



Anke Bucher · Haibing Shao ·
Rüdiger Grimm · Stephan Schönfelder ·
Jakob Randow · Thomas Vienken ·
Karsten Rink · Konstanze Zschoke *Hrsg.*

EASyQuart

Energieeffiziente Auslegung
und Planung dezentraler
Versorgungsnetze von Stadtquartieren

Heizen und Kühlen unter Nutzung
oberflächennaher geologischer
Ressourcen

OPEN ACCESS



Springer Spektrum

EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren

Anke Bucher · Haibing Shao ·
Rüdiger Grimm · Stephan Schönfelder ·
Jakob Randow · Thomas Vienken ·
Karsten Rink · Konstanze Zschoke
(Hrsg.)

EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren

Heizen und Kühlen unter Nutzung
oberflächennaher geologischer
Ressourcen

 Springer Spektrum

Hrsg.

Anke Bucher
Institut für Entwicklungsorientierten
Maschinenbau
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur
Leipzig, Deutschland

Rüdiger Grimm
geoENERGIE Konzept GmbH
Freiberg, Deutschland

Jakob Randow
Institut für Entwicklungsorientierten
Maschinenbau
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur
Leipzig, Deutschland

Karsten Rink
Umweltinformatik
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
Leipