gleichungen	VDI 4640, Fachliteratur

Die Verfügbarkeit der notwendigen Daten zur Planung, Auslegung und Simulation von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen ist unterschiedlich und wird im Folgenden kurz dargestellt. Grundsätzlich sind bei den Daten drei Kategorien zu unterscheiden:

- Administrative Daten, hier vor allem Informationen zu Wasserschutzgebieten, die von den Behörden festgelegt werden,
- physikalische Größen, die zumeist die Parameter des Untergrundes betreffen und
- abgeleitete Größen, wie die spezifische Entzugsleistung und das geothermische Potenzial, die sich aus den lokalen physikalischen Parametern, der Anlagenkonfiguration, Betriebsmodi usw. ergeben.

In Tab. II.1-2 sind die benötigten Daten und deren Bezugsquellen zusammenfassend aufgelistet. Die Auswertung der von den Behörden bereitgestellten Daten zeigt, dass die freie Verfügbarkeit, Quantität und Qualität bzw. das Vorhandensein bestimmter Daten zwischen den Bundesländern uneinheitlich ist. Aus diesem Grund werden im Rahmen der hier diskutierten Studie auch Empfehlungen zur Erstellung einer einheitlichen Datensammlung für die oberflächennahe Geothermie ausgesprochen.

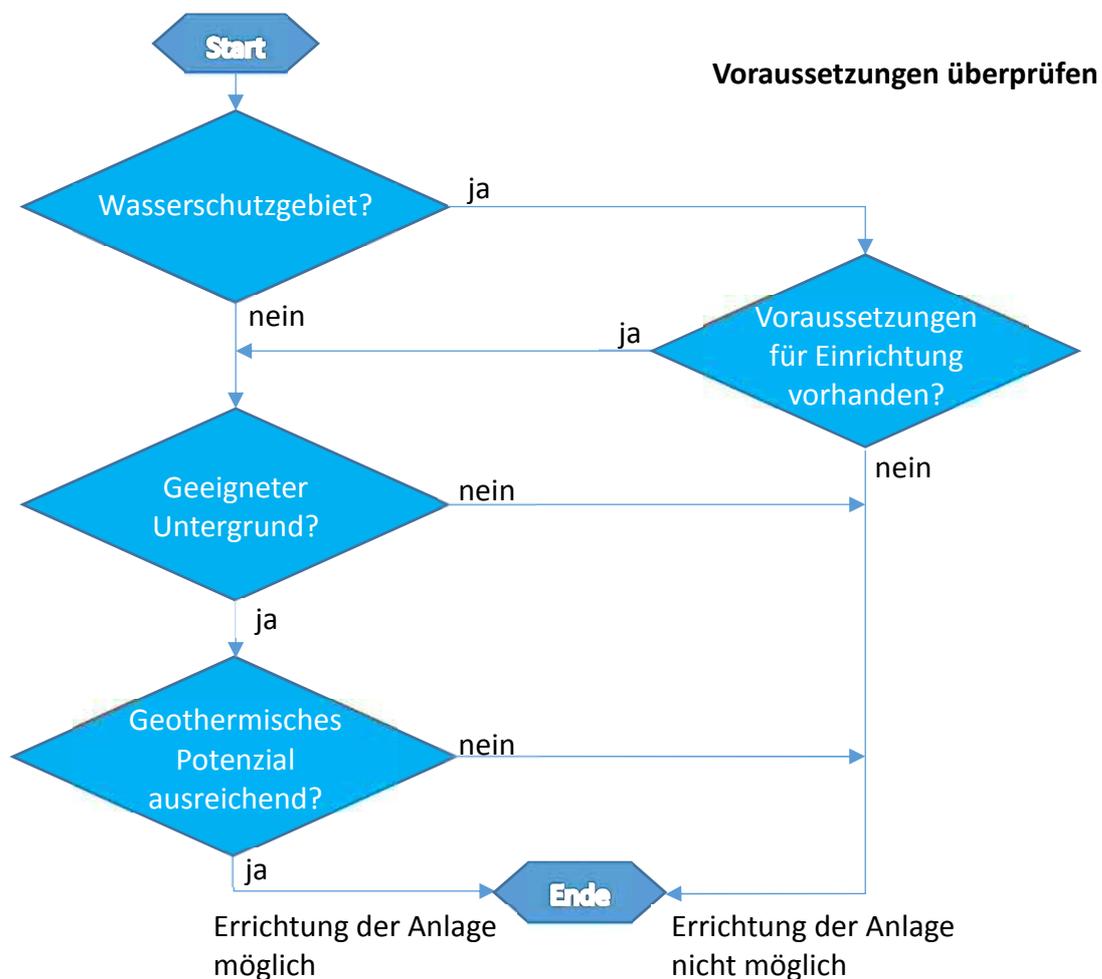


Abbildung II.1-21: Teil des im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS vorgeschlagenen Workflows zur Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zur Überprüfung der Voraussetzungen zur Errichtung und zum Betrieb der Anlage (aus Vortrag von Bucher zum SAGS-Anwenderworkshop, 2016)).

Wie bereits erwähnt, beinhaltet die VDI-Richtlinie 4640 keine Hinweise zur strukturierten Vorgehensweise bei der Planung und Auslegung von großflächigen geothermischen Anlagen mit Erdwärmesonden wie auch zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung entsprechender Berechnungen/Simulationen. Innerhalb des Projektes SAGS wurde daher ein entsprechender Workflow entwickelt und in der Studie zum Projekt wird dieser vorgestellt. Das Ziel dabei war die Herleitung einer systematischen Vorgehensweise zur Unterstützung bei bzw. Durchführung von Machbarkeitsuntersuchungen, Planung und (Vor-)Auslegung sowie Genehmigungstätigkeiten von EWS-gekoppelten Wärmepumpenanlagen. Der Workflow gliedert sich in drei wesentliche Schritte:

1. Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb der Anlage überprüfen (Abb. II.1-21):

In einem ersten Schritt ist zu überprüfen, ob die geplante Anlage in einem Trinkwasser- oder Heilquellenschutzgebiet errichtet würde oder ob andere wasserrechtliche Einschränkungen vorliegen, die den Betrieb der Anlage nicht zulassen. Des Weiteren wird die grundsätzliche Eignung des geologischen Untergrundes für den Betrieb von Erdwärmesonden(systemen) überprüft. So sollten durch die Abteufung von Bohrungen keine Grundwasserleiter miteinander verbunden werden (hydraulischer Kurzschluss). Ebenso wird die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes überprüft, die für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage mindestens Werte von $0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aufweisen sollte. Wenn dazu gleichzeitig Informationen zum vorhandenen geothermischen Potenzial vorliegen, kann anschließend sofort abgeschätzt werden, inwieweit der benötigte Heizbedarf durch die geothermische Anlage nachhaltig und effizient gedeckt werden kann.

2. Mögliche Interaktion mit benachbarten Anlagen überprüfen (Abb. II.1-22):

Sind die Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb einer oberflächennahen geothermischen Anlage gegeben, ist zu überprüfen, ob in der Nachbarschaft des geplanten Standorts bereits geothermische Anlagen betrieben werden, um negative Wechselwirkungen zwischen diesen und dem geplanten System auszuschließen. Existieren bereits in Betrieb befindliche Anlagen, ist aus dem durch sie bereits genutzten geothermischen Potenzial das lokal noch verfügbare Potenzial zu ermitteln. Ebenso ist abzuklären, inwiefern die geplante Anlage mit den Bestandsanlagen interagiert. Dabei spielen insbesondere vorhandene Grundwasserströmungen eine wichtige Rolle, können doch durch diese notwendige Abstände zwischen den Anlagen, je nach Fließrichtung, vergrößert oder verkleinert werden. Falls mit einer Interaktion der Anlagen gerechnet werden muss, so ist deren Einfluss auf die Funktion der Anlage abzuschätzen und zu entscheiden, ob dieser Einfluss in einem vertretbaren Rahmen ist.

3. Vorauslegung bzw. Auslegung je nach Anlagentyp bzw. -größe (Abb. II.1-23):

Im dritten Schritt geht es speziell um die Auslegung der Anlagen. Bei Kleinanlagen kann dabei direkt auf die Empfehlungen der VDI 4640 unter Berücksichtigung vorhandener Randbedingungen zurückgegriffen werden. Die oben diskutierten Ergebnisse von Sensitivitätsanalysen zeigen jedoch in diesem Zusammenhang, dass auch für Kleinanlagen eine Standorterkundung empfehlenswert ist. Mit den dabei ermittelten, realistischen Standort-

parametern steigt die Zuverlässigkeit der Ergebnisse für die Standortauslegung und sinkt das Risiko einer Unter- oder Überdimensionierung der geplanten Anlage. Für größere Anlagen ist eine solche Standorterkundung unerlässlich, da die Investitions- und Betriebskosten großflächiger Systeme vergleichsweise hoch sind und Auslegungsfehler entsprechend große Auswirkungen haben können. Basierend auf dem genaueren Wissen zum Untergrund kann eine Vorauslegung erfolgen, die allerdings durch numerische Simulationen der Vorgänge im Untergrund im Zusammenspiel mit dem Erdwärmesondensystem gestützt werden sollten.

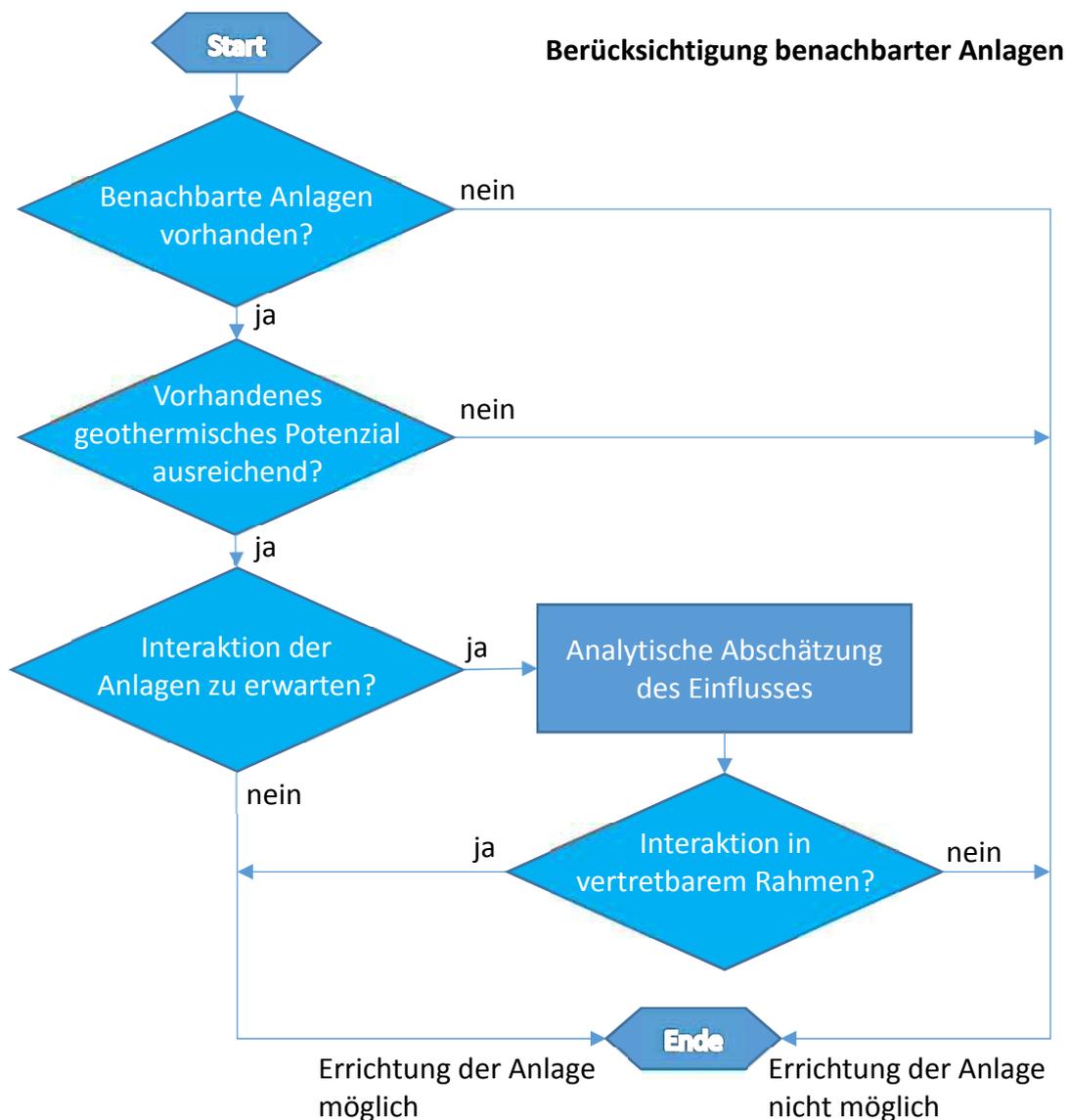


Abbildung II.1-22: Teil des im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS vorgeschlagenen Workflows zur Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zur Überprüfung einer möglichen Interaktion mit benachbarten Anlagen (aus Vortrag von Bucher zum SAGS-Anwenderworkshop, 2016)).

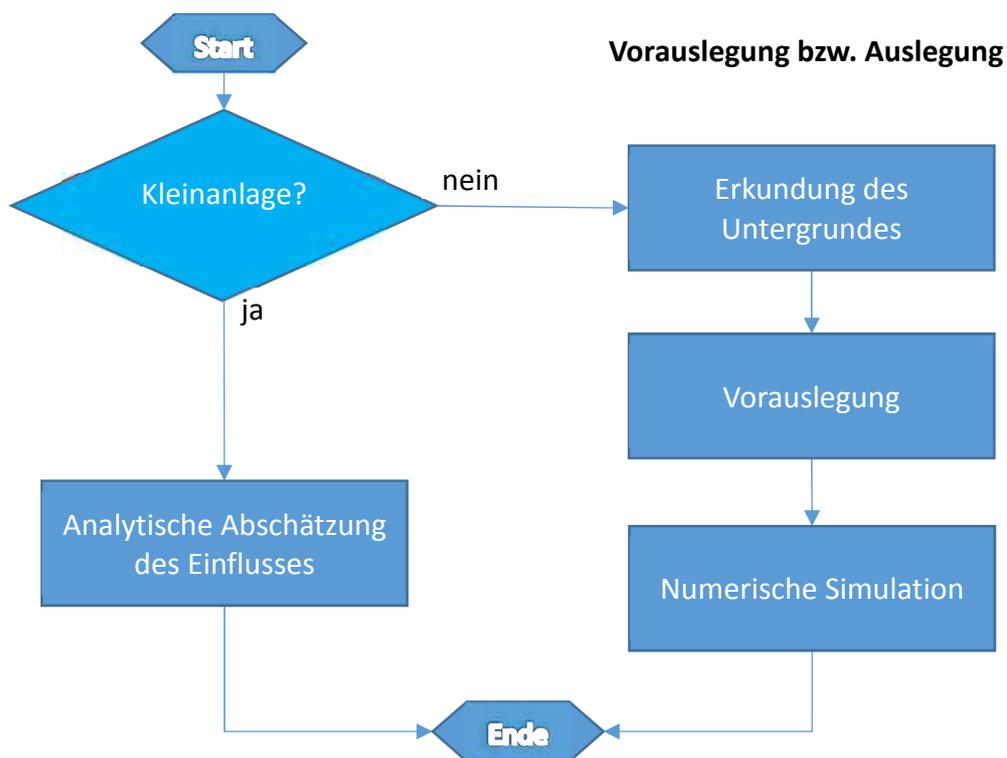


Abbildung II.1-23: Teil des im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS vorgeschlagenen Workflows zur Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zur Vorauslegung bzw. Auslegung der Anlage (aus Vortrag von Bucher zum SAGS-Anwenderworkshop, 2016)).

Die Planung und Auslegung von großflächigen EWS-Anlagen basiert wesentlich auf den oben genannten Daten. Für die Abarbeitung des vorgeschlagenen Workflows werden darüber hinaus weitere Informationen benötigt. Bezüglich der Verfügbarkeit unterscheiden sich die Daten wie folgt:

- **Verfügbare und aufbereitete Daten:** Die notwendigen Daten sind verfügbar und in der derzeit aufbereiteten Form nutzbar. Dies betrifft z. B. die Karten der Wasserschutzgebiete oder Grundwasserflurabstände.
- **Verfügbare, nicht aufbereitete Daten:** Die notwendigen Daten sind grundsätzlich verfügbar, sollten aber für eine zweckmäßige Nutzung aufbereitet werden. Dies betrifft z. B. Informationen zur Grundwasserströmung oder dem genutzten geothermischen Potenzial.
- **Nicht verfügbare Daten:** Diese Daten sind derzeit nicht oder nur eingeschränkt verfügbar und sollten erhoben werden. Dies betrifft vor allem das ungestörte, technisch nutzbare Potenzial. Die Datenbasis zur spezifischen Entzugsleistung sollte erweitert werden.

Da die Quantität und Qualität der Daten in den einzelnen Bundesländern erheblich schwankt, ist im Sinne einer bundesweit einheitlich Datenlage empfehlenswert, die notwendigen Datensätze zusammenzuführen und zu vereinheitlichen.

Als Ergebnis der Projektarbeiten im F&E-Vorhaben SAGS wird angeregt, das ungestörte, technisch nutzbare, oberflächennahe geothermische Potenzial als Parameter zur Unterstützung des Planungs- und Genehmigungsprozesses flächendeckend zu erheben. Die-

ser Parameter ist eine abgeleitete Größe und sollte als auf einer bestimmten Fläche pro Zeiteinheit nutzbare bzw. genutzte Energiemenge definiert werden. In diese Größe gehen die lokalen (hydro-)geologischen Verhältnisse sowie die Anlagenkonfiguration und die Betriebsweise der Anlage ein. Das technisch nutzbare Potenzial dient als Maß, wieviel Energie pro Jahr und Fläche nachhaltig und effizient im oberflächennahen geothermischen Raum genutzt werden kann. Die Differenz aus ungestörtem und vor Ort bereits genutztem geothermischem Potenzial liefert für einen Standort das lokal noch verfügbare Potenzial und ist damit ausschlaggebend für die Beurteilung eines Standorts. Es wäre daher sehr vorteilhaft, wenn diese Informationen über vorhandenes, interaktives Kartenmaterial abgerufen werden könnten.

Die spezifische Entzugsleistung sowie die Abstände zwischen den Sonden stellen sich als wichtige Parameter für die Auslegung der Anlagen heraus. Die derzeit verfügbaren Tabellenwerke und empirischen Gleichungen der spezifischen Entzugsleistungen unterliegen einigen Einschränkungen. Daher wird die Erweiterung der Datenbasis zur Verbesserung der Genauigkeit und Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen durch Studien auf Basis geeigneter numerischer Modelle empfohlen. Dabei sollte insbesondere der dynamische Einfluss der Wärmepumpe auf die thermische Last der Erdwärmesondenanlage ebenso wie verschiedene Wärmepumpenleistungen, die Betriebsart und die Sondenanzahl Eingang in die Berechnung finden.

II.1.9 Anwenderworkshop und Förderung von wissenschaftlichem Nachwuchs

Die oben genannte Studie zum Stand und zur möglichen Flexibilisierung regulatorischer Rahmenbedingungen für die Planung oberflächennaher geothermischer Systeme sowie weitere Projektergebnisse wurden im November 2016 auf einem Workshop beim Kooperationspartner UFZ vorgestellt und mit Wissenschaftlern, Wirtschafts- und kommunalen Interessenvertretern sowie Repräsentanten des Projektträgers diskutiert.

Impressum
 HERAUSGEBER Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
 Leipzig University of Applied Sciences
 Besucheradresse: Karl-Liebknecht-Strasse 134
 Postadresse: Postfach 30 11 66 | 04251 Leipzig
 Ansprechpartner: Frau Prof. Dr.-Ing. A. Bucher

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
 Leipzig University of Applied Sciences
HTWK
 Leipzig

Workshop
 BMBF-Projekt

HELMHOLTZ
 ZENTRUM FÜR
 UMWELTFORSCHUNG
 UFZ

„Entwicklung von Methoden zur
 standortoptimierten geotechnischen
 Auslegung großflächiger
 Geothermiesysteme – SAGS“

23. November 2016

Tagungsort:
 3-D-Visualisierungszentrum (Gebäude 7.2)
 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ,
 Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

Abbildung II.1-24: Einladung zum Anwenderworkshop für das F&E-Vorhaben SAGS.

Insbesondere die Anregungen zur Systematisierung und weiteren Gestaltung von Entwicklungs- und Planungsprozessen fanden großes Interesse bei den Teilnehmern. Besonders aus den Beiträgen der anwesenden Wirtschaftsvertreter wurde deutlich, dass es weniger die bestehenden Regularien selbst sind, die einer wesentlichen Überarbeitung bedürften, dass jedoch eine Systematisierung und Normierung von Verfahren bei der Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen anzuregen ist und die Instrumentarien für die Auslegungsprozesse einer Verbesserung bedürfen. Hier spielen insbesondere die eingehende Vorerkundung von geplanten Geothermiestandorten sowie die Nutzung numerischer Verfahren für die Analyse der komplexen, gekoppelten Untergrundprozesse und die Simulation von Trends des Anlagenbetriebs eine große Rolle.

Im Rahmen des Workshops wurde auch das Geothermietestfeld auf dem Gelände des UFZ besucht, auf dem zum Zeitpunkt des Anwenderworkshops Installationsarbeiten für die Durchführung der oben beschriebenen Thermal Response Tests stattfanden.

Die Diskussionen während des Anwenderworkshops, insbesondere die Reaktionen der anwesenden Wirtschaftsvertreter, bestätigten die erhebliche Relevanz der Projektaufgaben und -ergebnisse des F&E-Vorhabens SAGS für die praktische Auslegung von oberflächennahen Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen.

Im Rahmen der Qualifizierung wissenschaftlichen Nachwuchses waren mehrere wissenschaftliche Hilfskräfte in das Projekt eingebunden. Sie leisteten u. a. maßgebliche Beiträge zur Recherche über die Verfügbarkeit der für die Simulation notwendigen Daten. Außerdem wurde ein Parser für die Umwandlung von Geometriebeschreibungen im IGES-Datenformat in das Datenformat des OpenGeoSys-Datenexplorers entwickelt. Damit ist es möglich, Geometrien, die z. B. mit CAD-Programmen erstellt wurden, in entsprechende Teile einer OpenGeoSys-Eingabedatei umzuwandeln. Basierend auf den Forschungsergebnissen und Programmentwicklungen in SAGS, sowie den Ergebnissen der Thermal Response Tests, konnte eine Projektarbeit erstellt und erfolgreich verteidigt werden (Fenz, 2017). Eine kooperative Promotionsarbeit in Zusammenarbeit mit der technischen Universität Dresden befindet sich derzeit in der Phase der Terminfindung für die Verteidigung (Hein, 2017).

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendungen des BMBF flossen im Wesentlichen in Personalmittel (85,7 Prozent). Darüber hinaus nahmen Mittel für die Installation von drei Erdwärmesonden auf einem Testfeld des Kooperationspartners UFZ sowie die Durchführung und Wiederholung von Thermal Response Tests im Rahmen von Aufträgen an professionelle Unternehmen aus der Erdwärmebranche eine größere Position ein (13,3 Prozent). Die übrigen Mittel wurden für Dienstreisen der Projektbearbeiter sowie die Organisation eines Anwenderworkshops zum Ende des Vorhabens verwendet.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung, numerische Realisierung, Validierung und Nutzung integrativer Modellierungsinstrumentarien für die Simulation problemspezifischer, gekoppelter Prozesse leistet

einen wesentlichen methodischen Beitrag zur systematischen Analyse von Vorgängen im Untergrund bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen.

Arbeiten zur Weiterentwicklung der Softwareplattform OpenGeoSys waren notwendig, um die Simulationen thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse in den betrachteten geologischen Strukturen bei deren geothermischer Nutzung zuverlässig und effizient ausführen zu können. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass OpenGeoSys für die Modellierung von geowissenschaftlichen Prozessen an realen oberflächennahen geothermischen Standorten geeignet ist. In diesem Zusammenhang sind besonders auch die Forschungsarbeiten zur softwaretechnischen Integration effizienter Erdwärmesondenmodelle als notwendig und angemessen zu erwähnen, da in der aktuellen Auslegungspraxis gebräuchliche analytische oder halbanalytische Verfahren in der Regel wesentliche Prozesse vernachlässigen (z. B. Grundwasserströmung) und die komplexe Struktur mit Erdwärmesonde, Hinterfüllmaterial und heterogene Bodenschichtung nicht im Detail abbilden, komplexe 3D-Berechnungsmodelle andererseits gerade im Fall von Erdwärmesondensystemen nur durch Einsatz von Parallelrechentechnik in akzeptablen Zeiten zu bearbeiten sind. Letzteres übersteigt die Ressourcen und Kapazitäten von Planungsbüros im oberflächennahen Geothermiebereich, die in der Regel Personalzahlen im niedrigen zweistelligen Bereich aufweisen.

Die genaue Kenntnis über den Untergrundaufbau und die Untergrundparameter ist eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis der bei der Nutzung geothermischer Ressourcen im oberflächennahen Untergrund ablaufenden Prozesse. Eine entsprechende Untergrunderkundung und die damit einhergehende Entwicklung angepasster Erkundungsstrategien sind daher von zentraler Bedeutung für die Beurteilung der Effizienz und der ökologischen sowie ökonomischen Nachhaltigkeit bei der Bewirtschaftung des geologischen Raumes. Die im Rahmen des F&E-Vorhabens SAGS veranlassten Thermal Response Tests (TRT) lieferten in der Synthese mit vom Department Monitoring- und Erkundungstechnologien des Kooperationspartners UFZ durchgeführten Arbeiten auf der Basis hochauflösender Messverfahren einen wesentlichen Baustein für die Erkundung und damit auch die Planung geothermischer Standorte in urbanen Räumen. Die durchgeführten Studien, Labor- und Feldarbeiten sind dabei eine unverzichtbare Grundlage für die Parametrisierung und Validierung numerischer Modelle sowie für die Evaluierung verschiedener Monitoring- und Erkundungstechniken. Zudem besteht ein weiteres Arbeitsergebnis in der Bereitstellung eines praktikablen Planungs- und Erkundungsablaufs im Vorfeld einer intensiven thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes. Die Wiederholung der TRT am selben Standort unter Nutzung derselben Erdwärmesonden war angemessen, um bisher in der Literatur fehlende Hinweise zur Reproduzierbarkeit dieses etablierten Erkundungsverfahrens zur Erlangen und das Erstellen von aktuell ebenfalls nicht verfügbaren standardisierten Prozessbeschreibungen zur Kalibrierung der Erkundungstechnik für TRT zu unterstützen. Durch die Integration verbesserter Erdwärmesondenmodelle in das Softwareinstrumentarium und die Erhebung umfangreicher Parameterdaten konnten näher an die Realität angelehnte Modelle erstellt und Aussagen zur potenziellen Ausbreitung von Wärme- bzw. Kältefahnen im Untergrund verbessert werden. Dies trägt maßgeblich zum Verständnis der Wechselwirkungsprozesse in den geologischen Schichten und vor allem in Grundwasserleitern bei.

Basierend auf umfangreichen Recherchen und Szenarienstudien konnten als Schlussfolgerungen wichtige Anregungen für den Auslegungsprozess oberflächennaher Geother-

miesysteme formuliert werden. Dieses wesentliche Projektergebnis bot, u. a. auch durch die enge Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern aus dem Praxisbereich sowie mit weiteren Unternehmen und lokalen Behörden, außergewöhnlich gute Möglichkeiten zur Überführung der Ergebnisse in die Praxis. Dabei konnte das Transferpotenzial der untersuchten und entwickelten Methoden als zweckmäßiger Beitrag zur Anpassung der Entwicklungs-, Planungs- und Genehmigungstätigkeit relevanter Akteure gezeigt werden. Insofern sind auch die Bemühungen um die Formulierung von Anregungen für die Anpassung regulatoriver Rahmenbedingungen sowie die Durchführung eines Anwenderworkshops als notwendig und darüber hinaus als essenziell für das Projekt zu betrachten.

Mit den Arbeiten im F&E-Vorhaben SAGS konnte gezeigt werden, dass eine Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen auch im Rahmen großflächiger Systeme sicher, zuverlässig und nachhaltig erfolgen kann und welche Aspekte in einem dafür vorgesehenen Planungs- und Auslegungsverfahren wesentlich zu berücksichtigen sind. Aufgrund der Tatsache, dass die entwickelten Modellierungskonzepte Ausgangspunkt für nachfolgende Forschungsarbeiten mit großem Verwertungspotenzial bilden und die untersuchten Erkundungs- sowie Monitoringansätze bereits in die Analyse weiterer Demonstrationsprojekte einfließen, können die im Rahmen von SAGS durchgeführten Arbeiten als wissenschaftlich erfolgreich und essenziell eingeschätzt werden. Dafür spricht auch deren gute Übertragbarkeit auf andere Standorte und weitere Anwendungsbereiche. Die Arbeiten sind damit als notwendig und angemessen zu beurteilen, zumal sie durch zusätzliche Eigenmittel aller Kooperationspartner des Vorhabens insbesondere personell und infrastrukturell unterstützt wurden.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Entwicklung modellbasierter Methoden zur optimierten Auslegung großflächiger oberflächennaher Geothermiesysteme leistet einen wesentlichen methodischen Beitrag zur systematischen Analyse und Prognostizierung von Vorgängen bei Errichtung und Betrieb entsprechender geotechnologischer Anlagen. Damit wird das Vorhersagepotenzial von thermisch-hydraulisch-mechanischen Prozessen, die für die Realisierung klein- und großflächiger oberflächennaher Geothermieprojekte relevant sind, auf verschiedenen Zeit- und Längenskalen verbessert. In dem inhaltlich übergreifenden, konzeptionellen und methodischen Ansatz zur Modell- und Softwareentwicklung nehmen die erzielten Projektergebnisse eine führende wissenschaftliche Rolle bei der effizienten und nachhaltigen Planung und Bewirtschaftung der untersuchten geotechnischen Systeme ein und lassen praxisrelevante Ergebnisse der Prozesssimulation für industrielle Zwecke erwarten.

Das erarbeitete Modellierungsinstrumentarium für die unterschiedlichen physikalischen Prozesse wurde im Rahmen der internationalen, wissenschaftlichen Softwareplattform OpenGeoSys numerisch realisiert, deren Entwicklung vom SAGS-Kooperationspartner UFZ koordiniert wird. Diese Plattform nutzt ein Open-Source-Konzept, was einem großen Nutzerkreis den flexiblen Zugang zum Quellcode ermöglicht sowie die langfristige Integration weiterer Modelle und Methoden im Rahmen nachfolgender Forschungsvorhaben unterstützt. Wesentlicher Bestandteil des Plattformkonzepts von OpenGeoSys ist die Integration von Verfahren, Algorithmen und Softwarekomponenten zum Management (auch großer) Datenmengen von der Datenerhebung bis hin zur integrierten 3D-Ergebnisdarstellung heterogener Daten.

Ein umfassendes und tiefgründiges Verständnis des Langzeitverhaltens geologischer Systeme bei deren geothermischer Bewirtschaftung ist von zentraler Bedeutung für einen ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Bau und Betrieb entsprechender Anlagen. Bislang wurden Aussagen über das Langzeitverhalten aber häufig nur auf Grundlage von Laborexperimenten oder Fallstudien mit deutlich vereinfachter Modellparametrisierung getroffen. Da diese Ansätze die Realität mit ihren tatsächlichen zeitlichen und räumlichen Skalen nur bedingt widerspiegeln, müssen allein daraus abgeleitete Prognosen kritisch betrachtet werden. Als eines der Ergebnisse des Vorhabens konnte deutlich gezeigt werden, wie groß die Unsicherheiten einer Modellparametrisierung auf Grundlage von Literaturwerten in Bezug auf die Dimensionierung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes und der Abschätzung der Umweltauswirkungen in der Praxis tatsächlich sein können. Dies belegt deutlich, wie notwendig eine detaillierte, standortspezifische Vorerkundung sowie ein sorgfältiges Prozessmonitoring für eine Verbesserung der Modellqualität im Rahmen standort- und datenbasierter Modellparametrisierung und -validierung sind. Die damit verbundene Verbesserung der Zuverlässigkeit von Prognosesimulationen ist Grundvoraussetzung für eine realitätsnahe Abschätzung des thermischen Potenzials sowie der möglichen Umweltauswirkungen einer geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes. In diesem Sinne können die Projektergebnisse des F&E-Vorhabens SAGS wirtschaftliche Bedeutung erlangen, wenn die entwickelten Methoden Eingang in die Auslegungspraxis finden und die gewonnenen Erkenntnisse bei der Überarbeitung regulatoriver Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Hier ist zu erwarten, dass die grundlegende methodische Herangehensweise ausgebaut und vielfältig genutzt werden wird.

Neben dem unmittelbaren Nutzen für Forschungs- und Industriepartner sind die verallgemeinerbaren, vom Standort unabhängigen Ergebnisse und Lösungen des Projekts auch für öffentliche Behörden, Netzwerke und Transferstellen von Interesse, da sie die Möglichkeit bieten, Standortanalysen, Szenarienstudien sowie Sicherheitseinschätzungen mit großer Praxisrelevanz für die Standortbeurteilung und Genehmigungsverfahren durchzuführen. Weiterhin können Projektergebnisse (Methoden, Modelle, Softwarekomponenten) als Grundlage für standardisierte Abläufe bei der Charakterisierung, Dimensionierung und Genehmigung der betrachteten sowie verwandter geotechnischer Problemstellungen dienen (z. B. geologische Speicherung von Energie und Energieträgern, geologische CO₂-Speicherung, Endlagerung radioaktiver Abfälle), da die grundlegenden kontinuumsmechanischen und konstitutiven Modelle sowie die notwendige Softwarearchitektur ähnlich sind.

Der wissenschaftliche Erfolg des Vorhabens wurde maßgeblich durch die erfolgte und weiterhin geplante Veröffentlichung von Projektansätzen und -ergebnissen in anerkannten, internationalen Fachzeitschriften und die Präsentation auf nationalen und internationalen Konferenzen bestimmt (siehe Unterabschnitt II.6 dieses Berichts). Diese Aktivitäten konnten gemeinsam mit den Kooperationspartnern des F&E-Vorhabens SAGS realisiert werden. Mit der Publikation und Präsentation von Projektergebnissen wurde der wissenschaftliche Kenntnisstand zur allgemeinen Methodik und zu spezifischen Fragestellungen der Modellierung von Nutzungsszenarien oberflächennaher geothermischer Ressourcen sowie anderer geotechnischer Anwendungen erweitert. Neben der Veröffentlichung in wissenschaftlichen Publikationen sind die Projektergebnisse geeignet, Grundlage für die Anpassung existierender Leitfäden, Richtlinien und Handlungsempfehlungen sowie von spezifischen Nachweisregelungen im Rahmen der Gesetzgebung zur Errichtung großflä-

chiger oberflächennaher Geothermiesysteme zu bilden (vgl. die im Rahmen des Vorhabens SAGS erstellte Studie zur aktuellen Auslegungspraxis inklusive von Anregungen zu deren Anpassung).

Vom Zuwendungsempfänger und den Kooperationspartnern des F&E-Vorhabens SAGS wurden keine fremden Schutzrechtsanmeldungen in Anspruch genommen. Eine Anmeldung eigener Schutzrechte für die entwickelten Modelle, Strategien, Methoden und Verfahren wurde nicht vorgenommen und ist auch weiterhin nicht geplant.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Thematik der Modellierung und numerischen Simulation gekoppelter Prozesse bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen ist von großer Aktualität. Eine zunehmende Anzahl von wissenschaftlichen Publikationen und spezialisierten Symposien auf Fachkonferenzen (z. B. Jahrestagungen der European Geosciences Union (EGU) und der American Geophysical Union (AGU), verschiedene Konferenzaktivitäten der European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS)) und etablierte Tagungsreihen mit jährlich stattfindenden Veranstaltungen in Deutschland (z. B. Der Geothermiekongress, GeoTHERM Offenburg, geoENERGIE-Tag Freiberg) legen Zeugnis davon ab. Für einen zusammenfassenden Überblick zu Technologien der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen, der Prozessmodellierung für geothermische Problemstellungen in porösen Medien und die Gestaltung von Modellen zur Simulation von Erdwärmesonden wird z. B. auf Diersch (2014), Luo (2014) und Stauffer et al. (2014) verwiesen. Bezüglich der spezifischen Forschungsarbeiten im F&E-Vorhaben SAGS sind Erkenntnisse von besonderem Interesse, die auf dem Gebiet der Modellierung von Erdwärmesonden im System Boden-Erdwärmesonden-Wärmepumpe, numerischer Sensitivitätsanalysen und Szenarienstudien oberflächennaher geothermischer Systeme sowie der Modellierung potenzieller Gefrierprozesse beim Betrieb geothermischer Anlagen publiziert werden. Aus dem hier nicht vollständig darzulegenden großen Literaturangebot sollen nachfolgend einige repräsentative Quellen aufgeführt werden, in denen diese Aspekte während der Projektlaufzeit behandelt wurden.

Fragen der zweckmäßigen Entwicklung von Modellen zur Integration von Erdwärmesonden in Simulationen von Untergrundprozessen gehören zu den wesentlichsten Aspekten der Gestaltung von Modellierungsinstrumentarien für die Simulation oberflächennaher Geothermieanlagen. Sie sollen die realen Bedingungen so genau wie möglich abbilden, um die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse zu erhöhen, jedoch so wenig wie möglich numerischen Aufwand verursachen, um die Planungsprozesse effizient zu gestalten. Dieser Zwiespalt wird besonders an den klassischerweise miteinander konkurrierenden Ansätzen der Entwicklung analytischer Modelle und der Gestaltung vollständig numerischer Modelle deutlich, die auch aktuell von verschiedenen Forschergruppen favorisiert werden. Analytische Lösungen zur Ermittlung der Temperaturfelder in der Umgebung von Erdwärmesonden werden beispielsweise in De Rosa et al. (2015 – gekoppelt mit einem Wärmepumpenmodell in dem kommerziellen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS), Stauffer et al. (2014 – ohne Berücksichtigung von Grundwasserströmungen) und Hecht-Méndez et al. (2013 – mit Berücksichtigung von Grundwasserströmungen) vorgestellt. Beier (2014) sowie Beier et al. (2014) entwickeln semianalytische Modellansätze auf der Basis von Laplace-Transformationen für Erdwärmesonden vom U-Rohr-Typ und vom

Koaxialtyp. Unter Annahme homogener Bodenverhältnisse und konstanter Wärmezugsraten können diese Modelle transiente Temperaturprofile innerhalb einer Erdwärmesonde und in deren Umgebung abbilden. Ein Überblick zu analytischen Erdwärmesondenmodellen, die, verglichen mit numerischen Ansätzen, in der Regel auf restriktiveren Vereinfachungen und Annahmen basieren, jedoch deutliche Vorteile bezüglich des Simulationsaufwands besitzen, ist in Li und Lai (2015) zu finden. Numerische Erdwärmesondenmodelle, bei denen die Sonde, das Hinterfüllmaterial und die umgebenden Bodenschichten vollständig beispielsweise mit einem 3D-Finite-Element-Gitter abgebildet werden, haben das Potenzial, die realen Systemcharakteristika sehr genau zu erfassen, benötigen allerdings signifikante Rechnerressourcen. Bei großflächigen oberflächennahen Geothermiesystemen kann in diesem Fall die Nutzung von Verfahren des High Performance Computing (Parallelrechnerkapazitäten) unerlässlich werden, was von geothermischen Planungsbüros in der Regel nicht wirtschaftlich darzustellen ist. Wissenschaftlich interessant sind insbesondere Vergleiche zwischen diesen und analytischen Verfahren, aus denen Hinweise für die Potenziale und Limitierungen von problemreduzierten Ansätzen gewonnen werden können. Während des Projektverlaufs wurden Forschungsarbeiten zu numerischen Erdwärmesondenmodellen u. a. von Boockmeyer und Bauer (2014), Perego et al. (2016) sowie Rees und He (2013) unter Nutzung unterschiedlicher kommerzieller und wissenschaftlicher Softwaresysteme (z. B. TOUGH-Programmfamilie, OpenGeoSys) vorgestellt. Neuere Arbeiten zum Doppel-Kontinuum-Ansatz für die Modellierung des Systems Untergrund/Hinterfüllmaterial/Erdwärmesonde (vgl. Abschnitt II.1 dieses Sachberichts) veröffentlichten beispielsweise Casasso und Sethi (2014), Diersch (2014), Koenig und Helmke (2014) sowie Luo et al. (2014).

In den vergangenen Jahren haben sich zahlreiche Autoren in umfangreichen Sensitivitätsanalysen und Szenarienstudien mit der Untersuchung verschiedener Einflussparameter auf die Effizienz und das Langzeitverhalten beim Betrieb von Erdwärmesonden bzw. Erdwärmesondensystemen befasst. Ihre numerischen Analysen zu Prozessen in großflächigen oberflächennahen Geothermiesystemen diskutieren z. B. Beck et al. (2013) und Gultekin et al. (2016). Der Untersuchung des Einflusses von Grundwasserströmungen auf das Temperaturfeld im oberflächennahen Untergrund bei dessen geothermischer Nutzung und auf die Effizienz von Erdwärmesonden bzw. -feldern widmeten Angelotti et al. (2014), Rivera et al. (2015) sowie Zhang et al. (2015) und andere Autoren ein besonderes Augenmerk. Dabei unterstrichen Rivera et al. (2015) zusätzlich die Notwendigkeit der Einbeziehung des Verlaufs der Oberflächentemperaturen in die Simulation des Betriebs von Erdwärmesonden, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Zur realistischen Abbildung der Lastseite oberflächennaher geothermischer Systeme stellen Capozza et al. (2015), Casasso et al. (2014), De Rosa et al. (2015) und Retkowski et al. (2015) Simulationsmodelle vor, bei denen Erdwärmesonden- mit Wärmepumpenmodellen gekoppelt sind. Ebenfalls in Verbindung mit realistischen Prognosen der thermischen Gebäudeversorgung aus oberflächennahen geothermischen Ressourcen sind die Arbeiten von Dai et al. (2016) und Lee (2016) zur Untersuchung der Reaktion von Erdwärmesonden auf rasche Änderungen der thermischen Randbedingungen innerhalb kurzer Zeiträume zu sehen. Im Rahmen übergeordneter Analysen der geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes wiesen Epting et al. (2013) sowie Zhang et al. (2014) das große Potenzial entsprechender geothermischer Ressourcen zur Versorgung urbaner Räume in verschiedenen europäischen Regionen nach (Basel – CH, Westminster – GB). Stauffer et al. (2014) verglichen regulative Rahmenbedingungen für Errichtung und Be-

trieb oberflächennaher Geothermieanlagen in Deutschland, Österreich, der Schweiz und Großbritannien.

Gefriervorgänge des Grundwassers in der Nähe von Erdwärmesonden werden beobachtet, wenn die Bodentemperatur wegen eines kontinuierlichen Wärmeentzugs ohne ausreichende Regenerationsmöglichkeiten des Bodens und/oder wegen einer unzweckmäßigen Auslegung des Systems Erdwärmesonde-Wärmepumpe unter den Gefrierpunkt von Wasser fällt. Dadurch werden die Verteilung der Bodentemperatur, die hydraulischen Bodenparameter (z. P. hydraulische Durchlässigkeit) sowie die Effizienz der Wärmepumpenanlage stark beeinflusst. In extremen Fällen kann es zu mechanischen Schäden an der Erdwärmesonde, dem Hinterfüllmaterial und durch Bodenhebungen auch an umgebenden Einrichtungen kommen. Die wissenschaftliche Herausforderung bei der Modellierung von Gefrierprozessen besteht in den zu berücksichtigenden Phasenwechseln von flüssig zu fest (beim Gefrieren) und von fest zu flüssig (beim Tauen). Ausgewählte Arbeitsgruppen widmen sich weltweit in den vergangenen Jahren zunehmend dieser Thematik. So stellen beispielsweise Zhou und Meschke (2013) ein Modell zur numerischen Analyse thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse bei Phasenwechseln vor, das insbesondere auf die Betrachtung von Gefriervorgängen in gesättigten porösen Medien mit Anwendungen in der Geotechnik (z. B. Bau unterirdischer Verkehrswege) zugeschnitten ist. Kern ist dabei die Entwicklung eines Dreiphasenmodells für die physikalische Beschreibung der Eiskristallisation. Analoge Modellentwicklungen mit einer spezifischen Fokussierung auf Anwendungen in der oberflächennahen Geothermie werden von Erol und François (2016), Wang et al. (2013) sowie Yang et al. (2015) diskutiert. Na und Sun (2017) vergleichen in ihrer Arbeit Modelle zur Abbildung von Gefrierprozessen bei großen Deformationen mit Modellen, die auf der Annahme kleiner Deformationen beruhen. In Zusammenhang mit der Modellentwicklung untersuchten Wang et al. (2013) auch experimentell die Rohrdeformationen von Erdwärmesonden während der Gefriervorgänge und leisteten somit ebenso wie Anbergen et al. (2014) und Lai et al. (2014) einen Beitrag zum Vergleich von Berechnungsergebnissen und experimentellen Daten. Der Modell- und Softwarevalidierung dient auch der so genannte CIF-Test (capillary suction, internal damage and freeze thaw test) als Benchmark, der von Rùhaak et al. (2015) zum Vergleich mit eigenen Berechnungsergebnissen herangezogen wird. Um nicht nur Gefrierprozesse selbst sondern auch deren System- und Umweltwirkungen analysieren zu können, integrieren Koniorczyk et al. (2015) ein lineares Schädigungsmodell in das komplexe Modellierungsinstrumentarium.

Korrespondierend mit der Modellentwicklung verbessern sich auch die Möglichkeiten und Kapazitäten kommerzieller und wissenschaftlicher Software, die im Untergrund ablaufenden Prozesse bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen numerisch zu simulieren. Für die Auslegungspraxis kommen dabei im Wesentlichen kommerzielle Programmsysteme zum Einsatz, die kontinuierlich an den aktuellen Stand der Forschung angepasst werden. Zum Standard der Ausrüstung geothermischer Planungsunternehmen gehört dabei insbesondere die marktübliche Fachsoftware EED (Earth Energy Designer; Anbieter: Blocon, Lund, Schweden), EWS (Anbieter: Huber Energietechnik AG, Zürich, Schweiz) und/oder FEFLOW (Anbieter: DHI Group, Hørsholm, Dänemark). Während EED und EWS auf analytischen Verfahren basieren und bezüglich der Berücksichtigung realer Standortcharakteristika (z. B. Grundwasserströmungen) mit teils stark vereinfachenden Annahmen operieren, ist FEFLOW ein 3D-Finite-Element-Programm zur Simulation von Wärme-, Fluid- und Massetransportprozessen. Eine intrinsische Kopplung zu mechani-

schen Deformationsprozessen ist in den genannten Softwaresystemen nicht integriert. Damit sind diese Simulationsinstrumentarien auf die Modellierung einer Untermenge des Gesamtkomplexes der gekoppelten physikalischen und chemischen Prozesse fokussiert, die bei der geothermischen Bewirtschaftung des Untergrundes ablaufen. Möglichkeiten zur Programmerweiterung für die umfassende Behandlung unterschiedlicher, miteinander interagierender Phänomene sind dabei stark eingeschränkt. Diese sind meist nur den Entwicklern, nicht aber den Nutzern zugänglich und in der Regel wird die Simulation gekoppelter Prozesse durch Kopplung unterschiedlicher Programme einschließlich des ineffizienten Datenaustauschs über Dateien realisiert. Das im F&E-Vorhaben SAGS genutzte Softwareprojekt OpenGeoSys verfolgt ein Open-Source-Konzept der integrativen Softwareentwicklung. Dieses gewährleistet eine große Effizienz und Flexibilität. Trotz eingeschränkter Erweiterungspotenziale stellen die oben genannten Simulatoren bewährte, praktikable und anerkannte Instrumentarien zur Simulation von relevanten Prozessen bei der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen dar.

Durch Auswertung der einschlägigen Fachliteratur und Diskussionen mit anerkannten Wissenschaftlern z. B. bei Konferenzbesuchen sowie erfahrenen Praxispartnern floss der aktuelle internationale Stand von Methoden und Ergebnissen der betrachteten Arbeitsgebiete permanent in die eigenen Analysen ein. Die Ziele und der entsprechende Ablauf des Forschungsvorhabens SAGS wurden durch Veröffentlichungen von dritter Seite insgesamt nicht berührt. Vielmehr zeigte sich, dass die erarbeiteten Strategien, Verfahren, Modelle, Algorithmen und Softwareprodukte dem wissenschaftlichen Standard in vollem Umfang entsprechen und ihn in wesentlichen Teilen mit bestimmen (z. B. numerische Verfahren für die Simulation von thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozessen im Untergrund, integrative Softwarekonzepte für gekoppelte Problemstellungen, Entwicklung und numerische Umsetzung effizienter Erdwärmesondenmodelle mit großer Praxisrelevanz).

II.6 Referenzen sowie erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse des Zuwendungsempfängers

II.6.1 Referenzen

Al-Khoury R, Bonnier P (2006) Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part ii: Transient. Int J Numer Methods Eng 67(5):725-745

Al-Khoury R, Bonnier P, Brinkgreve R (2005) Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part i: Steady state. Int J Numer Methods Eng 63(7):988-1013

Al-Khoury R, Kölbl T, Schramedei R (2010) Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers. Comput Geosci 36(10):1301-1315

Anbergen H, Rühaak W, Frank J et al (2014) Numerical simulation of a freeze-thaw-testing procedure for borehole heat exchanger grouts. Canadian Geotech J 52:1-14

Angelotti A, Alberti L, La Licata I et al (2014) Energy performance and thermal impact of a borehole heat exchanger in a sandy aquifer: influence of the groundwater velocity. Energy Convers Manag 77:700-708

- Bauer D (2011) Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern. Dissertation, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart
- Bauer D, Heidemann W, Müller-Steinhagen H et al (2009) Modelling and simulation of groundwater influence on borehole thermal energy stores. In: Proceedings of the 11th Conference on Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability (Eff-stock), Stockholm, 2009
- Beck M, Bayer P, de Paly M et al (2013) Geometric arrangement and operation mode adjustment in low enthalpy geothermal borehole fields for heating. *Energy* 49(1):434-443
- Beier RA (2014) Transient heat transfer in a u-tube borehole heat exchanger. *Appl Therm Eng* 62(1):256-266
- Beier RA, Acuña J, Mogensen P et al (2014) Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger. *Geothermics* 51:470-482
- Bockelmann F, Fisch NM, Kipry H (2011) Erdwärme für Bürogebäude nutzen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Bödvarsson GS, Tsang CF (1982) Injection and thermal breakthrough in fractured geothermal reservoirs. *J Geophys Res* 87(B2):1031-1048
- Boockmeyer A, Bauer S (2014) High-temperature heat storage in geological media: high-resolution simulation of near-borehole processes. *Géotech Lett* 4(April–June):151-156
- Capozza A, Zarrella A, De Carli M (2015) Long-term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters. *Energy Build* 93:50-64
- Casasso A, Sethi R (2014) Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: a sensitivity analysis. *Renew Energy* 62:737-746
- Dai LH, Shang Y, Li XL et al (2016) Analysis on the transient heat transfer process inside and outside the borehole for a vertical U-tube ground heat exchanger under short-term heat storage. *Renew Energy* 87:1121-1129
- De Rosa M, Ruiz-Calvo F, Corberan JM et al (2015) A novel TRNSYS type for short-term borehole heat exchanger simulation: B2G model. *Energy Convers Manag* 100:347-357
- Diersch H-J (2014) FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer
- Diersch H-J, Bauer D, Heidemann W et al (2011a) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals. *Comput Geosci* 37(8):1122-1135
- Diersch H-J, Bauer D, Heidemann W et al (2011b) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Comp Geosci* 37:1136-1147
- Dietrich P, Leven C (2006) Direct Push-Technologies. In: Kirsch R (ed) *Groundwater Geophysics*, Springer, Berlin, p 321-340
- Doughty C, Hellström G, Tsang CF et al (1982) A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system. *Water Resour Res* 8(3):571-587
- Eklöf C, Gehlin S (1996) A Mobile Equipment for Thermal Response Test – Testing and Evaluation. Master thesis: Department of Environmental Planning and Design. Lulea University of Technology, Sweden

Epting J, Händel F, Huggenberger P (2013) Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrol Earth Syst Sci* 17(5):1851-1869

Erdwärmesonden (2011). Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden

Erol S, François B (2016) Freeze damage of grouting materials for borehole heat exchanger: Experimental and analytical evaluations. *Geomech Energy Environ* 5:29-41

Eskilson P (1986) Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden

Eugster W (1991) Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. Dissertation, ETH Zürich Nr. 9524

Gehlin S (2002) Thermal response test method development and evaluation. PhD thesis, Lulea Technical University

Geothermisches Kartenwerk im Maßstab 1 : 50.000 – GTK 50 (2009) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden

Görke U-J, Kaiser S, Bucher A et al (2012) A consistent mixed finite element formulation for hydro-mechanical processes in saturated porous media at large strains based on a generalized material description. *Eur J Mech A Solids* 32:88-102

Gultekin A, Aydin M, Sisman A (2016) Thermal performance analysis of multiple borehole heat exchangers. *Energy Convers Manage* 122:544-551

Hecht-Méndez J, de Paly M, Beck M et al (2013) Optimization of energy extraction for vertical closed-loop geothermal systems considering groundwater flow. *Energy Convers Manage* 66:1-10

Huber A, Schuler O (1997) Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFFE), Bern. ENET-Nr. 9658907/1

Koenig AA, Helmke MF (2014) Development of a thermal resistance model to evaluate wellbore heat exchange efficiency. *Int J Energy Environ* 5(3):297-304

Koenigsdorff R (2011) Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Kolditz O, Bauer S, Bilke L et al (2012) OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environ Earth Sci* 67(2):589-599

Koniorczyk M, Gawin D, Schrefler BA (2015) Modeling evolution of frost damage in fully saturated porous materials exposed to variable hydro-thermal conditions. *Comput Methods Appl Mech Eng* 297:38-61

Lai Y, Pei W, Zhang M et al (2014) Study on theory model of hydro-thermal–mechanical interaction process in saturated freezing silty soil. *Int J Heat Mass Transfer* 78:805-819

Lee CK (2016) A modified three-dimensional numerical model for predicting the short-time-step performance of borehole ground heat exchangers. *Renew Energy* 87:618-627

Leitfaden Erdwärme (2011) Bundesverband Wärmepumpe e.V., Informationen und Tipps für Einsteiger

- Li M, Lai ACK (2015) Review of analytical Models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales. *Appl Energy* 151:171-191
- Luo J (2014) Experimental measurements and numerical modeling of a ground source heat pump system. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Luo J, Rohn J, Bayer M et al (2014) Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface. *Appl Energy* 123:55-65
- Molson JW, Frind EO, Palmer CD (1992) Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 2. Model development, validation, and application. *Water Resour Res* 28(10):2857-2867
- Na S, Sun W (2017) Computational thermo-hydro-mechanics for multiphase freezing and thawing porous media in the finite deformation range. *Comput Methods Appl Mech Eng* 318:667-700
- Panteleit DB, Reichling DJ (2006) Automatisierte Attribuierung von Bohrungsdaten mit Parametern zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen. *Grundwasser* 11:19-26
- Perego R, Guandalini R, Fumagalli L et al (2016) Sustainability evaluation of a medium scale GSHP system in a layered alluvial setting using 3D modeling suite. *Geothermics* 59:14-26
- Pruess K (2004) The TOUGH codes – a family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone J* 3:738-746
- Rees SJ, He M (2013) A three-dimensional numerical model of borehole heat exchanger heat transfer and fluid flow. *Geothermics* 46:1-13
- Retkowski W, Ziefle G, Thoming J (2015) Evaluation of different heat extraction strategies for shallow vertical ground-source heat pump systems. *Appl Energy* 149:259-271
- Rivera JA, Blum P, Bayer P (2015) Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers. *Appl Energy* 146:421-433
- Rühaak W, Anbergen H, Grenier C et al (2015) Benchmarking numerical freeze/thaw models. *Energy Procedia* 76:301-310
- Rutqvist J (2011) Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. *Comp Geosci* 37:739-750
- Sanner B, Reuss M, Mands E (2000) Thermal response test – Experiences in Germany. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Thermal Energy Storage (Terrastock 2000)*, vol I, Stuttgart, pp 177-182
- Sauer M, Mands E, Sanner B et al (2007) Wirtschaftliche Aspekte beim Einsatz von Geothermal-Response-Tests. In: *Abstracts of "Der Geothermiekongress 2007"*, Bochum, 2007
- Schelenz S, Vienken T, Shao H et al (2017) On the importance of a coordinated site characterization for the sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface in urban areas: a case study. *Environ Earth Sci* 76(2):art. 73
- Seibertz KSO, Chirila MA, Bumberger J et al (2016) Development of in-aquifer heat testing for high resolution subsurface thermal-storage capability characterisation. *J Hydrol* 534:113-123
- Schlumberger (2007) *Eclipse Technical Description*

Stauffer F, Bayer P, Blum P et al (2014) Thermal use of shallow groundwater. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC

Stober I, Bucher K (2012) Geothermie. Springer, Berlin, Heidelberg

TRNSYS (1995) TRNSYS - A transient simulation program, Vers. 14.2. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison

Tsang CF, Buscheck T, Doughty C (1981) Aquifer thermal energy storage: a numerical simulation of Auburn University field experiments. *Water Resour Res* 17(3):647-658.

VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie (2008) VBI Schriftenreihe, Bd. 18

VDI 4640 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) [Hrsg.] (12/2000, 09/2001 & 06/2001) Thermische Nutzung des Untergrundes - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte & Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Richtlinie 4640 Blätter 1, 2 & 3, Düsseldorf

Vienken T (2017) Development of strategies for the sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface. Kumulative Habilitationsschrift, TU Dresden (in preparation)

Wang Y, Gao Q, Zhu X et al (2013) Experimental study on interaction between soil and ground heat exchange pipe at low temperature. *Appl Therm Eng* 60(1):137-144

Yang W, Kong L, Chen Y (2015) Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers. *Appl Therm Eng* 75:259-269

Zhang Y, Soga K, Choudhary R (2014) Shallow geothermal energy application with GSHPs at city scale: study on the city of Westminster. *Geotech Lett* 4 (2):125-131

Zhang L, Zhao L, Yang L et al (2015) Analyses on soil temperature responses to intermittent heat rejection from BHEs in soils with groundwater advection. *Energy Build* 107:355-365

Zhou M, Meschke G (2013) A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 37(18):3173-3193.

II.6.2 Erfolgte und geplante Publikationen in Fachzeitschriften

Hein P, Kolditz O, Görke U-J et al (2016a) A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl Therm Eng* 100:421-433

Hein P, Shao H, Kolditz O, Bucher A (2016b) Numerische Modellierung und Effizienzanalyse von Erdwärmesonden. *Geothermische Energie* 83:4-7

Hein P, Zhu K, Bucher A et al (2016c) Quantification of exploitable shallow geothermal energy by using borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Energy Conv Manag* 127:80-89

Hein P, Zhu K, Bucher A et al (2017a) Technically exploitable geothermal energy by using Borehole Heat Exchangers: A revisit of the Cologne case. (submitted to *Geothermal Energy*)

Zheng T, Shao H, Schelenz S et al (2016) Efficiency and economic analysis of utilizing latent heat from groundwater freezing in the context of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl Therm Eng* 105:314-326

II.6.3 Erfolgte und geplante Bücher / Buchkapitel

Naumov. D et. al. (2016a): OGS-6 Overview. In: Kolditz O, Görke U-J, Shao H et al (eds) Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking – benchmarking initiatives, Springer, p 223-227

Shao H, Hein, P, Sachse A, Kolditz O (eds) (2016a) Geoenery modeling II: shallow geothermal systems. Series: SpringerBriefs in Energy. Springer International Publishing

Shao H, Zheng T, Hein P et al (2016b) Thermal processes. In: Kolditz O, Görke U-J, Shao H et al (eds) Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking – benchmarking initiatives, Springer, p 15-32

Zheng T, Miao, X-Y, Naumov. D et. al. (2018): Thermo-hydro-mechanical freezing benchmark (CIF test). In: Kolditz O, Shao H, Nagel T et al (eds) Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking – from benchmarking to tutoring, Springer (in press)

II.6.4 Erfolgte und geplante Tagungsbeiträge mit Abstracts

Bucher A, Hein P, Vienken T et al (2017) Shallow geothermal energy systems: current technical design and suggestions for its improvement. In: Abstracts of the UFZ Energy-Days 2017, UFZ, Leipzig, 15-16 March 2017

Kolditz O, Watanabe N, Görke U-J et al (2014) Numerical modelling of shallow and deep geothermal systems. In: Tagungsband 43. Geomechanik-Kolloquium, Freiberg, 14. November 2014, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2014-2, p 173-181

Naumov D, Watanabe N, Bilke L et al (2016b) Implementation of a modular software system for multiphysical processes in porous media. Meeting Organizer Copernicus Office Browser, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7345.pdf>. Accessed 8 May 2017

Shao H, Hein P, Görke U-J et al (2016c) Impact factors on the long-term sustainability of Borehole Heat Exchanger coupled Ground Source Heat Pump System. Meeting Organizer Copernicus Office Browser, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-5730.pdf>. Accessed 8 May 2017

Shao H, Hein P, Schelenz S et al (2016d) Impact factors on the long-term economic efficiency and environmental sustainability of borehole heat exchanger systems for the use of shallow geothermal resources. In: Abstracts of the UFZ EnergyDays 2016, UFZ, Leipzig, 22-23 March 2016

Shao H, Schelenz S, Kist N et al (2014) Modelling the interaction of multiple borehole heat exchangers in shallow geothermal fields. AGU Abstract Browser. <http://abstractsearch.agu.org/meetings/2014/FM/H23A-0853>. Accessed 22 June 2017

Zheng T, Miao X-Y, Naumov D et al (2017a) A thermo-hydro-mechanical finite element model of freezing in porous media – thermo-mechanically consistent formulation and application to ground source heat pumps. Browser of the VII. International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering. COUPLED PROBLEMS 2017. <http://congress.cimne.com/coupled2017/frontal/Doc/Ebook2017.pdf>. Accessed 17 July 2017

Zheng T, Miao X-Y, Naumov D et al (2017b) A thermo-hydro-mechanical model of frost damage in saturated soils for geothermal applications. In: Abstracts of the Browser of the

15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Wuhan, China, 19-23 October 2017 (submitted)

II.6.5 Erfolgte und geplante studentische und Abschlussarbeiten mit Projektbezug

Fenz A (2017) Numerische Simulation von Thermal Responses Tests mit Analyse der Ergebnisse. Projektarbeit Master, HTWK Leipzig

Hein P (2017) On the efficient and sustainable utilization of shallow geothermal energy by using borehole heat exchangers. Dissertation, Technische Universität Dresden

II.6.6 Erfolgte und geplante sonstige Publikationen mit Projektbezug

Hein P, Shao H, Görke U-J et al (eds) (2017b) Praxis und Datenlage zur Standortbewertung, Planung und Auslegung von Erdwärmesonden(systemen) gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen – Studie und Anregungen des Forschungsprojekts SAGS. UFZ-Bericht (Anhang zu diesem Bericht)

Studie und Anregungen des Forschungsprojekts
„Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen
Auslegung großflächiger Geothermiesysteme - SAGS“

Praxis und Datenlage zur Standortbewertung, Planung und Auslegung von Erdwärme- sonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen

Philipp Hein¹, Haibing Shao^{2,3}, Uwe-Jens Görke³,
Thomas Vienken³, Olaf Kolditz^{3,5}, Anke Bucher¹

¹Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

²TU Bergakademie Freiberg

³Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ

⁵Technische Universität Dresden

Leipzig, November 2016

Inhalt

A1	Einleitung	76
A2	Stand der aktuellen Auslegungspraxis	78
A2.1	Leitfäden und Merkblätter der Länder	79
A2.2	Ergänzende Materialien der Länder	79
A2.3	VDI-Richtlinie 4640	79
A2.4	Analyse der aktuellen Praxis	82
A3	Datenlage	83
A3.1	Datenbestand in den Bundesländern	84
A3.2	Wasserschutzgebiete	85
A3.3	Geologie	85
A3.4	Thermische Untergrundparameter	86
A3.5	Grundwasser	87
A3.5.1	Hydraulische Durchlässigkeit	87
A3.5.2	Grundwasserstand und hydraulischer Gradient	88
A3.6	Oberflächentemperatur und geothermischer Gradient	88
A3.7	Oberflächennahes geothermisches Potenzial	88
A3.8	Spezifische Entzugsleistung	89
A4	Workflow zur Standortbewertung, Planung und Auslegung	90
A4.1	Überprüfung der Voraussetzungen	91
A4.1.1	Wasserschutzgebiete	92
A4.1.2	Eignung des Untergrundes	92
A4.1.3	Ungestörtes, technisch nutzbares geothermisches Potenzial	92
A4.2	Berücksichtigung benachbarter Anlagen	93
A4.2.1	Technisch genutztes und vorhandenes geothermisches Potenzial ..	93
A4.2.2	Überprüfung möglicher Interaktionen	93
A4.3	Auslegung/Planung	93
A4.4	Numerische Simulation	94
A4.4.1	Modellgebiet und Netz	95
A4.4.2	Parametrisierung	97
A4.4.3	Anfangs- und Randbedingungen	98
A4.4.4	Wärmepumpe und EWS-Felder	98
A4.4.5	Sonstiges	99
A4.4.6	Ergebnisauswertung und -interpretation	99

A5	Zusammenführung, Vereinheitlichung und Aufbereitung der Daten zur oberflächennahen Geothermie	100
A5.1	Geologie und thermische Untergrundparameter	101
A5.2	Grundwasser	101
A5.3	Genutztes geothermisches Potenzial	102
A5.4	Oberflächentemperatur und geothermischer Gradient	102
A6	Erhebung neuer Daten	102
A6.1	Ungestörtes, technisch nutzbares geothermisches Potenzial	103
A6.2	Tatsächlich verfügbares geothermisches Potenzial	103
A7	Auslegungspraxis	104
A7.1	Spezifische Entzugsleistung	104
A7.2	Abstände zwischen Sonden sowie zwischen benachbarten Anlagen	104
A8	Zusammenfassung	106
A9	Abbildungsverzeichnis	106
A10	Tabellenverzeichnis	107
A11	Verwendete Abkürzungen	107
A12	Literatur	108
A13	Haftungsausschluss	110

A1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Ausbaus der erneuerbaren Energien als Eckpfeiler nachhaltiger Klima- und Energiepolitik gewinnt die oberflächennahe Geothermie als dezentrale Energieoption zur Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, Gebäudekomplexen und urbaner Areale – insbesondere die Nutzung von Erdwärmesonden (EWS) – zunehmend an Bedeutung (Bundesverband Geothermie, 2016a). Für die Auslegung entsprechender Anlagen sind insbesondere deren ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit sowie die Steigerung der Energieeffizienz von hoher Priorität. Die intensive Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen, sowohl durch viele individuelle Kleinanlagen auf engem Raum (z. B. Einfamilienhäuser) als auch durch Großprojekte (Wohnanlagen, Bürogebäude etc.), stellt eine wachsende Herausforderung dar, die sowohl zuverlässiger Planungs- und Auslegungswerkzeuge auf Seiten der Ausführenden und Betreiber bedarf, als auch zukünftig eines thermischen Untergrundmanagements (Hähnlein et al., 2011). Dafür ist der freie Zugang zu den für die Standortbewertung und Auslegung notwendigen Daten für alle Beteiligten wie z. B. Bürger, Planer und Genehmigungsbehörden von übergeordneter Bedeutung. Fachplaner und Behörden können in dem Zusammenhang neben nachvollziehbaren und konsistenten Abläufen zur Bewertung von Standorten und der Genehmigung geplanter Anlagen von zentralen und vollständigen Datenbanken für grundlegende, z. B. geologische, Daten profitieren. Grundvoraussetzung für die optimierte Auslegung der Anlagen und Systeme sowie der nachhaltigen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes ist jedoch eine ergänzende, lokale Vorerkundung der ortsspezifischen Gegebenheiten.

Durch eine potenziell übermäßige thermische Ausbeutung besteht im Zusammenhang mit Erdwärmesonden und -systemen, gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen, die Gefahr der Ausbildung von Temperaturanomalien im Untergrund. In Extremfällen kann es zu Eisbildung mit einhergehenden Schäden an Bauwerken kommen. Eine starke Abkühlung des Untergrundes mindert zudem die Effizienz solcher Systeme, mit entsprechenden Auswirkungen auf deren wirtschaftlichen Betrieb. Neben unsachgemäßer Ausführung und Überlastung der Anlagen wurden insbesondere mangelhafte Dimensionierung sowie unberücksichtigte Wechselwirkungen mit benachbarten Systemen als Ursachen deren ungenügender Effizienz erkannt (Basetti et al., 2006; Casasso et al., 2014; Personenkreis Geothermie, 2011). Demgegenüber führt eine Überdimensionierung oberflächennaher geothermischer Systeme zu unnötig hohen Investitionskosten bezüglich der Sondenlänge und der Auslegung der Wärmepumpe. Die genannten Probleme kommen dabei umso mehr zum Tragen, je größer die Anlage ist, respektive je mehr EWS installiert werden. Als Ursachen für Über- und Unterdimensionierung sind insbesondere unvollständige Kenntnisse der thermischen Untergrundparameter, hier speziell der Wärmeleitfähigkeit, verbunden mit unzureichender Erkundung der geologischen Verhältnisse sowie fehlerhafte Annahmen des Wärme- und Kältebedarfs während des Auslegungsprozesses zu nennen (Hein et al., 2016a). In diesem Zusammenhang werden die Erstellung bundesweit einheitlich gestalteter geothermischer Datenbanken sowie die kontinuierliche Präzisierung der Auslegungsrichtlinien zur Gewährleistung der Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Anlagen angeregt. In die Datenbanken sollten Ergebnisse ortsspezifischer Vorerkundungen integriert werden, für die Gestaltung regulatorischer Dokumente ist die Realisierbarkeit von Verordnungen und Empfehlungen zu berücksichtigen.

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens „Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme – SAGS“ (Förderkennzeichen 13FH059PX3) erarbeitet. Im Rahmen von SAGS wurden Modellierungswerkzeuge und -strategien zur Analyse der thermischen Prozesse in Untergrund unter Berücksichtigung von Erdwärmesonden bzw. -systemen sowie der Wärmepumpenanlagen entwickelt und für die Beantwortung wesentlicher wissenschaftlich-technischer Fragestellungen zur Effizienz und Nachhaltigkeit der betrachteten oberflächennahen geothermischen Systeme eingesetzt. Die Ergebnisse der durchgeführten Forschungsarbeiten finden Eingang in die vorliegenden Anmerkungen zum aktuellen Stand der Auslegungspraxis sowie die Anregungen zur Optimierung der Planung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen.

Zunächst werden in Kapitel A2 die Geothermie-Leitfäden der Bundesländer sowie die relevanten, derzeit gültigen Normen und Richtlinien zusammengefasst. Der Fokus liegt hierbei auf der Auslegungspraxis, während die genehmigungsrechtlichen Grundlagen nur soweit notwendig Gegenstand dieser Arbeit sind. Dabei werden die Leitfäden und Richtlinien unter Berücksichtigung oben genannter Anforderungen wie Vollständigkeit und Verständlichkeit und Zuverlässigkeit untersucht. Im Weiteren wird in Kapitel A3 die derzeitige Datenlage zur oberflächennahen Geothermie insbesondere hinsichtlich ihrer Vollständigkeit und Verfügbarkeit analysiert. Basierend auf den Erkenntnissen der durchgeführten Forschungsarbeiten wird in Kapitel A4 ein systematischer Workflow zur Standortbewertung, Planung und (Vor-)Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen vorgestellt, der die aktuelle Auslegungspraxis in einigen Punkten ergänzen und präzisieren kann. Dieser Workflow ist flexibel einsetzbar und dient zur bzw. unterstützt – je nach Größenordnung des betrachteten Vorhabens – die Durchführung von Machbarkeitsstudien, Planung und Vorauslegung für Großanlagen sowie die geothermische Erschließung größerer Areale. Für kleine Anlagen ist die präsentierte Vorgehensweise im Rahmen der aktuellen Auslegungspraxis auch zur finalen Auslegung einsetzbar, da hier in der Regel auf (hydro-)geologische Erkundung sowie numerische Simulation verzichtet wird. Grund für dieses vereinfachte Vorgehen sind die Kosten für ortsspezifische Vorerkundung und numerische Simulation des prognostizierten Anlagenbetriebs, die für den Betreiber einer Einzelanlage in der Regel zu hoch sind. Aus diesem Grund wird angeregt, perspektivisch bei der Standorterschließung die Möglichkeiten und finanziellen Effekte einer übergeordneten Quartierserkundung und -simulation in die Betrachtungen einzubeziehen, da Vorerkundung und prognostizierende Simulation grundsätzlich aus technischer und wirtschaftlicher Sicht für den Anlagenbetrieb vorteilhaft sind – unabhängig von der Anlagengröße (vgl. Vienken et al., 2015). Zudem werden in Abschnitt A4.5 Anregungen zur Durchführung von numerischen Simulationen gegeben. Da zur thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes neben Erdwärmesonden weitere Technologien wie z. B. Erdwärmekollektoren oder offene Brunnensysteme zum Einsatz kommen, sind einzelne Schritte des Workflows bzw. Bestandteile der vorliegenden Dokumente auch für die Auslegung derartiger Anlagen anwendbar. An den entsprechenden Stellen wird darauf hingewiesen. Darüber hinaus werden Anregungen für einheitlich gestaltete geothermische Datenbanken formuliert. Hierfür ist es sinnvoll, bereits existierende Daten zusammenzuführen, zu vereinheitlichen und in geeigneter Form aufzubereiten (Kapitel A5). Ergänzend dazu werden die Erhebung zusätzlicher Daten (geothermisches Potenzial, Kapitel A6) und die Erweiterung bestehender Datensätze (spezifische Entzugs-

leistung, Kapitel A7) empfohlen. Abschließend werden die wichtigsten Punkte der vorliegenden Studie in Kapitel A8 zusammengefasst.

A2 STAND DER AKTUELLEN AUSLEGUNGSPRAXIS

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Auslegungspraxis für die Planung oberflächennaher Geothermiesysteme zusammengefasst. Dabei wird zunächst ein Überblick über die Leitfäden der Bundesländer sowie über teilweise verfügbare, ergänzende Materialien gegeben. Anschließend wird besonders auf die VDI-Richtlinie 4640 eingegangen. Zum Abschluss dieses Kapitels wird die derzeitige Auslegungspraxis für oberflächennahe Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen unter Einbeziehung der aktuellen Forschungsergebnisse betrachtet.

Tabelle 1: Inhalte der Geothermie-Leitfäden der Bundesländer.

Bundesland	Erläuterungen Geothermie	Bauliche und technische Anforderungen	Dimensionierung	Standortbeurteilung	Genehmigungsverfahren	Betrieb	Rechtliche Rahmenbedingungen	Weiterführende Informationen	Karten	Förderung
BW	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	ja	nein
BY	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja
BE	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein
BB	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja	ja	nein	ja
HB	nein	ja	nein	nein	ja	nein	nein	ja	nein	nein
HH	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein
HE	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein
MV	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein
NI	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja	nein
NRW	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	ja	nein	nein
RP	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein
SL	ja	ja	nein	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja
SN	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein
ST	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein
SH	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein
TH	ja	ja	nein	nein	ja	nein	ja	ja	nein	nein

A2.1 Leitfäden und Merkblätter der Länder

Derzeit stellen die meisten deutschen Bundesländer Informationsmaterial zur oberflächennahen Geothermie in Form von Leitfäden, Merkblättern oder Arbeitshilfen zur Verfügung (Erdwärmeliga, 2016; Bundesverband Geothermie, 2016b). Dabei unterscheiden sich die Leitfäden in Inhalt und Umfang teils erheblich. Neben allgemeinen Informationen und Erläuterungen zur Technologie bzw. zu deren Nutzung wird in nahezu allen Dokumenten auf bauliche und technische Anforderungen eingegangen – z. B. auf Material, Wärmeträgermedium, Installation von Erdwärmesonden, Hinterfüllung. Zudem enthalten die meisten Leitfäden ausführliche Informationen über die rechtlichen Rahmenbedingungen im Hinblick auf Wasser- und Bergrecht. Teilweise wird auch auf das Lagerstätten-gesetz eingegangen. Diese rechtlichen Rahmenbedingungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Eine umfassende Übersicht dazu bezüglich der Situation in Deutschland findet sich z. B. in Hähnlein et al. (2011). In der Regel wird in den Leitfäden der Bundesländer auch der Ablauf des Genehmigungsverfahrens für die Nutzung oberflächennaher Geothermie beschrieben. Hierzu werden mitunter in den Anhängen die notwendigen Formulare sowie Checklisten zur Verfügung gestellt. Weiterhin enthalten die meisten Leitfäden darüber hinausgehend auch Informationen zur Standortbeurteilung, teilweise mit entsprechenden Übersichtskarten. Soweit enthalten, verweisen die Leitfäden zur Dimensionierung von Erdwärmesonden auf die wichtigsten Inhalte der VDI-Richtlinie 4640 als Stand der Technik. Weitere Inhalte sind Hinweise zum Betrieb der betrachteten Anlagen und zu Fördermöglichkeiten sowie ergänzendes Kartenmaterial. In Tabelle 1 findet sich eine Übersicht über die wichtigsten Inhalte der erläuterten Leitfäden.

A2.2 Ergänzende Materialien der Länder

Neben den oben genannten Leitfäden stellen einige Geologische Dienste bzw. Landesämter für Geologie der Bundesländer ergänzendes Material zur Verfügung, wie z. B. Bayern, Berlin, Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen in Form von geothermischen Potenzialkarten als wichtigstes Hilfsmittel (Erdwärmeliga, 2016). Diese zeigen die ortsabhängige spezifische Entzugsleistung in [W/m] für verschiedene Tiefenstufen und Jahresbetriebsstunden (vgl. auch Kapitel A2.3 und A2.4 dieser Studie) und können zur groben Abschätzung der benötigten Sondenlänge von Erdwärmesonden bzw. -systemen verwendet werden. Weiterhin existiert häufig Kartenmaterial über Aufschlüsse, Grundwassermessstellen, Wasserschutzgebiete etc. Die Bohrprofile relevanter Aufschlüsse können z. B. in Sachsen separat kostenlos angefordert werden.

In Tabelle 2 wird ohne Anspruch auf Vollständigkeit eine Übersicht über das von den Bundesländern bereitgestellte Kartenmaterial gegeben. Das Bürgerinformationssystem oberflächennahe Geothermie der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands¹ (SGD) verlinkt die existierenden Online-Angebote der Bundesländer miteinander. Eine detailliertere Analyse der zur Standortbewertung, Planung und Auslegung notwendigen Daten, deren Verfügbarkeit und der relevanten Bezugsquellen folgt in Kapitel A3 dieser Studie.

A2.3 VDI-Richtlinie 4640

Die VDI-Richtlinie 4640 spiegelt den aktuellen Stand der Technik zur thermischen Nutzung des Untergrundes wider. Für die Planung und Auslegung von Erdwärmesonden sind

¹ www.geothermieportal.de/geothermie_6.0

hierbei Blatt 1 „Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte“ und Blatt 2 „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ relevant. In Blatt 1 wird unter anderem auf die technisch-physikalischen Grundlagen, rechtliche Beurteilungen, Sicherheitsaspekte der Wärmepumpe und die Standortbewertung eingegangen. Beispielsweise werden typische Bandbreiten für die thermischen Parameter und für die Massedichte verschiedener Gesteinsarten als Tabellen bereitgestellt.

Tabelle 2: Informationen zur Planung oberflächennaher geothermischer Anlagen in Web-basierten Karten der Bundesländer.

Bundesland	Wasserschutzgebiete	Bohrungen	Grundwasserleiter	Hydraulische Durchlässigkeit	Grundwasser-messstellen	Grundwasser-gleichen	Flurabstand	Wärmeleit-fähigkeit	Spezifische Ent-zugleistung	Untergrundtem-peraturen	Installierte Anlagen	Standort eignung
BW	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	nein
BY	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja	nein	ja	ja
BE	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein	nein
BB	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein
HB	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein
HH	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja
HE	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja
MV	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein
NI	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	ja
NRW	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja
RP	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein
SL	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
SN	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein
ST	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein
SH	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
TH	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	nein	ja	nein	nein	ja

Zur Standortbewertung wird auf die SGD als Bezugsquelle geologischer und hydrologischer Informationen, die Wasserbehörden als Informationsquelle bezüglich administrativer Einschränkungen sowie die Leitfäden der Bundesländer verwiesen. Neben

allgemeinen Hinweisen über (hydro-)geologische Risiken, Altlasten etc., die bei der Standortbewertung zu berücksichtigen sind, wird für Erdwärmesonden ein Mindestabstand von 10 m zu Sonden auf benachbarten Grundstücken vorgeschlagen. In den Leitfäden der Bundesländer wird diese Zahl in der Regel aufgegriffen.

Blatt 2 der VDI-Richtlinie 4640 befasst sich mit Auslegung und Installation von Anlagen der oberflächennahen Geothermie. Dabei werden Sonden bis zu einer Tiefe von 400 m behandelt, wobei häufig aus bergrechtlichen Gründen nicht tiefer als 100 m gebohrt wird. Zunächst wird das Wärmeübertragungsvermögen verschiedener Sondentypen in Abhängigkeit von Sondengeometrie und Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung anhand der Hilfsgröße „effektiver thermischer Bohrlochwiderstand“ demonstriert. Weiterhin wird eine vereinfachte Lösung auf der Basis der Linienquellentheorie als Berechnungswerkzeug zur Abschätzung der zeitabhängigen Temperaturänderung im Erdreich als Folge des Betriebs einer EWS präsentiert. Es werden Grenzwerte für die Wärmeträgerflüssigkeit im Heiz- und Kühlmodus für den Dauerbetrieb und für Spitzenlasten festgelegt. Im Heizmodus liegen diese bei 0° C (Dauerbetrieb) und -5° C (Spitzenlast). Es folgt ein Abschnitt zur Auslegung von kleinen Anlagen mit Heizleistungen bis zu 30 kW. Das dargestellte Auslegungsverfahren ist nur unter gewissen Voraussetzungen gültig:

- Heizleistung bis 30 kW,
- Sondenlänge 50-200 m,
- maximal 5 Sonden in Linienanordnung,
- mindestens 6 m Abstand zwischen den Sonden,
- Jahresvolllaststunden 1.200-1.400 h,
- Doppel-U-Sonde,
- keine Wechselwirkung mit in der Nachbarschaft befindlichen Anlagen zu erwarten.

Weitere Einschränkungen gelten bezüglich der Kühlleistung. Die Auslegung erfolgt in diesem Zusammenhang anhand der Hilfsgröße „spezifische Entzugsleistung“, die aus analytischen Berechnungsmodellen abgeleitet und für verschiedene Fälle in tabellarischer Form bereitgestellt wird. Die spezifische Entzugsleistung stellt die extrahierbare Leistung pro Meter Sondenlänge dar und ist u. a. abhängig von (hydro-)geologischen Parametern wie Wärmeleitfähigkeit und -kapazität sowie Temperatur des Untergrundes, Grundwasserströmung, Sondenkonfiguration (Sondentyp, Geometrie, Anzahl und Anordnung der Sonden, Hinterfüllung) und von anlagenspezifischen Parametern wie der zeitlichen Verteilung des Heizbedarfs über das Jahr, respektive der Lastkurve. Die bereitgestellten Tabellen berücksichtigen verschiedene Lastfälle (Heizen mit und ohne Warmwasserbereitstellung), Jahresvolllaststunden, die Sondenanzahl, Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, laminare und turbulente Strömung in der Sonde sowie unterschiedliche Minimaltemperaturen bei Maximallast.

Die auf den analytischen Berechnungen beruhende Auslegung erfolgt unter einigen Annahmen: Als Sondentyp wird die in Mitteleuropa gängige Doppel-U-Sonde 32x2,9 mm mit einem Bohrlochdurchmesser von 150 mm und einer Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials von 0,8 W/(m K) angenommen. Weiterhin wird eine über die Tiefe homogene Untergrundtemperatur von 11° C zugrunde gelegt.

Für Abweichungen von den oben genannten Bedingungen, also z. B. für Anlagen mit einer Leistung > 30 kW, mehr Jahresvolllaststunden, mehr als 5 Sonden etc. schreibt die Richtlinie den Nachweis der korrekten Auslegung durch Berechnung vor. Die Berechnung

hat dabei für die mittlere Temperatur des Wärmeträgerfluids zu erfolgen. Weiterhin wird für große Anlagen eine Erkundungsbohrung empfohlen. Es werden Angaben zu den benötigten Eingabedaten der Berechnung gemacht und verschiedene Ansätze wie z. B. analytische Rechenmodelle und numerische Simulation beschrieben. Zur konkreten Durchführung der Berechnungen bzw. numerischen Simulationen werden keine näheren Angaben gemacht. Es folgen weitere Abschnitte u. a. zur hydraulischen Auslegung der Rohrleitungen sowie zur Errichtung der Anlage, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

A2.4 Analyse der aktuellen Praxis

Die oberflächennahe Geothermie stellt eine vielversprechende Option als erneuerbare und vorwiegend dezentral nutzbare thermische Energiequelle für die Wärmewende im Rahmen der geplanten Transformation des Energiesystems in Deutschland dar. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, die Verfahren zur Machbarkeitsuntersuchung, Planung und Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen weiterzuentwickeln. Dies hat insbesondere vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit und Effizienz solcher Anlagen zu erfolgen. Insbesondere mit steigender Anzahl der installierten Systeme und der entsprechenden Zunahme der flächenbezogenen Anlagendichte können unerwünschte Effekte zwischen benachbarten Systemen auftreten (Huber und Pahud, 1999). Sowohl Über- als auch Unterdimensionierung schlagen sich in wirtschaftlichen Schäden nieder – erstere in den Investitionskosten (hier insbesondere Großanlagen), letztere in den Betriebskosten, eventuellen Folgeschäden, einem potenziellen Ausfall der Anlage etc. (Personenkreis Geothermie, 2011). Zuverlässige Planungswerkzeuge dienen der Vermeidung solch unerwünschter Effekte und unterstützen die Standortbewertung sowie Vorauslegung von Klein- und Großanlagen als auch den Genehmigungsprozess. Dabei sollte das Planungs- und Auslegungsverfahren insbesondere für Kleinanlagen so genau wie nötig, aber so einfach wie möglich sein.

Vor diesem Hintergrund fällt auf, dass in keinem der oben ausgewerteten Dokumente eine Empfehlung zur strukturierten Vorgehensweise bei der Planung und Auslegung unter Berücksichtigung der relevanten Aspekte abgegeben wird. An diesen Sachverhalt anknüpfend, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts SAGS der bereits erwähnte Workflow erarbeitet, der einen Beitrag zur Unterstützung der Planung und Auslegung von EWS leisten soll und in Kapitel A4 im Detail vorgestellt wird.

Weiterhin zeigt die Auswertung der von den Behörden bereitgestellten Dokumente und Daten, dass das Vorhandensein bestimmter Daten sowie deren freie Verfügbarkeit, Quantität und Qualität in den Bundesländern sehr unterschiedlich geregelt ist (Personenkreis Oberflächennahe Geothermie, 2008). Anregungen zur Erstellung einheitlich gestalteter Datensammlungen für die oberflächennahe Geothermie finden sich in den Kapiteln A5-7 dieser Studie.

Bezüglich der VDI-Richtlinie 4640 ist zu bemerken, dass das dort vorgeschlagene Auslegungsverfahren auf Basis der spezifischen Entzugsleistung für spezielle Rahmenbedingungen entwickelt wurde. Bei Variationen einer geplanten Anlage gegenüber dem vorgegebenen Gültigkeitsrahmen sind neben den bereitgestellten Tabellenwerten zur Auslegung abweichender Szenarien weiterführende Berechnungen in jedem Fall sinnvoll und verbessern die Zuverlässigkeit prognostizierender Analysen. Ebenso basieren die oben erwähnten Karten der verschiedenen Geologischen Dienste auf spezifischen Ent-

zugsleistungen mit einem, in der Regel, noch engeren Gültigkeitsbereich. Allerdings dienen diese Karten in ihrer jetzigen Form nur der groben Orientierung. Während das Konzept der spezifischen Entzugsleistung an sich praktikabel ist, kann die Gültigkeit und Genauigkeit der verfügbaren, parameterabhängigen Werte z. B. durch numerische Simulationen erheblich erweitert werden. Hierbei gilt es beispielsweise zu berücksichtigen, dass die derzeit zur Verfügung stehenden Werte der spezifischen Entzugsleistung mit analytischen Lösungsansätzen ermittelt wurden, die relevante Effekte wie die über den Jahresverlauf schwankende Oberflächentemperatur, den lokalen geothermischen Gradienten, mögliche Grundwasserströmungen, verschiedene Wärmepumpenleistungen etc. vernachlässigen und damit selbst nur im Rahmen der vorgegebenen Annahmen eine zuverlässige Basis für die Auslegungspraxis darstellen (Sanner, 1999). Weiterführende Anregungen dazu werden in Kapitel A7.1 dieser Studie formuliert.

Vor diesem Hintergrund ist beispielsweise die Gültigkeit eines fixen Mindestabstandes zwischen benachbarten Erdwärmesonden, wie er in der VDI-Richtlinie angegeben wird und von einigen Leitfäden der Bundesländer übernommen wurde, als eher unflexibel und ein mit den ortsspezifischen Gegebenheiten nicht in jedem Fall zu begründenden Parameter anzusehen. Die Ausbreitung von Wärme- bzw. den relevanteren Kältefahnen als Folge des Betriebs von EWS hängt im Wesentlichen von den Verhältnissen im Untergrund (thermische Parameter) und in besonderem Maße von potenziell vorhandenen Grundwasserströmungen sowie von der Heiz- bzw. Kühllast der Wärmepumpe ab (Pannike et al., 2006; Freudenstein und Lutz, 2016). Der Sondenabstand stellt somit eine dynamische Größe dar und ist sowohl vom Standort als auch vom spezifischen Anlagentyp abhängig. Die Einhaltung von Mindestabständen dient in erster Linie der Vermeidung von störenden Wechselwirkungen. In diesem Zusammenhang ist es durchaus vorstellbar, dass bei günstigen Bedingungen benachbarte Anlagen näher beieinander installiert werden könnten als aktuell in Richtlinien und Leitfäden angegeben. Anregungen zum Umgang mit diesem Thema werden in Kapitel A7.2 dieser Studie präsentiert.

In den Leitfäden der Bundesländer und in der VDI-Richtlinie 4640 wird für Großanlagen, Sonderfälle etc. eine Nachweisführung durch Berechnung gefordert. Als mögliche Verfahren wird dabei auf analytische Rechenmodelle, Nomogramme, semi-analytische Näherungslösungen auf der Basis so genannter g-Funktionen und numerische Simulationen verwiesen. Hierbei ist anzumerken, dass die ersten drei Verfahren auf teilweise stark vereinfachenden Annahmen basieren und somit auch nur im Rahmen dieser Annahmen zuverlässig gültig sind. Im Allgemeinen sind zur Berücksichtigung aller für den Betrieb der EWS und der im Untergrund stattfindenden Wärmetransportprozesse relevanten Effekte numerische Modelle notwendig (Hein et al., 2016a; Shao et al., 2016). Weder zu den ersten drei Varianten, noch zur numerischen Simulation, wurden Hinweise zur strukturierteren Vorgehensweise für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung entsprechender Berechnungen/Simulationen gefunden. Die im Forschungsprojekt SAGS gesammelten Erfahrungen hinsichtlich der numerischen Modellierung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen werden daher als Teil des bereits erwähnten Workflows in Kapitel A4.5 vorgestellt.

A3 DATENLAGE

Nachfolgend wird die Verfügbarkeit der zur Planung, Auslegung und Simulation von oberflächennahen Geothermiesystemen notwendigen Daten zusammengefasst. Zudem wird,

soweit notwendig, auf weitere mögliche Datenquellen eingegangen. Grundsätzlich sind bei den Daten drei Kategorien zu unterscheiden:

- administrative Daten, hier vor allem Informationen zu Wasserschutzgebieten, die von den Behörden festgelegt werden,
- physikalische Größen, die zumeist die Parameter des Untergrundes betreffen und
- abgeleitete Größen, wie die spezifische Entzugsleistung und das geothermische Potenzial, die sich aus den lokalen physikalischen Parametern, der Anlagenkonfiguration, Betriebsmodi usw. ergeben.

Einige Beispiele werden nachfolgend exemplarisch für den Freistaat Sachsen erläutert.

Tabelle 3: Daten und Bezugsquellen für Standortbewertung, Planung und Auslegung.

Art der Daten	Form	Bezugsquelle
Wasserschutzgebiete	Karten	Geologische Dienste, Wasserbehörden
Aufschlüsse, Bohrungen	Karten, Verzeichnisse	Geologische Dienste, BGR
Thermische Untergrundparameter	Tabellenwerke, Literaturwerte, Karten (Wärmeleitfähigkeit), Messwerte	Fachliteratur, VDI-Richtlinie 4640, Geologische Dienste, Erkundung
Hydraulische Leitfähigkeit	Literaturwerte, Karten, Messwerte	Fachliteratur, VDI-Richtlinie 4640, Geologische Dienste, Wasserbehörden, Erkundung
Grundwasserströmung (Richtung, Gradient, Geschwindigkeit), Flurabstand	Grundwassermessstellen, Karten, Messwerte	Geologische Dienste, Wasserbehörden, Erkundung
Oberflächentemperatur	Karten, Messwerte	Deutscher Wetterdienst, Meteorologische Institute
Geothermischer Gradient	Messwerte, Literaturwerte	Bohrdaten Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Fachliteratur
Spezifische Entzugsleistung	Tabellen, Gleichungen	VDI-Richtlinie 4640, Fachliteratur

A3.1 Datenbestand in den Bundesländern

In Tabelle 2 wurde bereits ein Überblick über existierendes Kartenmaterial zur Unterstützung der Planung und Auslegung oberflächennaher Geothermiesysteme gegeben. Eine weitere Bezugsquelle für Daten und Informationen ist das Geothermieportal der SGD. Auf den Internetseiten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) findet

sich in dem Zusammenhang eine Aufstellung der Geologischen Dienste der Bundesrepublik Deutschland². In Tabelle 3 wird die Verfügbarkeit der in diesem Kapitel diskutierten Daten zusammengefasst.

A3.2 Wasserschutzgebiete

Trinkwasserschutzzonen und Heilquellenschutzgebiete werden von den zuständigen Behörden festgelegt. Hierzu existiert Kartenmaterial, das in der Regel bei den Geologischen Landesämtern bzw. den Geologischen Diensten der Bundesländer verfügbar ist. Für detaillierte Informationen ist auf die zuständigen Wasserbehörden zu verweisen. In Sachsen können Wasserschutzgebiete über eine Webapplikation in einer interaktiven Karte eingesehen werden, die sich kostenlos nutzen lässt (siehe Beispiel in Abb. 1).

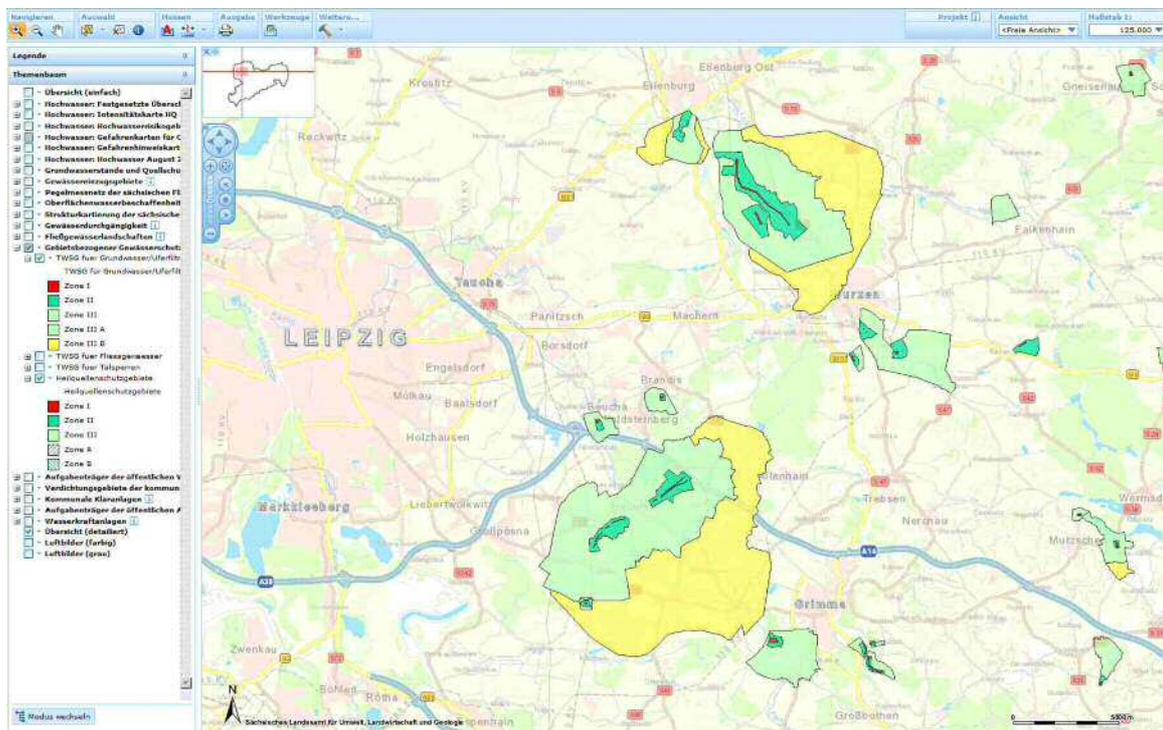


Abbildung 1: Ausschnitt aus einer interaktiven Karte zu Wasserschutzgebieten in Sachsen³.

A3.3 Geologie

Alle in einem Bundesland durchgeführten Bohrungen jeglicher Art müssen beim jeweiligen Geologischen Dienst bzw. dem zuständigen Landesamt angezeigt werden (z. B. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)). Die relevante Behörde stellt die Informationen dann in Form von Bohrdatenbanken zur Verfügung. Eine weitere Bezugsquelle ist die Bohrpunktkarte des BGR⁴. In Sachsen sind alle Bohrungen mit Koordinaten, Aufschlussnummer und Aufschlusstiefe in einer kostenlosen, interaktiven Karte verzeichnet (siehe Beispiel in Abb. 2).

² www.bgr.de/geol_la/geol_la.htm

³ www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/weboffice101/synserver?project=wasser-wasserschutzgebiete&view=wsg&language=de&client=html

⁴ www.bgr.de/app/boreholemap/main.php



Abbildung 2: Ausschnitt aus einer interaktiven Karte zu Bohrungen und Aufschlüssen in Sachsen⁵.

Die den Aufschlüssen zugeordneten Schichtenverzeichnisse müssen in Sachsen separat beim LfULG angefordert werden und stehen dann als digitale Datensätze zur Verfügung. Für die Auswertung der Schichtenverzeichnisse ist eine Software notwendig, die kostenlos bezogen werden kann.

A3.4 Thermische Untergrundparameter

Es existieren keine flächendeckenden Informationen zu den thermischen Eigenschaften des Untergrundes. Die Abschätzung von Wärmeleitfähigkeit und -kapazität kann durch die Zuordnung von Werten aus der einschlägigen Fachliteratur (z. B. Stober und Bucher, 2014), wissenschaftlichen Studien, der VDI-Richtlinie 4640 etc. zu den Gesteinsarten aus den Schichtenverzeichnissen erfolgen. Dabei sollten alle im Rahmen der jeweils spezifischen Planungskonstellation realisierbaren Möglichkeiten genutzt werden, die Daten gründlich zu recherchieren, da eine ungenügende Kenntnis der thermischen (wie auch aller weiteren) Untergrundparameter zu einer Über- oder Unterdimensionierung von EWS oder EWS-Systemen mit den oben geschilderten nachteiligen Auswirkungen auf Sicherheit und Effizienz der Anlage führen kann. Zudem ist die Betrachtung der Untergrundeigenschaften unter Berücksichtigung von Grundwasservorkommen von großem Einfluss, da beispielsweise gesättigte Lockergesteine erheblich höhere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen als ungesättigte Materialien. Eine genaue Bestimmung der lokalen Untergrundeigenschaften am spezifischen Standort eines geplanten oberflächennahen Geothermiesystems ist nur durch (hydro-)geologische Erkundung des betrachteten Standorts möglich. Sind im konkreten Fall Untergrundparameter aus Erkundungskampagnen nicht verfügbar und ist deren Abschätzung aus der Kenntnis von Schichtenverzeichnissen und

⁵ www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/weboffice101/synserver?project=geologie-bohrungen&language=de&view=bohrungen

Literaturangaben für die Parameter mit Unsicherheiten verbunden, wird eine Vorerkundung am Standort im Rahmen des Planungsprozesses empfohlen (z. B. Thermal Response Tests). Wenn weder lokale Parameter verfügbar noch Vorerkundungsmaßnahmen realisierbar sind, ist eine konservative Abschätzung zu empfehlen – es sollte also beispielsweise in diesem Fall mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten gerechnet werden.

A3.5 Grundwasser

Zur Berechnung von Grundwasserfließgeschwindigkeit v_D und -richtung ist die Kenntnis der hydraulischen Durchlässigkeit k_f sowie des hydraulischen Gradienten i notwendig.

$$v_D = k_f \times i$$

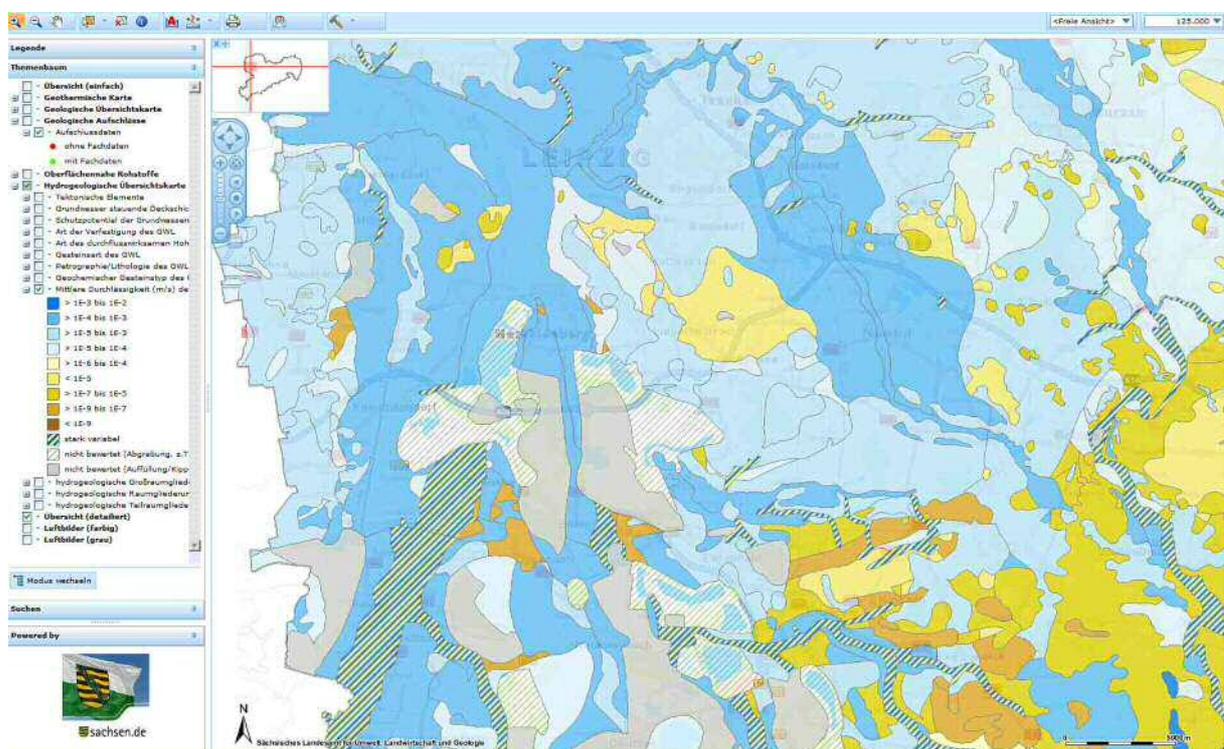


Abbildung 3: Ausschnitt aus einer interaktiven Karte zur mittleren hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes in Sachsen⁶.

A3.5.1 Hydraulische Durchlässigkeit

Bezüglich der hydraulischen Durchlässigkeit (auch: hydraulische Leitfähigkeit) des Untergrundes ist die Datenlage sowie -verfügbarkeit in den einzelnen Bundesländern sehr unterschiedlich. Der Freistaat Sachsen stellt auch hier interaktives Kartenmaterial online zur Verfügung (siehe Beispiel in Abb. 3). Dabei wird die mittlere hydraulische Durchlässigkeit, meist in Zehnerpotenzen abgestuft, dargestellt. Werden am jeweils betrachteten Standort keine Erkundungsarbeiten vorgenommen, sollte die Parameterabschätzung grundsätzlich auch hier konservativ erfolgen, wobei sich je nach Fragestellung unterschiedliche Krite-

⁶ www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/weboffice101/synserver?project=geologie-bohrungen&language=de&view=bohrungen

rien ergeben: Während die Effizienz einer Einzelanlage durch ungestörte Anströmung steigt, und zur konservativen Auslegung damit eher niedrige Werte für die hydraulische Durchlässigkeit angenommen werden sollten, steigt die Ausdehnung der Temperaturfahne und damit das Einflussgebiet von EWS mit höherer hydraulischer Leitfähigkeit. Neben vorhandenen geologischen Karten existieren Literaturwerte zur hydraulischen Durchlässigkeit für verschiedene Gesteinsarten (z. B. Hölting und Coldewey, 2013; VDI, 2015).

A3.5.2 Grundwasserstand und hydraulischer Gradient

Sogenannte Grundwassergleichenkarten und Informationen von Grundwassermessstellen sind als Bezugsquellen zur Ermittlung des Grundwasserstandes, der Fließrichtung und des hydraulischen Gradienten geeignet. Diese Werte sind bei der numerischen Simulation von besonderem Interesse. Zudem existieren auch Karten mit Grundwasserflurabständen.

Informationen über den Stockwerksbau der Grundwasserleiter sind im Allgemeinen nicht so leicht zugänglich und müssen gegebenenfalls bei der zuständigen Wasserbehörde angefragt werden. Alle in diesem Kapitel diskutierten Daten lassen sich zudem sehr genau ebenfalls durch Erkundungsmaßnahmen vor Ort bestimmen.

A3.6 Oberflächentemperatur und geothermischer Gradient

Für den Jahresgang der Oberflächentemperatur stehen verschiedene Quellen zur Verfügung. Häufig gibt es in der Umgebung der geplanten Anlagen meteorologische Einrichtungen, welche die Daten in der Regel kostenlos zur Verfügung stellen. Weiterhin existiert ein Temperaturmodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD), welches flächendeckend für verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten und Tiefen kostenlos in Form von ASCII-Dateien verfügbar ist. In beiden Fällen wird in der Regel eine Verarbeitung der Daten zur Bildung von Monatsmitteln notwendig. Da die Oberflächentemperatur stark von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängt, ist es zu empfehlen, Werte aus einer geringen Tiefe zu verwenden, da der Oberflächeneinfluss hier schon etwas gedämpft ist.

Zum geothermischen Gradienten über die Tiefe im geologischen Untergrund stehen meist keine belastbaren Daten zur Verfügung. Im Fachinformationssystem Geophysik des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG) können nach Registrierung Temperaturlogs von Bohrungen eingesehen werden. Daraus lässt sich bei geeigneter Datenlage der geothermische Gradient berechnen. Darüber hinaus können wissenschaftliche Veröffentlichungen als Informationsquelle in Frage kommen. Die Recherchearbeit ist hier sehr aufwändig, und für viele Standorte sind keine spezifischen Daten vorhanden. Bei fehlenden Informationen kann ein mittlerer geothermischer Gradient von 0,03 K/m angenommen werden (Stober und Bucher, 2014). Befindet sich die geplante Anlage in einer Region mit bekannten Anomalien (z. B. Oberrheingraben), sollte jedoch versucht werden, für die Simulation belastbare Standortdaten heranzuziehen.

A3.7 Oberflächennahes geothermisches Potenzial

Derzeit existiert keine einheitliche, allgemeingültige Definition des Begriffs „geothermisches Potenzial“. Im Folgenden wird der Terminus in seiner verallgemeinerten Form als die auf einer bestimmten Fläche dem oberflächennahen Untergrund entziehbare Energiemenge pro Zeiteinheit mit der Einheit [MWh/(m² a)] verstanden. Im Zusammenhang mit dieser Definition existieren bereits Studien zur Ermittlung des oberflächennahen

geothermischen Potenzials für einzelne Standorte und Regionen (Arola et al., 2014; LANUV, 2015; Zhang et al., 2014; Zhu et al., 2010). Diese basieren auf vereinfachenden Annahmen bzw. analytischen sowie semi-analytischen Lösungen und unterliegen den in den Kapiteln A2.3 und A2.4 dieser Studie erwähnten Einschränkungen. Als weitere Spezifizierung des Begriffs ist das „technisch nutzbare geothermische Potenzial“ zu verstehen, welches sich auf die nachhaltig und effizient technisch nutzbare, dem oberflächennahen Untergrund entziehbare Energiemenge bezieht. Diese Begriffserweiterung ist für die Planung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen notwendig, da die im Untergrund potenziell vorrätige Energie durch die verfügbare Technik nur teilweise gewonnen werden kann. Dies trifft umso mehr zu, da die Bewirtschaftung des Untergrundes nachhaltig sein soll. Dadurch reduziert sich die entziehbare Wärmemenge, da nach einer gewissen Betriebsdauer das System Untergrund-EWS-Wärmepumpe in ein thermisches Gleichgewicht kommen muss. Eine Methode zur realistischen Abschätzung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials wurde kürzlich von (Hein et al., 2016b) veröffentlicht.

Da momentan das geothermische Potenzial im oben definierten Sinn nicht Bestandteil von Planungsprozessen für oberflächennahe Geothermiesysteme ist und somit keine entsprechenden flächendeckenden Daten existieren, werden in Kapitel A7.1 dieser Studie Anregungen zur Ermittlung und Erhebung entsprechender Informationen formuliert.

Das durch bereits installierte Anlagen genutzte geothermische Potenzial kann ermittelt werden, indem die jährlich entzogene Wärmemenge auf das durch die Anlage(n) beeinflusste Gebiet bezogen wird. Somit ergibt sich das tatsächlich verfügbare geothermische Potenzial schließlich aus der Differenz zwischen dem ungestörtem, theoretischen Potenzial und dem bereits genutzten Potenzial. Analog kann das technisch nutzbare geothermische Potenzial eines Standorts als Differenz zwischen seinem ungestörtem, technisch nutzbaren Potenzial und dem bereits genutzten Potenzial ermittelt werden. Für die Ermittlung des genutzten geothermischen Potenzials im oberflächennahen Untergrund existieren, auch aus Datenschutzgründen, keine öffentlich zugänglichen Datenbanken. Im Bedarfsfall können bei der zuständigen Wasserbehörde anonymisierte Informationen relevante Anlagen angefordert werden.

Die Bewertung des ungestörten, technisch nutzbaren und des bereits genutzten oberflächennahen geothermischen Potenzials kann die Standortbeurteilung und Planung sowie den Genehmigungsprozess für die Errichtung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen wesentlich unterstützen. Daher wird eine zukünftige Erhebung und Berücksichtigung dieser Größen angeregt. Diese rein rechnerische Bewertung des geothermischen Potenzials berücksichtigt jedoch noch nicht einen potenziellen diffusen Wärmeeintrag in den Untergrund, wie er beispielsweise durch typische Nutzungen des Untergrundes im urbanen Raum (urbane Wärmeinseln, verursacht z. B. durch Abwassereinrichtungen oder unterirdische Verkehrswege) beobachtet wird. Derart komplexe Betrachtungen können zuverlässig nur durch Einsatz numerischer Simulationen für die abschätzende Prognose der Nachhaltigkeit und Effizienz oberflächennaher Geothermiesysteme an betroffenen Standorten unterstützt werden.

A3.8 Spezifische Entzugsleistung

Zur spezifischen Entzugsleistung stellt die VDI-Richtlinie 4640 Tabellenwerke zur Verfügung, welche aber nur unter bestimmten Voraussetzungen gültig sind (vgl. Kapitel A2.3

und A2.4 dieser Studie). Weiterhin basieren die von einigen Bundesländern bereitgestellten geothermischen Karten auf spezifischen Entzugsleistungen (vgl. Kapitel A2.2 dieser Studie). Auch hier beruhen die angegebenen Werte auf vereinfachenden Annahmen z. B. bezüglich der Anlagen- und Sondenkonfiguration. Zudem existieren einige empirische Gleichungen zur Berechnung der spezifischen Entzugsleistung als Funktion der Wärmeleitfähigkeit, sowie teilweise auch der Jahresvolllaststunden und der Darcy-Geschwindigkeit (Panteleit und Reichling, 2006; Pannike et al., 2006 u.a.).

A4 WORKFLOW ZUR STANDORTBEWERTUNG, PLANUNG UND AUSLEGUNG

Die aktuelle Auslegungspraxis für oberflächennahe Geothermiesysteme beruht weitgehend auf Standards, die auf Arbeitsschritten und Empfehlungen basieren, welche vorrangig in den oben erläuterten Leitfäden und der VDI-Richtlinie 4640 formuliert sind. Im Folgenden wird der Entwurf eines Workflows zur Standortbewertung, Planung und Auslegung für Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zur Diskussion gestellt, der eine Ergänzung und punktuelle Präzisierung der etablierten Systematik für die Durchführung von Machbarkeitsstudien, für die Planung und (Vor-)Auslegung sowie für Genehmigungstätigkeiten der betrachteten Anlagen darstellt. Eine vollständige Ausarbeitung der einzelnen Schritte inklusive der Definition relevanter Entscheidungskriterien und der Angabe von Datenquellen kann nicht Bestandteil dieser Studie sein, wird aber gemeinsam mit der Erstellung einheitlich gestalteter geothermischer Datenbanken als eigenständiges Vorhaben angeregt. Hier wird zunächst die auf dem Workflow beruhende systematische Vorgehensweise anhand eines Flussdiagramms vorgestellt (vgl. Abb. 4). Anschließend werden die verschiedenen Arbeitsschritte im Einzelnen erläutert.

Wie in Kapitel A2 dieser Studie dargelegt, wurde im Rahmen des Vorhabens SAGS auch die bestehende Datenbasis der Länder untersucht. Neben der Bereitstellung einheitlich gestalteter Datenbanken zur oberflächennahen Geothermie, vorzugsweise als web-basierte interaktive Kartenanwendungen, wird zusätzlich eine intensiviertere Erhebung in der Fläche bzw. Ableitung bisher nur vereinzelt verfügbarer Daten, z. B. zum geothermischen Potenzial, angeregt. Dazu sollten im Rahmen der jeweiligen Möglichkeiten bei geplanten Eingriffen in den Untergrund Vorerkundungsmaßnahmen (vornehmlich mittels hoch auflösender Technologien) durchgeführt und die Ergebnisse sukzessive in einer standardisierter Form in die Datenbanken eingepflegt werden.

Da die aktuelle Datenlage mitunter unvollständig ist, kann die Bearbeitung einzelner Schritte des vorgestellten Workflows in solchen Fällen nur eingeschränkt erfolgen. In Kapitel A3 dieser Studie werden Hinweise zur Gewinnung dieser Daten gegeben. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass einige Teile des Workflows auch für offene Brunnenanlagen anwendbar sind. An den jeweiligen Stellen der folgenden detaillierteren Beschreibung einzelner Arbeitsschritte des Workflows wird darauf hingewiesen.

Grundsätzlich gliedert sich der Workflow in drei Hauptschritte:

1. Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb der Anlage überprüfen
2. Mögliche Interaktion mit benachbarten Anlagen überprüfen
3. Auslegung bzw. Vorauslegung je nach Anlagentyp bzw. -größe vornehmen

Die ersten beiden Punkte stellen dabei die wesentlichen Bestandteile zur Durchführung einer Machbarkeitsstudie dar.

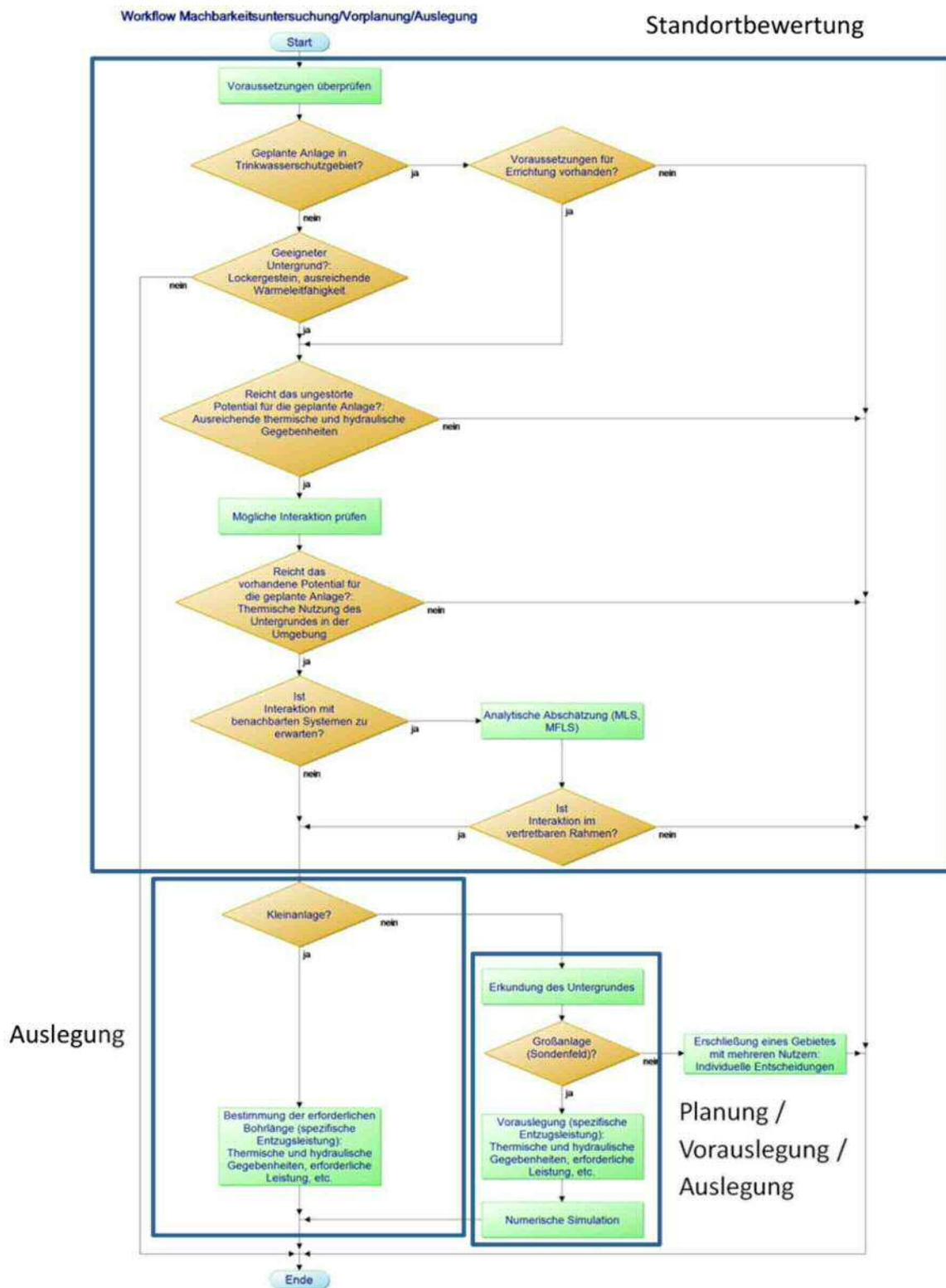


Abbildung 4: Flussdiagramm für einen Workflow zur Standortbewertung, Planung und Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen.

A4.1 Überprüfung der Voraussetzungen

Zunächst sind die Voraussetzungen zur Errichtung und zum Betrieb von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zu überprüfen. Dies gilt grund-

sätzlich auch für Brunnenanlagen. Hierbei sind sowohl rechtliche bzw. administrative Einschränkungen (beispielsweise hinsichtlich des Wasserrechts) als auch die hydrogeologischen Voraussetzungen zu betrachten.

A4.1.1 Wasserschutzgebiete

Zunächst muss geklärt werden, ob sich die geplante Anlage in einem Trinkwasser- oder Heilquellenschutzgebiet befindet, bzw. ob andere wasserrechtliche Einschränkungen vorliegen. Wasserschutzgebiete werden in den §§ 50-53 des Wasserhaushaltsgesetzes geregelt. Die Wasserschutzzonen sind in die Klassen I-III unterteilt, wobei Klasse III nochmal in die Unterklassen A und B unterteilt ist. In der Regel sind Errichtung und Betrieb von EWS in den Zonen I-III/IIIA verboten. In Einzelfällen sind in den Zonen III/IIIA Ausnahmen möglich. Gleiches gilt für Heilquellenschutzgebiete. Bei geplanten Anlagen in Zone IIIB ist eine Einzelfallentscheidung notwendig. Grundsätzlich gilt also, dass die Errichtung von Anlagen in den Zonen I-II nicht möglich ist. In allen anderen Fällen muss die Genehmigungsbedürftigkeit und -fähigkeit mit der zuständigen Behörde individuell abgeklärt werden.

Liegt die geplante Anlage außerhalb ausgewiesener Schutzgebiete, sind Errichtung und Betrieb von EWS grundsätzlich möglich. Eine wasserrechtliche Genehmigung ist jedoch auch hier in der Regel erforderlich, insbesondere bei Kenntnis oder begründetem Verdacht von Altlastenvorkommen im Untergrund. Letztlich wird in diesem Schritt geklärt, ob die Installation von EWS grundsätzlich ausgeschlossen ist bzw. ob wesentliche Hindernisse aus wasserrechtlicher Sicht zu erwarten sind. Eine frühzeitige Anfrage bei der zuständigen Wasserbehörde wegen möglicher Hemmnisse wird in jedem Fall empfohlen.

A4.1.2 Eignung des Untergrundes

In diesem Schritt werden die grundsätzlichen (hydro-)geologischen Eigenschaften des geplanten Anlagenstandorts überprüft. Als Beispiel für potenziell kritische Standorte seien Gebiete mit stärkerer Stockwerkausprägung genannt. Hier besteht die Gefahr, dass durch die Abteufung einer Bohrung zwei oder mehr Grundwasserleiter hydraulisch miteinander verbunden werden, was nicht zulässig ist. In diesem Fall ist der Bau von EWS bis zu einer bestimmten Tiefe in der Regel möglich. Bei der Auslegung ist die mögliche Bohrtiefe besonders zu beachten, da die benötigte Sondenlänge so eventuell auf mehrere Sonden verteilt werden muss. Alternativ kann auch der Nachweis einer geeigneten Ringraumverpressung erbracht werden, die einen hydraulischen Kurzschluss verhindert.

Ein weiteres Kriterium ist die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Unter einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,7 \text{ W/(m K)}$ lassen sich Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen nicht mehr wirtschaftlich betreiben (Casasso und Sethi, 2014; Hein et al., 2016b). Sind also Gesteinsschichten mit niedriger Wärmeleitfähigkeit und ausgeprägter Mächtigkeit vorhanden, reduziert sich die ökonomisch sinnvolle Sondenlänge bzw. erweist sich die Installation von EWS aus wirtschaftlichen Gründen prinzipiell als ausgeschlossen.

A4.1.3 Ungestörtes, technisch nutzbares geothermisches Potenzial

Allgemeine Erläuterungen zum geothermischen Potenzial sind in Kapitel A3.7 dieser Studie zu finden. Sind (zukünftig) Informationen über das lokale, ungestörte und technisch nutzbare geothermische Potenzial vorhanden, lässt sich abschätzen, ob der Heizbedarf,

respektive die nötige Wärmemenge, nachhaltig und effizient aus dem Untergrund abgeschöpft werden kann. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die entsprechende Größe auch für Brunnenanlagen abgeleitet werden kann. Weitere Ausführungen zum geothermischen Potenzial und den Möglichkeiten zur Erhebung entsprechender Daten finden sich in Kapitel A7.1 dieser Studie.

A4.2 Berücksichtigung benachbarter Anlagen

Sind die grundsätzlichen Bedingungen zur Installation von EWS erfüllt, sollten als nächstes mögliche in der Nachbarschaft befindliche Anlagen in der Planung berücksichtigt werden, um negative Wechselwirkungen zwischen den Systemen zu vermeiden.

A4.2.1 Technisch genutztes und vorhandenes geothermisches Potenzial

Wie in Kapitel A3.7 dieser Studie bereits erläutert, kann analog zum ungestörten, technisch nutzbaren geothermischen Potenzial auch das bereits genutzte Potenzial abgeleitet werden. Dieses ergibt sich aus der (pro Jahr) dem Untergrund entzogenen oder in diesen eingespeisten Energiemenge bereits existierender Anlagen und deren Einflussbereich. Nach Verrechnung mit dem ungestörten Potenzial ergibt sich so das lokal noch verfügbare Potenzial. Anregungen zur Erhebung und Bereitstellung entsprechender Daten werden in Kapitel A5.3 dieser Studie formuliert.

A4.2.2 Überprüfung möglicher Interaktionen

Bei Kenntnis von Standorten und Leistung bzw. Heizbedarf benachbarter Anlagen, sowie möglicherweise vorhandener nennenswerter Grundwasserströmung kann der Einflussbereich dieser Systeme abgeschätzt werden. Befindet sich z. B. ein großes Sondenfeld in unmittelbarer Nachbarschaft, kann der in der VDI-Richtlinie 4640 empfohlene Abstand zweier benachbarter Sonden von 10 m gegebenenfalls nicht ausreichend sein, so dass Effizienzverluste nicht auszuschließen sind. Insbesondere bei vorhandener Grundwasserströmung ist der Einflussbereich von EWS in Strömungsrichtung je nach Strömungsgeschwindigkeit deutlich vergrößert. Gleichzeitig verkleinert sich der Einflussbereich quer zur Strömungsrichtung (Hein et al., 2016b). Auch in diesem Fall kann ein Abstand von 10 m in Strömungsrichtung Effizienzverluste der geplanten Anlage zur Folge haben, während quer zur Strömungsrichtung unter Umständen auch geringere Abstände ausreichen.

A4.3 Auslegung/Planung

Wenn ein erfolgreicher Bau und Betrieb einer/eines geplanten Erdwärmesonde(nsystems), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zu erwarten ist, kann für Kleinanlagen die Auslegung erfolgen. Hierfür wird in der Regel ein einfaches Verfahren auf Basis der spezifischen Entzugsleistung zur Ermittlung der erforderlichen Sondenlänge eingesetzt. Details zu den einzelnen Berechnungsschritten wie die Ermittlung der Wärmepumpenverdampferleistung P_{WP} etc. sind in der VDI-Richtlinie 4640 nachzulesen. Die erforderliche Gesamtsondenlänge L wird letztendlich mit der Anzahl der Sonden n und der spezifischen Entzugsleistung $P_{\text{spezifisch}}$ zu

$$L = \frac{P_{WP}}{n \times P_{\text{spezifisch}}}$$

bestimmt. Bei der Durchteufung verschiedener Schichten ist die Gleichung unter Berücksichtigung der Schichtdicken und deren spezifischen Entzugsleistungen entsprechend anzupassen.

Das vereinfachte Verfahren kann auch zur Vorauslegung für große Anlagensysteme und die Erschließung beispielsweise von Wohngebieten mit vielen individuellen Kleinanlagen eingesetzt werden. In beiden Fällen empfiehlt sich zur Vermeidung von Parameterunsicherheiten dennoch eine weiterführende Erkundung zur genaueren Bestimmung der lokalen (hydro-)geologischen Verhältnisse.

Es ist erneut darauf hinzuweisen, dass für die Gültigkeit dieses Verfahrens derzeit einige Einschränkungen gelten (vgl. hierzu Kapitel A2 dieser Studie). Weiterhin sollte den aus der Überprüfung möglicher Interaktionen mit benachbarten Systemen gewonnenen Erkenntnisse Rechnung getragen werden, indem gegebenenfalls größere Abstände der Sonde(n) zur Grundstücksgrenze eingehalten werden.

A4.4 Numerische Simulation

Es ist bekannt, dass der Betrieb von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen einer Reihe von Einflussfaktoren unterliegt. Neben den thermischen Eigenschaften des Untergrundes sollten standortspezifische Parameter wie der geothermische Gradient (in Deutschland im Mittel 0,3 K/m) sowie die Oberflächentemperatur berücksichtigt werden (Kurevija et al., 2011). Letztere ist z. B. stark von der Beschaffenheit der Oberfläche sowie dem Standort (Stadt/Land) abhängig (Rivera et al., 2015). Im Fall einer nennenswerten Grundwasserströmung sollte auch diese ins Modell integriert werden (Molina-Giraldo et al., 2011; Angelotti et al., 2014). Weiterhin lassen sich im Untergrund in der Regel verschiedene stratigraphische Schichten mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften antreffen, die je nach Bandbreite berücksichtigt werden sollten (Luo et al., 2014). Ebenfalls von wesentlicher Bedeutung ist der Einfluss der Wärmepumpe auf die thermische Last, die an den EWS anliegt. Durch die temperaturabhängige Leistungszahl (COP) ist die EWS-Last dynamisch von der Wärmepumpenlast sowie der Rücklaufemperatur der EWS abhängig (De Rosa et al., 2015; Zheng et al., 2016). Zur Herleitung analytischer Lösungen für die Auslegung oberflächennaher Geothermiesysteme sind immer vereinfachende Annahmen zu treffen. Es existieren z. B. analytische Modelle, die den geothermischen Gradienten und die variable Oberflächentemperatur (Bandos et al., 2009) oder den advektiven Wärmetransport durch Grundwasserfluss (Stauffer et al., 2014) berücksichtigen. Weiterhin gehen alle analytischen Lösungen von homogenen Untergrundeigenschaften aus.

Zur Berücksichtigung aller relevanten Effekte sind numerische Simulationen, meist auf Basis der Finite-Elemente-Methode, unverzichtbar. Als kommerziell verfügbares Berechnungswerkzeug sei hier beispielhaft FEFLOW (FEFLOW, 2016) erwähnt, welches zur Integration von Wärmepumpen über eine Schnittstelle zur Gebäudesimulationssoftware TRNSYS (TRNSYS, 2016) verfügt. Die unter Koordination des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ von einem internationalen Konsortium von Wissenschaftlern entwickelte Open-Source-Programmplattform OpenGeoSys steht als freier, wissenschaftlicher Simulationscode zur Verfügung (Kolditz et al., 2012). OpenGeoSys verfügt über ein integriertes EWS-Wärmepumpen-Modell (Hein et al., 2016a; Zheng et al., 2016; Shao et al., 2016). Beide der hier erwähnten Softwareprojekte basieren auf dem so genannten „Dual-Continuum-Approach“ (Diersch et al., 2011a,b). Bei diesem Ansatz werden die

EWS als Linienelemente idealisiert, die in ein dreidimensionales Netz des umgebenden Untergrundes integriert werden. Der horizontale und vertikale Wärmetransport mittels Wärmeleitung und Advektion wird dabei durch ein thermisches Widerstands-Kapazitäts-Netzwerk abgebildet (Abb. 5). Je nach Sondentyp werden die Temperaturen in den verschiedenen Vor- und Rücklaufbereichen, in der Hinterfüllung und an der Bohrlochwand berechnet. Die Kopplung zum umgebenden Untergrund geschieht über die Temperatur an der Bohrlochwand. Weiterhin lassen sich beide Programme zur Lösung von Optimierungsaufgaben z. B. mit dem Softwarepaket PEST (PEST, 2016) koppeln.

Im Folgenden werden einige Hinweise zur Modellbildung, Simulation und Auswertung gegeben. Die Hinweise sind dabei allgemeiner Natur, da hier aus Platzgründen nicht auf alle Details und Sonderfälle eingegangen werden kann. Der notwendige Detaillierungsgrad der Modelle obliegt dem Urteil des Bearbeiters, der die Verantwortung für die Korrektheit der Simulationen, insbesondere auch der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse trägt. Grundsätzlich sind die Simulationsergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen und gegebenenfalls mit analytischen Näherungen zu vergleichen.

Eine typische Aufgabenstellung ist der Vergleich verschiedener Anlagenkonfigurationen und die Optimierung der günstigsten Variante. Da im Prinzip alle Modellparameter wie Untergrundeigenschaften, thermische Lasten etc. Schwankungen oder Unsicherheiten unterliegen, wird an dieser Stelle ausdrücklich empfohlen, Parametervariationen durchzuführen bzw. konservativ geschätzte Parameter zu verwenden sowie ausreichend Sicherheiten einzuplanen.

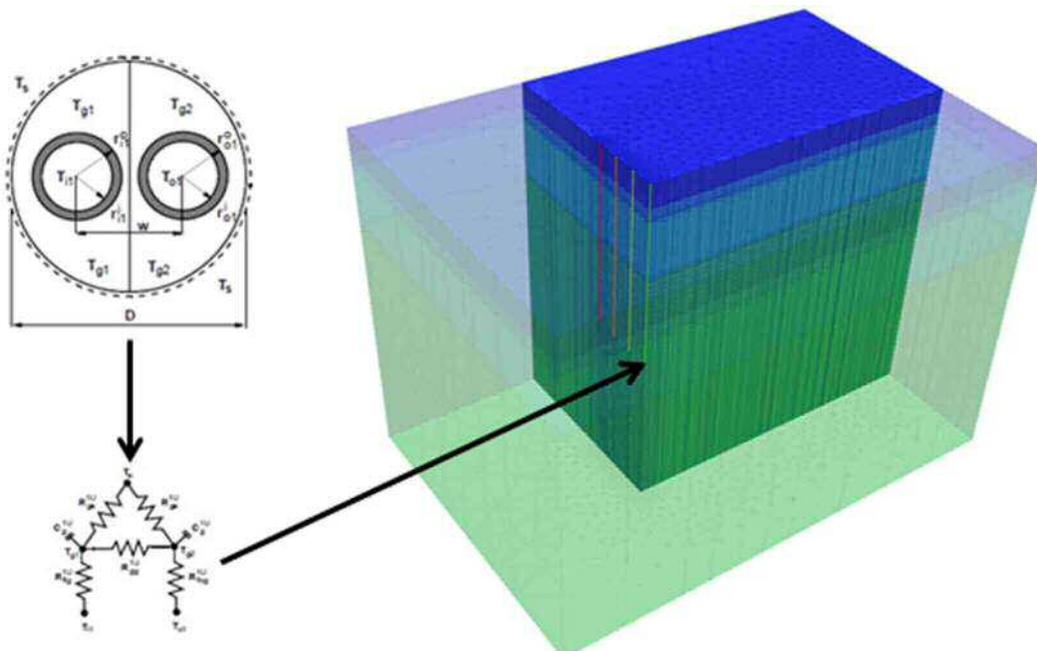


Abbildung 5: Prinzipskizze Dual-Continuum-Approach zur Integration von EWS in dreidimensionale Berechnungsgebiete im Rahmen von Finite-Elemente-Ansätzen.

A4.4.1 Modellgebiet und Netz

Bei der Erstellung und Vernetzung des Modellgebiets liegt ein Hauptaugenmerk auf der ausreichenden Größe des Modells. Die Modellränder sollten dabei weit genug von der/den Erdwärmesonde(n) entfernt sein, um störende Randeinflüsse zu vermeiden. Hierzu können keine allgemeingültigen Regeln aufgestellt werden, da die Ausbreitung des

durch die EWS induzierten Temperaturfeldes von der Anzahl und Leistung der EWS, möglicher Grundwasserströmung sowie dem Berechnungszeitraum abhängt. Hier sind gegebenenfalls vorab vereinfachte Testmodelle numerisch zu betrachten. Aus den Erfahrungen des SAGS-Projekts zeigt sich, dass z. B. zur Simulation einer einzelnen Sonde mit typischer Leistung über eine Betriebsdauer von 30 Jahren die seitlichen Ränder ca. 150-250 m von der EWS entfernt sein sollten. Bei reiner Wärmeleitung ist das Modellgebiet entsprechend mit quadratischem Querschnitt und zentrierten EWS auszuführen. Liegt eine Grundwasserströmung an, so ist das Modellgebiet mit rechteckigem Querschnitt zu erstellen. Dabei sollte(n) die EWS im vorderen Bereich, also stromauf platziert werden, damit stromab ausreichend Platz zur Ausbreitung der Temperaturfahne ist. Gleichzeitig ist die Temperaturfahne bei nennenswerter Strömungsgeschwindigkeit schmaler als im rein konduktiven Fall. Unter oben genannten Bedingungen ist für eine Einzelanlage z. B. ein Modellgebiet von 200 x 600 m in der Horizontalen sinnvoll, wobei die EWS ca. 100 m hinter dem Einströmrand platziert wird. Der untere Modellrand sollte über ausreichende Entfernung zum unteren Ende der tiefsten EWS verfügen. Erfahrungsgemäß reichen hierbei ca. 50 m aus.

Bei der Vernetzung von Dual-Continuum-Modellen ist auf die Knotenverteilung rund um die EWS zu achten, um den korrekten Wärmeübergang zwischen Sonde und Umgebung zu gewährleisten (Diersch et al., 2011b). Dabei hängt der Abstand Δ zwischen dem Knoten auf der Sonde und den umgebenden Knoten von der Anzahl n letzterer und dem Bohrlochradius r_b ab:

$$\Delta = a r_b, \quad a = e^{2\pi/\vartheta}, \quad \vartheta = n \tan \frac{\pi}{n}.$$

FEFLOW bietet die Möglichkeit, entsprechende Netze programmintern zu erzeugen. Für OpenGeoSys wurde ein relevanter Netzgenerator entwickelt (Shao et al., 2016). Grundsätzlich sollte neben der Einhaltung oben genannter Gleichung das Netz in der Umgebung der Sonden über eine hinreichende Auflösung verfügen. Zu den Rändern des Modellgebiets hin können die Elemente größer werden. Auch hier lassen sich keine allgemeingültigen Regeln aufstellen, gegebenenfalls sollten Netzkonvergenzstudien durchgeführt werden. Detaillierte Informationen zur Lage und veränderlichen Mächtigkeit der Schichten im Modellgebiet liegen in der Regel nur lokal vor (z. B. an im betrachteten Gebiet vorhandenen Bohrpunkten). Die numerische Praxis zeigt in diesem Zusammenhang, dass für die vertikale Auflösung des Simulationsgebiets verschiedene stratigraphische Schichten als eben und parallel zueinander approximiert werden können. Zudem können Schichten mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst werden. Die Kantenlänge der Finiten Elemente sollte in vertikaler Richtung zwischen 0,5 und 5 m liegen. Bei expliziten Zeitintegrationsverfahren ist hierbei die aus der Strömungssimulation bekannte Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl zu beachten (Kolditz, 2002).

Weiterhin ist es zur Vermeidung von störenden Einflüssen durch die Oberflächentemperatur empfehlenswert, die EWS einige Meter unter der Oberfläche zu platzieren, was in der Regel auch den realen Gegebenheiten entspricht. Sind im Umfeld der zu simulierenden Anlage weitere Wärmequellen/-senken bekannt, so können diese mit geeigneter Approximation ins Modell integriert werden. Andere EWS- oder Brunnenanlagen in ausreichender Entfernung können z. B. zur Vereinfachung als Linienquellen mit mittlerer Last angenähert werden.

Grundsätzlich entscheidet der Bearbeiter einer Auslegungssimulation über den Detailgrad und die Vernetzung des Modells. Hier sind die Vor- und Nachteile von detaillierten Modellen und feinen Netzen gegenüber Rechenzeit und zusätzlichem Erkenntnisgewinn abzuwägen, insbesondere wenn zahlreiche Modellvariationen gerechnet werden sollen. Unter Umständen sind Modellvergleiche unterschiedlicher Szenarien angebracht. In Abb. 6 ist beispielhaft ein Netz mit zwei EWS und drei verschiedenen Schichten dargestellt. Das Netz ist um die Sonden herum verdichtet und wird zu den Rändern hin gröber.

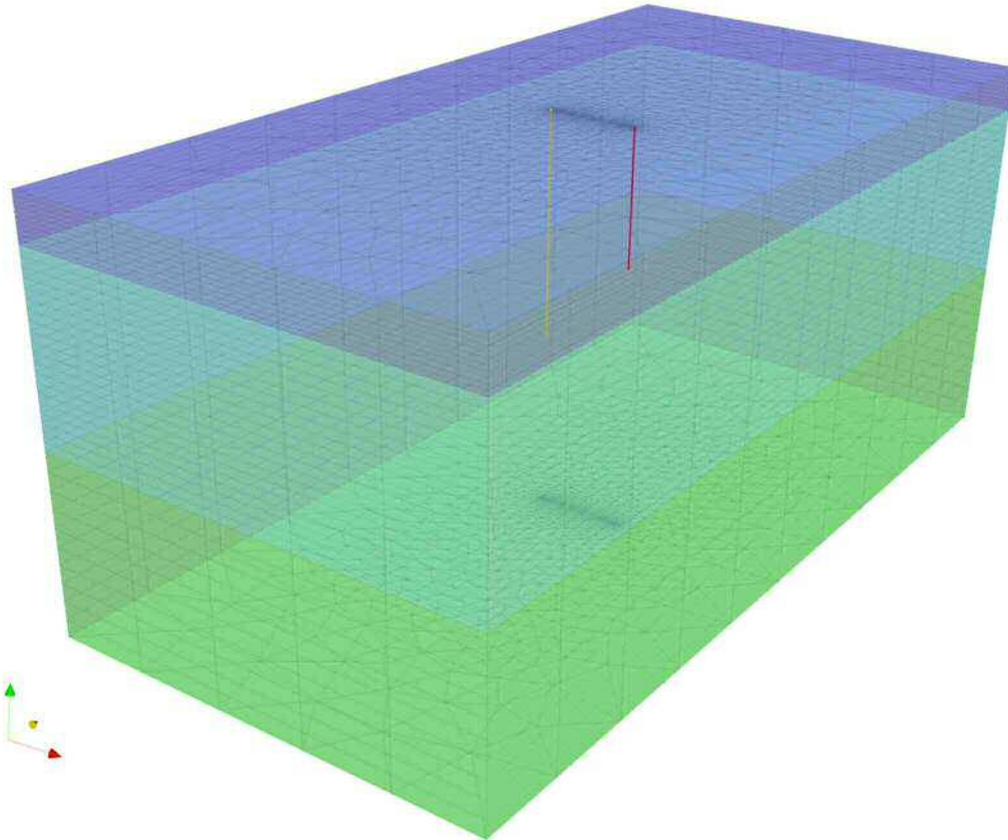


Abbildung 6: Beispiel für eine Finite-Elemente-Vernetzung eines numerischen EWS-Modells.

A4.4.2 Parametrisierung

Den verschiedenen stratigraphischen Schichten sind die jeweiligen physikalischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität (volumetrisch oder spezifisch zusammen mit der Dichte), Porosität, Sättigung und hydraulische Durchlässigkeit zuzuweisen. Bei vollständiger und teilgesättigter Bodenmatrix hat sich die Verwendung effektiver thermischer Eigenschaften bewährt. In diesem Fall geht die Porosität nicht explizit in die Beziehungen ein. Die sich aus Porenanteil und Sättigung ergebenden effektiven Werte werden dann im Vorhinein berechnet und zugewiesen. Die Verwendung temperatur- und druckabhängiger Größen ist für die oberflächennahe Geothermie i. d. R. nicht notwendig.

Die Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit ist im Allgemeinen sehr aufwändig. Zwar variieren hier die physikalischen Eigenschaften teils sehr stark, andererseits ist es mit vertretbarem Aufwand kaum möglich, die benötigten Informationen über Beschaffenheit, Parameter und Geometrie zu erfassen und ins Modell zu integrieren. Zudem wären die zugehörigen Randbedingungen anzupassen.

Für die EWS ist die geplante Sondenkonfiguration mit Sondentypen, Geometrie und Wärmeträgerflüssigkeit zu berücksichtigen. Wird thermische Dispersion vernachlässigt (wofür im Allgemeinen auch keine belastbaren Daten verfügbar sind) und das Konzept der effektiven thermischen Eigenschaften (s. o.) genutzt, so müssen die konkreten Eigenschaften des Grundwassers nicht berücksichtigt werden, da für den advektiven Wärmetransport nur noch das Geschwindigkeitsfeld ursächlich ist. Andernfalls sind die physikalischen Eigenschaften des Wassers, die Porosität und die Sättigung explizit zu berücksichtigen.

A4.4.3 Anfangs- und Randbedingungen

Das vertikal veränderliche Anfangstemperaturfeld $T(z)$ wird durch die mittlere Jahrestemperatur an der Oberfläche \bar{T}_s und den geothermischen Gradienten $\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{geo}}$ bestimmt:

$$T(z) = \bar{T}_s - \left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{geo}} \times z$$

Wesentliche Randbedingung des Modells ist die Lastkurve der Wärmepumpe, welche normalerweise als Jahrgang der Leistung definiert wird. Für den üblichen Heiz- und Kühlbetrieb ist der Einsatz eines Wärmepumpenmodells, welches die modellspezifische, temperaturabhängige COP-Kurve berücksichtigt, zu empfehlen. An der Modelloberfläche sollte der Jahrgang der Oberflächentemperatur am geplanten Standort als zeitabhängige Randbedingung angelegt werden. An der Modellunterseite empfiehlt sich der geothermische Wärmestrom als Randbedingung. Dieser sollte so gewählt werden, dass der Wärmestrom q zusammen mit der vertikalen Verteilung der Wärmeleitfähigkeit λ den geothermischen Gradienten $\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{geo}}$ ergibt:

$$q = \lambda \left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{geo}}$$

Alternativ kann, sofern die Modelluntergrenze ausreichenden Abstand zu den EWS hat, eine konstante Temperatur angesetzt werden.

Bei Berücksichtigung von Grundwasserflüssen werden an den Ein- und Ausströmrändern die entsprechenden hydraulischen Druckhöhen zur Erzeugung des hydraulischen Gradienten definiert. Zudem sollte die Anfangstemperaturverteilung gemäß geothermischem Gradienten als vertikal veränderliche Temperaturrandbedingung am Einströmrand aufgebracht werden, um den Energietransport in das Modell korrekt abzubilden.

Für die zeitlich veränderlichen Randbedingungen Lastkurve und Oberflächentemperatur ist bei Langzeitsimulationen die Verwendung von monatlichen Mittelwerten zulässig. Es wird empfohlen, zwischen den Monatsmittelwerten linear zu interpolieren. Dies hat den Vorteil, dass Sprünge zwischen den Monaten vermieden werden, da solche Unstetigkeiten numerisch schwieriger zu handhaben sind, das Konvergenzverhalten negativ beeinflussen bzw. eine große Zahl an Iterationen erfordern.

A4.4.4 Wärmepumpe und EWS-Felder

An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Kopplung des EWS-Modells mit einem Wärmepumpenmodell nachdrücklich empfohlen wird, da die thermische Last der EWS sich aus der momentanen Wärmepumpenleistung, deren COP-Charakteristik sowie der momentanen Rücklauftemperatur ergibt. Wird der dynamische

Einfluss der Wärmepumpe nicht berücksichtigt, ist mit deutlich abweichenden Ergebnissen zu rechnen (Zheng et al., 2016; Hein et al., 2016a; Shao et al., 2016). Zudem können mit einem geeigneten Wärmepumpenmodell der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe und damit Effizienz, anfallende Betriebskosten und der äquivalente CO₂-Fußabdruck bewertet werden (Hein et al., 2016c). Zur Simulation von EWS-Feldern sollte zudem ein numerisches Modell verwendet werden, welches die hydraulische Verschaltung zwischen den einzelnen Sonden sowie der Wärmepumpe abbilden kann.

A4.4.5 Sonstiges

Bei der Wahl der Zeitschrittweite sind die gewünschte zeitliche Auflösung der Ergebnisse zu berücksichtigen sowie die numerische Stabilität bzw. das Konvergenzverhalten gegenüber der Rechenzeit abzuwägen. Große Zeitschrittweiten erfordern eine größere Anzahl an Iterationen, kleine Zeitschrittweiten führen zur schnelleren Konvergenz. Allerdings entsteht dann ein Mehraufwand durch die größere Anzahl zu lösender Zeitschritte.

Generell sind die Ursachen langsamer Konvergenz oder gar von Divergenz des numerischen Verhaltens vielfältig. Je „unphysikalischer“ ein Modell ist, z. B. durch Parameter die deutlich von ihrer üblichen Größenordnung abweichen (beispielsweise durch Tippfehler oder Umrechnungsfehler bei der Parametrisierung), desto schlechter ist die Konvergenz.

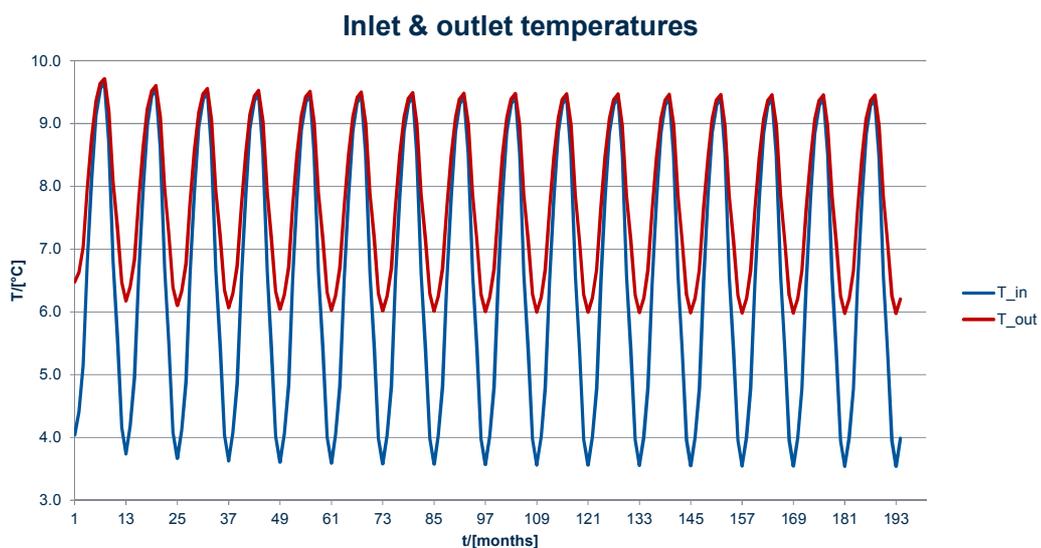


Abbildung 7: Beispiel für die Berechnung von Vor- und Rücklauftemperaturen einer EWS.

A4.4.6 Ergebnisauswertung und -interpretation

In den meisten Fällen sind die Rücklauftemperaturen der Sonden bzw. die Vorlauftemperatur im Sekundärkreis der Wärmepumpe von übergeordnetem Interesse. Diese lassen sich je nach Programm direkt als Diagramme oder als ASCII- bzw. Excel-Datei ausgeben, um dann weiterverarbeitet zu werden (Abb. 7). Somit können z. B. mittlere Fluidtemperaturen etc. berechnet werden. Je nach Wärmepumpenmodell ist auch eine Berechnung des entsprechenden COP möglich, beispielsweise um Effizienzanalysen durchzuführen. So können u. a. die Jahresarbeitszahl, der Stromverbrauch sowie die äquivalenten CO₂-Emissionen der Wärmepumpe abgeschätzt werden. Weiterhin ist die Beeinflussung der

Untergrundtemperatur durch die EWS ein wichtiges Ergebnis. Hier bieten sich häufig die graphische Darstellung z. B. durch Isolinien oder Isoflächen in verschiedenen Schnitten (Abb. 8) und zu unterschiedlichen Zeitpunkten an. Weiterhin kann die Temperatur an markanten Punkten im Umfeld der Sonde als Zeitreihe dargestellt werden.

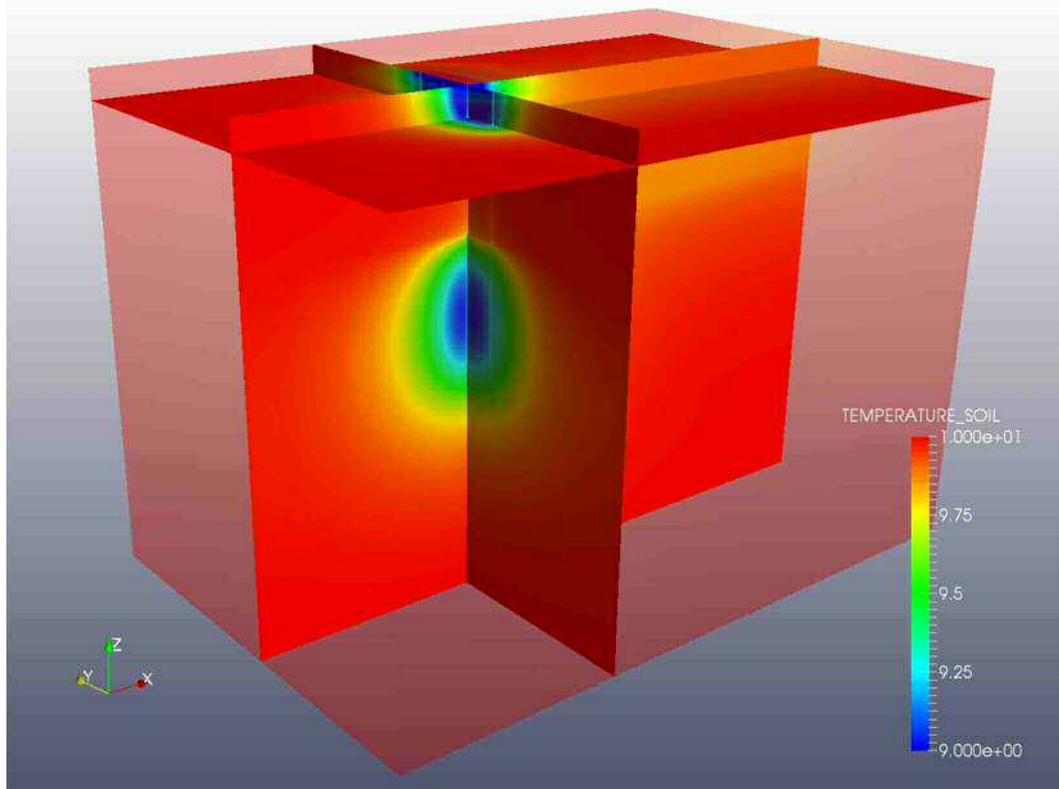


Abbildung 8: Isoflächendarstellung der Untergrundtemperatur in verschiedenen Schnitten eines EWS-Systems.

A5 ZUSAMMENFÜHRUNG, VEREINHEITLICHUNG UND AUFBEREITUNG DER DATEN ZUR OBERFLÄCHENNAHEN GEOTHERMIE

In Kapitel A3 dieser Studie wurden die derzeit verfügbaren Daten zur oberflächennahen Geothermie dargestellt. Werden die zur Bearbeitung des in Kapitel A4 präsentierten Workflows notwendigen Daten berücksichtigt, können diese insgesamt in drei Kategorien eingeteilt werden:

- **Verfügbare und aufbereitete Daten:** Die notwendigen Daten sind verfügbar und in der derzeit aufbereiteten Form nutzbar. Dies betrifft z. B. die Karten der Wasserschutzgebiete, Grundwasserflurabstände etc.
- **Verfügbare, nicht aufbereitete Daten:** Die notwendigen Daten sind grundsätzlich verfügbar, sind aber für eine zweckmäßige Nutzung weiter aufzubereiten. Dies betrifft z. B. Informationen zur Grundwasserströmung, dem genutzten geothermischen Potenzial u. a.
- **Nicht verfügbare Daten:** Diese Daten sind derzeit nicht oder nur eingeschränkt verfügbar und müssen erhoben oder zumindest abgeschätzt werden, wenn deren standortbezogene Erhebung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht

vertretbar ist. Dies betrifft vor allem das ungestörte, technisch nutzbare geothermische Potenzial oder auch thermische und (hydro-)geologische Bodenparameter. Die Datenbasis zur spezifischen Entzugsleistung sollte zudem erweitert werden.

In diesem Kapitel werden die verfügbaren, nicht aufbereiteten Daten erläutert und Möglichkeiten zur geeigneten Bereitstellung aufgezeigt. Auf die derzeit nicht verfügbaren Daten wird in Kapitel A6 eingegangen. Da sich Quantität und Qualität der Datenlage in den einzelnen Bundesländern erheblich voneinander unterscheiden, wird im Sinne einer einheitlich gestalteten Datenbasis zudem angeregt, notwendige Datensätze zusammenzuführen und zu vereinheitlichen (Personenkreis Oberflächennahe Geothermie, 2008).

A5.1 Geologie und thermische Untergrundparameter

Die SGD verfügen über Bohrdatenbanken, in denen alle Aufschlüsse mit Schichtenverzeichnissen gespeichert sind. Hiermit lassen sich prinzipiell flächen- und raumdeckende Modelle der Gesteinskörper erstellen. Darauf aufbauend ist es zweckmäßig, den Gesteinskörpern physikalische Parameter zuzuweisen (Personenkreis Oberflächennahe Geothermie, 2008; Panteleit und Reichling, 2006). Dies erfolgt zweckmäßigerweise anhand von Literaturwerten unter Angabe der Unsicherheit bzw. Bandbreite der Werte. Soweit verfügbar, ist eine lokale Zuweisung verfügbarer Messwerte anzuraten. Wichtigster Parameter ist hierbei die Wärmeleitfähigkeit. Weitere wichtige Parameter sind die volumetrische oder spezifische Wärmekapazität, letztere im Zusammenhang mit der Dichte, und die Porosität. Zudem ist eine Verschneidung mit Grundwasserleitern anzustreben, um die durch vollständige oder teilweise Wassersättigung erhöhten Wärmeleitfähigkeiten von Lockergesteinen zu ermitteln. Zusätzlich stellt die hydraulische Durchlässigkeit eine wichtige Information dar. Die Bereitstellung der Daten sollte idealerweise als kostenlose, interaktive web-basierte Kartenanwendung erfolgen, auf die Planer der entsprechenden Anlagen frei zugreifen können. So wäre es z. B. hilfreich, an vorhandenen Bohrungen die entsprechenden Schichtenverzeichnisse mit Angabe der Gesteinsart sowie der thermischen und (hydro-)geologischen Parameter abzurufen. Daneben wäre auch eine Darstellung von Vertikalschnitten denkbar, die vom Benutzer angelegt werden können.

A5.2 Grundwasser

Die Datenbasis zum Thema Grundwasser ist im Allgemeinen sehr gut, wobei die Informationen allerdings auf die Geologischen Dienste und die zuständigen Wasserbehörden verteilt sind. Hier wäre eine Vereinheitlichung und Zusammenführung der Datenbestände für eine gemeinsame Aufbereitung und Bereitstellung als Kartenanwendung sinnvoll.

Neben den bereits verfügbaren hydrologischen Daten wäre eine Darstellung der lokal vorhandenen Grundwasserkörper als vom Benutzer definierbarer Vertikalschnitt zweckmäßig (s. o.). Zur intuitiven Visualisierung von stationären Grundwasserströmungen sind Vektorplots geeignet. Hierfür ist zunächst die Berechnung des lokalen hydraulischen Gradienten, genauer von Magnitude und Richtung, notwendig. Dies kann mit Hilfe der Grundwasserstände in den entsprechenden Grundwassermessstellen erfolgen. Auch eine Verarbeitung von Daten aus Grundwassergleichenkarten ist denkbar. Die lokal ermittelten Gradienten können dann mit der dort vorhandenen hydraulischen Durchlässigkeit zur Darcy-Geschwindigkeit verrechnet und entsprechend visualisiert werden.

A5.3 Genutztes geothermisches Potenzial

Zur Beurteilung möglicher Interaktionen mit in unmittelbarer Nachbarschaft befindlichen Anlagen sowie des genutzten geothermischen Potenzials sind verschiedene Daten und Darstellungsformen denkbar. Die zuständigen Wasserbehörden verfügen über alle notwendigen Informationen zu bereits installierten Anlagen. Grundsätzlich ist eine Darstellung entsprechender Anlagen in Karten wünschenswert. Dabei ist es sinnvoll, dass nicht nur EWS berücksichtigt werden, sondern alle Anlagen, die den Untergrund thermisch beeinflussen (Brunnen, Erdwärmekollektoren, Energiepfähle, etc.). Eine sinnvolle Ergänzung wäre, detaillierte Informationen wie z. B. Wärmepumpenleistung, jährlicher (Heiz- und Kühl-)Energiebedarf der Anlage, Anzahl und Tiefe der EWS etc. für jede Anlage abrufen zu können, insofern dies nicht datenschutzrechtlichen Vorgaben widerspricht. Weiterhin ist vorstellbar, dass zu jeder Anlage weitere Layer mit zusätzlichen Informationen dargestellt werden können, wie z. B. die Grenzen des Flurstücks. Mit mehr Aufwand verbunden wäre die Visualisierung des Einflussgebiets der Anlagen. Dafür sind zu jeder Anlage Berechnungen bzw. Simulationen und die anschließende Verarbeitung der Ergebnisse notwendig. Zur Abschätzung des Einflussbereichs einer Anlage können aber z. B. auch analytische Lösungen verwendet werden (infinite line source (ILS)/finite line source (FLS)-Modelle für rein konduktiven Wärmetransport und moving infinite line source (MILS)/moving finite line source (MFLS)-Modelle für advektiven Wärmetransport durch Grundwasserströmung (Stauffer et al., 2014)), die verhältnismäßig einfach zu implementieren sowie zu automatisieren sind und nur einen geringen Rechenbedarf haben. Die Simulationen wären für jede genehmigte Anlage einmalig durchzuführen und die Ergebnisse in die relevante Datenbank einzuspeisen.

A5.4 Oberflächentemperatur und geothermischer Gradient

In der Regel wird der zeitliche Verlauf der Oberflächentemperatur $T_s(t)$ mit der mittleren Jahrestemperatur \bar{T}_s , der Amplitude A und der Phase φ als Sinusfunktion approximiert (Bechtel, 2015).

$$T_s(t) = \bar{T}_s + A \cos \left[\frac{2\pi}{365} (t - \varphi) \right]$$

Als Informationen sind hierbei der Jahresmittelwert sowie die Amplitude notwendig. Entsprechende modellbasierte, flächendeckende Datensätze sind beim DWD (Deutscher Wetterdienst, 2016) in verschiedenen zeitlichen Auflösungen verfügbar. Im Sinne einer vollständigen Kartenanwendung zur geothermischen Nutzung ist eine Sammlung, Verarbeitung (Ermittlung von Mittelwert und Amplitude für verschiedene Tiefen und Oberflächenbeschaffenheiten) und Visualisierung dieser Datensätze denkbar. Wie schon in Kapitel A3.6 dieser Studie erwähnt, sind zum geothermischen Gradienten kaum belastbare Daten verfügbar. Hier wäre derzeit z. B. denkbar, die Bohrlochtemperaturlogs der LIAG-Datenbank zu verarbeiten und lokal zuzuweisen.

A6 ERHEBUNG NEUER DATEN

Wie bereits in den Kapiteln A3 und A4 dieser Studie erwähnt, wird eine möglichst flächendeckende Erhebung des oberflächennahen geothermischen Potenzials zur Unterstützung der Planungs- und Auslegungsprozesse für Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen angeregt. Dabei sei nochmals darauf hingewiesen, dass in diesem Zusammenhang das geothermische Potenzial als eine abgeleitete Größe verstan-

den und als auf einer bestimmten Fläche pro Zeiteinheit nutzbare bzw. genutzte Energiemenge mit der zweckmäßigen Maßeinheit [MWh/(m² a)] definiert wird.

A6.1 Ungestörtes, technisch nutzbares geothermisches Potenzial

Das technisch nutzbare geothermische Potenzial ist eine Funktion der lokalen (hydro-)geologischen Verhältnisse, der Anlagenkonfiguration und der Betriebsweise. Es stellt damit keine absolute Größe dar und dient als Maß, wie viel Energie pro Jahr und Fläche nachhaltig und effizient mit EWS real genutzt werden kann. Die in einem Zeitraum Δt entzogene Energie E_{geo} ergibt sich aus

$$E_{\text{geo}} = E_s + E_w = V(1 - \varepsilon)C_s\Delta T + C_w\Delta T$$

mit dem betrachteten Volumen V des porösen Untergrundmediums, der Porosität des Gesteins (Bodens) ε , den volumetrischen Wärmekapazitäten C_s des Gesteins (Bodens) und C_w der Porenflüssigkeit (in der Regel Wasser) sowie der in diesem Zeitraum durch den Energieentzug hervorgerufene Temperaturänderung ΔT . Bezogen auf den Zeitraum Δt und die Fläche des Standorts ergibt sich daraus das ungestörte, technisch nutzbare geothermische Potenzial. Dabei ist ΔT abhängig von Anlagenkonfiguration, Leistung, Betriebsart etc. Da EWS ein inhomogenes Temperaturfeld im Untergrund induzieren, ist es sinnvoll, ein Vergleichsmaß für ΔT einzuführen. In Hein et al. (2016b) wird ein Verfahren zur Bestimmung einer äquivalenten Temperaturänderung ΔT_{eq} mittels numerischer Simulation beschrieben, welches zur Abschätzung des ungestörten, technisch nutzbaren geothermischen Potenzials geeignet ist. Die dort beschriebene Vorgehensweise lässt sich auch auf andere Systeme wie z. B. Brunnenanlagen übertragen. Allgemein ist es sinnvoll, bezüglich der Betriebsweise (z. B. Kühlung im Sommer, Warmwasserversorgung) verschiedene Fälle zu unterscheiden. Weiterhin empfiehlt es sich, einen Standardfall basierend auf einer 100 m langen Sonde zu untersuchen, deren Leistung an den Untergrund angepasst ist.

Für eine umfassende Erhebung ist zunächst die Ermittlung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials als Werteschar in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen wie thermische Parameter des Untergrundes, Grundwasserströmung, Betriebsart etc. durch numerische Simulation notwendig. Je nach Menge der berücksichtigten Parameter und deren Abstufungen folgt eine große Anzahl von Parameterkombinationen. Die Durchführung und Auswertung einer entsprechenden numerischen Studie lässt sich gut automatisieren. Je nach Umfang einer solchen Simulationskampagne ist die Bereitstellung der Ergebnisse entweder als Datenbank, oder aber, wenn die Zahl der Einflussgrößen nicht zu groß ist, als empirische Gleichung denkbar. Zur Erstellung eines Kartenwerks sind die Wertescharen des Potenzials den lokalen Verhältnissen (thermische Eigenschaften des Gesteins, Grundwasser) zuzuweisen. Dann könnten für verschiedene Fälle (nur Heizen, zusätzliche Warmwasserbereitstellung, Kühlung) entsprechende Layer angezeigt werden.

A6.2 Tatsächlich verfügbares geothermisches Potenzial

Unter der Voraussetzung, dass die benötigten Daten in oben beschriebener Form vorliegen, kann das noch verfügbare geothermische Potenzial durch Verrechnung des ungestörten mit dem bereits genutzten Potenzial erfolgen. Diese Größe ist am Ende ausschlaggebend bei der Beurteilung eines Standorts.

A7 AUSLEGUNGSPRAXIS

Im folgenden Kapitel wird auf die spezifische Entzugsleistung sowie den Abstand zwischen benachbarten Sonden als wichtige Bestandteile der Auslegungspraxis eingegangen. In der jeweiligen Ausprägung sind die verfügbaren Daten zu beiden Punkten nur unter den getroffenen Rahmenbedingungen und Einschränkungen gültig. Mit dem Ziel, das Auslegungsverfahren einfacher und zuverlässiger zu gestalten sowie die Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Anlagen zu erhöhen, wird eine Erweiterung der Datenbasis beider Punkte angeregt.

A7.1 Spezifische Entzugsleistung

Wie bereits in den Kapiteln A2.3, A2.4 und A3.8 dieser Studie erläutert wurde, unterliegen die derzeitig verfügbaren Tabellenwerke und empirischen Gleichungen zur spezifischen Entzugsleistungen einigen Einschränkungen. Daher wird die Erweiterung der Datenbasis zur Erhöhung der Genauigkeit und Berücksichtigung weiterer relevanter Einflussgrößen durch Studien auf Basis geeigneter numerischer Modelle angeregt. Unter anderem sollte der COP-abhängige, dynamische Einfluss der Wärmepumpe auf die thermische Last der EWS berücksichtigt werden. Da die von der Rücklauftemperatur abhängigen COP-Kurven verschiedener Wärmepumpenmodelle ähnlich sind, kann hierfür eine durchschnittliche „Modell“-Kurve verwendet werden. Weiterhin sind verschiedene Wärmepumpenleistungen sowie die Betriebsart (zusätzliche Kühlung) und die Sondenanzahl zu berücksichtigen. Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Grundwasserfließgeschwindigkeit. Zusammen mit den thermischen Parametern des Untergrundes ergibt sich eine große Anzahl von Parameterkombinationen. Auch hier ist eine automatisierte Modellerstellung, Simulation und Auswertung denkbar. Analog zum geothermischen Potenzial (vgl. Kapitel A6.1 dieser Studie) ist je nach Umfang der numerischen Studie eine Bereitstellung der Ergebnisse als Datenbank oder empirische Gleichung denkbar. Wie bereits üblich, könnten nach erfolgter Zuordnung der spezifischen Entzugsleistungen zu den lokalen (hydro-)geologischen Verhältnissen für verschiedene Parameterkombinationen entsprechende Layer in einer Kartenanwendung bereitgestellt werden.

A7.2 Abstände zwischen Sonden sowie zwischen benachbarten Anlagen

In den Kapiteln A2.4 und A4.2.2 dieser Studie wurde eingehend dargelegt, dass der Einflussbereich von EWS im Wesentlichen von der Leistung der Wärmepumpenanlage, der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes sowie der möglicherweise vorhandenen Grundwasserströmung abhängt. Liegen einzelne Sonden bzw. Anlagen im Einflussbereich anderer Sonden/Anlagen, ist durch die geringere Untergrundtemperatur eine verringerte Effizienz derart beeinflusster Systemkomponenten zu erwarten. Für die Abschätzung des erforderlichen Abstands zwischen zwei Anlagen ist ein Grenzwert der Temperaturabsenkung infolge des EWS-Betriebs im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur sinnvoll, bei dem die Effizienz der benachbarten Anlage nicht signifikant beeinträchtigt wird. Je nach Leistung, Wärmeleitfähigkeit und Strömungsgeschwindigkeit verschiebt sich die Distanz zwischen der Sonde und dem Punkt, an dem der Grenzwert eingehalten wird. Zur Ermittlung sinnvoller Abstandswerte als Funktion der genannten Einflussgrößen wird die Durchführung einer Studie basierend auf numerischen Modellen angeregt.

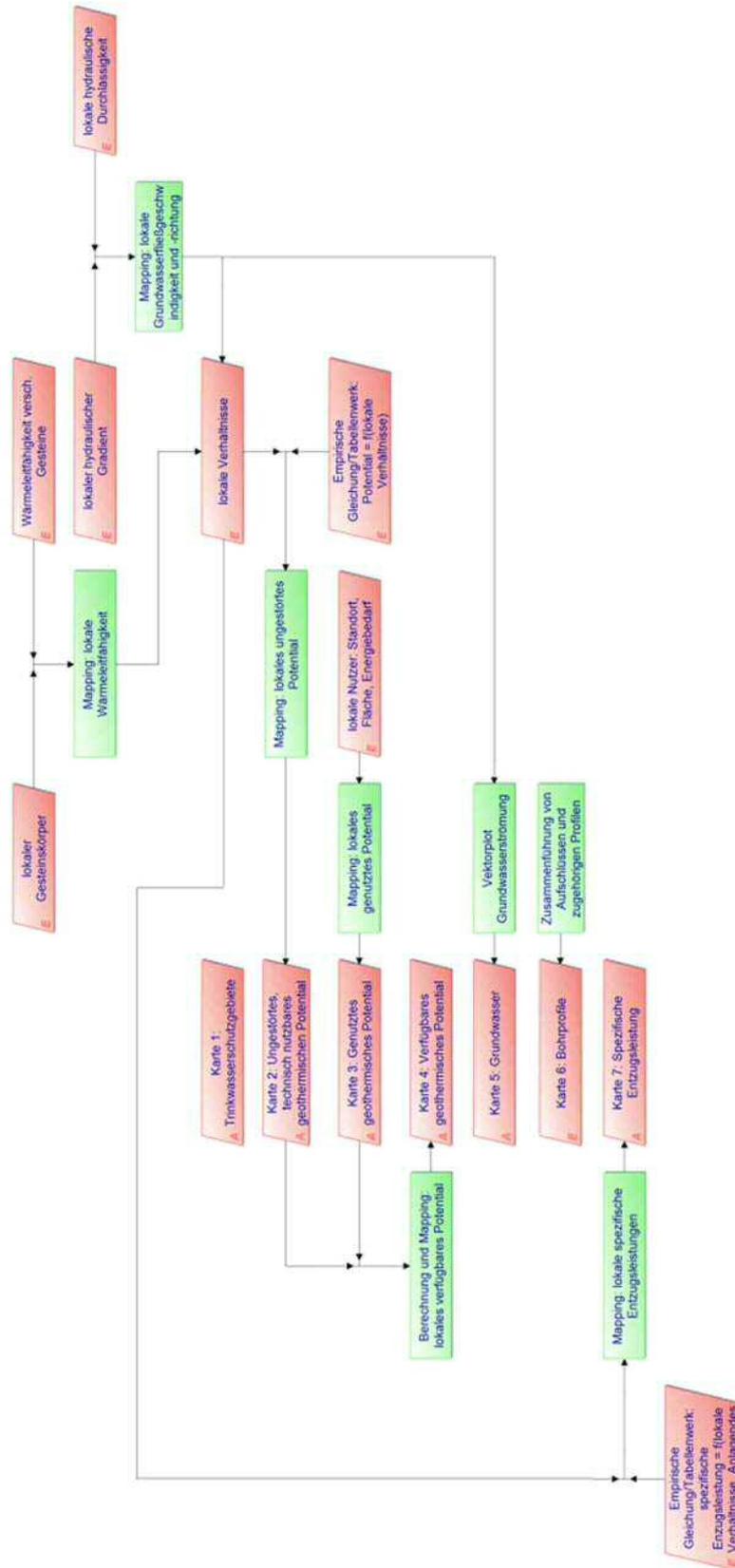


Abbildung 9: Strukturskizze für ein potenzielles Kartenwerk zur Unterstützung der Planung oberflächennaher Geothermiesysteme.

A8 ZUSAMMENFASSUNG

Die Analyse des derzeitigen Standes der Technik im Rahmen des Forschungsprojekts SAGS sowie anderer Studien zeigt, dass eine zweckmäßige Vereinheitlichung und Ergänzung der Auslegungspraxis für Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen weitere Fortschritte bei der Steigerung deren Nachhaltigkeit und Effizienz erwarten lässt. In diesem Zusammenhang wurde ein erweiterter Workflow zur Standortbewertung, Planung und (Vor-)Auslegung entsprechender Anlagen skizziert. Die Vervollständigung standardisierter Vorgehensweisen auf Basis der hier vorgestellten Arbeitsschritte wird angeregt. Weiterhin zeigt eine Analyse der Datenbasis zur oberflächennahen Geothermie, dass Qualität und Quantität der bereitgestellten Daten teilweise deutliche Unterschiede aufweisen. Zur Unterstützung der Standortbewertung und zur Auslegung wird die Entwicklung einheitlich gestalteter Datenbanken zur oberflächennahen Geothermie auf der Basis einer interaktiven, web-basierten Kartenanwendung angeregt. Weiterhin sollten möglichst flächendeckende Daten zum geothermischen Potenzial erhoben sowie die Datenbasis zur spezifischen Entzugsleistung erweitert werden. In Abb. 9 ist eine mögliche Struktur eines entsprechenden Kartenwerks mit den benötigten Eingangsdaten skizziert. Als ein Hauptaspekt der Ergebnisse dieser Studie im Rahmen des Forschungsprojekts SAGS zeigt es sich, dass weniger fehlende Workflows und/oder regulatorische Vorgaben in der aktuellen Auslegungspraxis für oberflächennahe Geothermie mitunter zu unbefriedigenden Prognosen über den Betrieb entsprechender Anlagen führen, wenngleich deren Vereinheitlichung und Ergänzung zweckmäßig sind. Vielmehr wird angeregt, Finanzierungsmodelle sowie spezifische Instrumentarien zur vollständigen Umsetzung der Auslegungsrichtlinien und -empfehlungen für Erdwärmesonden(systeme), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen zu verbessern. Speziell betrifft dies Erkundungs- und Monitoringtechnologien sowie -anforderungen aber auch prognostizierende Studien, für die eine verstärkte Nutzung numerischer Simulationstechniken angeregt wird.

A9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Ausschnitt aus einer interaktiven Karte zu Wasserschutzgebieten in Sachsen.....	85
Abbildung 2: Ausschnitt aus einer interaktiven Karte zu Bohrungen und Aufschlüssen in Sachsen.....	86
Abbildung 3: Ausschnitt aus einer interaktiven Karte zur mittleren hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes in Sachsen.	87
Abbildung 4: Flussdiagramm für einen Workflow zur Standortbewertung, Planung und Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen.	91
Abbildung 5: Prinzipskizze Dual-Continuum-Approach zur Integration von EWS in dreidimensionale Berechnungsgebiete im Rahmen von Finite-Elemente-Ansätzen.	95
Abbildung 6: Beispiel für eine Finite-Elemente-Vernetzung eines numerischen EWS-Modells.	97
Abbildung 7: Beispiel für die Berechnung von Vor- und Rücklauftemperaturen einer Erdwärmesonde.....	99
Abbildung 8: Isoflächendarstellung der Untergrundtemperatur in verschiedenen Schnitten eines EWS-Systems.	100
Abbildung 9: Strukturskizze für ein potenzielles Kartenwerk zur Unterstützung der Planung oberflächennaher Geothermiesysteme.....	105

A10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Inhalte der Geothermie-Leitfäden der Bundesländer.....	78
Tabelle 2: Informationen zur Planung oberflächennaher geothermischer Anlagen in Web-basierten Karten der Bundesländer.	80
Tabelle 3: Daten und Bezugsquellen für Standortbewertung, Planung und Auslegung..	84

A11 VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

BB	Brandenburg
BE	Berlin
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
COP	Coefficient of Performance (temperaturabhängige Leistungszahl von EWS)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EWS	Erdwärmesonde
HB	Bremen
HE	Hessen
HH	Hamburg
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NI	Niedersachsen
NRW	Nordrhein-Westfalen
RP	Rheinland-Pfalz
SAGS	Akronym BMBF-Vorhaben „Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme“
SGD	Staatliche Geologische Dienste Deutschlands
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
TH	Thüringen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

A12 LITERATUR

Angelotti A, Alberti L, La Licata I et al (2014) Energy performance and thermal impact of a borehole heat exchanger in a sandy aquifer: influence of the groundwater velocity. *Energy Convers Manage* 77:700-708

Arola T, Eskola L, Hellen J et al (2014) Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geotherm Energy* 2(1):1-20

Bandos TV, Montero A, Fernandez E et al (2009) Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics* 38(1):263-270

Bassetti S, Rohner E, Signorelli S et al (2006) Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden. Schlussbericht.

www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009159.pdf&name=000000260072.pdf. Zugriff 07. Juli 2016

Bechtel B (2015) A new global climatology of annual land surface temperature. *Remote Sens.* 7:2850-2870

Bundesverband Geothermie (2016a) Nutzung der Geothermie in Deutschland. www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/in-deutschland. Zugriff 07. Juli 2016

Bundesverband Geothermie (2016b) Richtlinien und Leitfäden zur Oberflächennahen Geothermie. www.geothermie.de/service/publikationen/leitfaeden-und-richtlinien-der-bundeslaender. Zugriff 07. Juli 2016

Casasso A, Sethi R (2014) Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: a sensitivity analysis. *Renewable Energy* 62:737-746

De Rosa M, Ruiz-Calvo F, Corberan JM et al (2015) A novel TRNSYS type for short-term borehole heat exchanger simulation: B2G model. *Energy Convers Manage* 100:347-357

Diersch H-J, Bauer D, Heidemann W et al (2011a) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: part 1. Fundamentals. *Comput Geosci* 37(8):1122-1135

Diersch H-J, Bauer D, Heidemann W et al (2011b) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: part 2. Numerical simulation. *Comput Geosci* 37(8):1136-1147

Deutscher Wetterdienst (2016) Climate Data Center. www.dwd.de/DE/leistungen/cdcftp/cdcftp. Zugriff 07. Juli 2016

Erdwärmeliga (2016) Leitfäden & Potenzialkarten. erdwaermeliga.de/leitfaeden. Zugriff 07. Juli 2016

FEFLOW (2016) <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>. Zugriff 07. Juli 2016

Freudenstein K, Lutz B (2016) Modellierung von Wärmeströmen im Boden infolge geothermischer Nutzung.

https://www.beuth-ochschule.de/fileadmin/oe/forschung/forschungsassistenz/Forschungsassistenz_06/tt_fa_06_freudenstein_endbericht.pdf. Zugriff 07. Juli 2016

Hähnlein S, Blum P, Bayer P (2011) Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser* 16(2):69-75

Hein P, Kolditz O, Görke U-J et al (2016a) A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl Therm Eng* 100:421-433

Hein P, Zhu K, Bucher A et al (2016b) Quantification of exploitable shallow geothermal energy by using Borehole Heat Exchanger coupled Ground Source Heat Pump systems. *Energy Convers Manage* 127:80-89

Hein P, Zhu K, Bucher A et al (2016c) Technically exploitable geothermal energy by using Borehole Heat Exchangers: A revisit of the Cologne case. Eingereicht bei *Geotherm Energy*

Höltling B, Coldewey WG (2013) *Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*, 8. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg

Huber A, Pahud D (1999) *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?* Schlussbericht

Kolditz O (2002) *Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics*. Springer, Berlin Heidelberg

Kolditz O, Bauer S, Bilke L et al (2012) OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydromechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environ Earth Sci* 67(2):589-599

Kurevija T, Vulin D, Krapec V (2011) Influence of undisturbed ground temperature and geothermal gradient on the sizing of borehole heat exchangers. In: *Proceedings of the World Renewable Energy Congress*, Linköping, May 2011, pp 1360-1367

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2015) *Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW, Teil 4 – Geothermie*. LANUV-Fachbericht 40

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (2016) *Fachinformationssystem Geophysik*. www.fis-geophysik.de. Zugriff 07. Juli 2016

Luo J, Rohn J, Bayer M et al (2014) Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface. *Appl Energy* 123:55-65

Molina-Giraldo N, Blum P, Zhu K et al (2011) A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection. *Int J Therm Sci* 50:2506-2513

Pannike S, Kölling M, Schulz HD (2006) Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefähnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. *Grundwasser* 11(1):6-18

Panteleit B, Reichling J (2006) Automatisierte Attribuierung von Bohrungsdaten mit Parametern zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen. *Grundwasser* 11(1):19-26

Personenkreis Geothermie der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie (2011) *Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern*

Personenkreis Oberflächennahe Geothermie der Ad-hoc-AG Hydrogeologie (2008) *Sachstandsbericht für einen bundeseinheitlichen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung oberflächennaher geothermischer Daten*

PEST (2016). www.pesthomepage.org. Zugriff 07. Juli 2016

Rivera JA, Blum P, Bayer P (2015) Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers. *Appl Energy* 146:421-433

Sanner B (1999) Kann man Erdwärmesonden mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen? *Geothermische Energie* 26/27:1-4

Shao H, Hein P, Sachse A et al (2016) OpenGeoSys-Tutorial: Shallow Geothermal Systems - Modeling Heat Transport Process in response to Borehole Heat Exchangers. Springer, Berlin Heidelberg

Stauffer F, Bayer P, Blum P (2014) Thermal use of shallow groundwater. CRC Press

Stober I, Bucher K (2014) Geothermie. 2. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg

TRNSYS (2016). www.trnsys.com. Zugriff 07. Juli 2016

Verein Deutscher Ingenieure (2015) VDI Richtlinie 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds – Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Entwurf, Beuth-Verlag, Berlin

Vienken T, Schelenz S, Rink K et al (2015) Sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface – a critical view on the status quo. *Groundwater* 53(3):356-361

Zhang Y, Soga K, Choudhary R (2014) Shallow geothermal energy application with GSHPs at city scale: study on the City of Westminster, *Géotechnique Letters* 4(2):125-131

Zheng T, Shao H, Schelenz S et al (2016) Efficiency and economic analysis of utilizing latent heat from groundwater freezing in the context of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl Therm Eng* 105:314-326

Zhu K, Blum P, Ferguson G et al (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ Res Lett* 5(4):044002

PEST (2016). www.pesthomepage.org. Zugriff 07. Juli 2016

A13 HAFTUNGS AUSSCHLUSS

Die Autoren erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit der in dieser Studie bearbeiteten Themen. Des Weiteren übernehmen die Autoren keine Haftung für Schäden etc., die infolge der Verwendung dieser Studie sowie der formulierten Anregungen zur Anpassung der aktuellen Auslegungspraxis entstehen. Die dargelegten Themenbereiche sind Gegenstand der Forschung.

Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung GmbH – UFZ
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig
www.ufz.de

NICHT ZUM VERKAUF BESTIMMT.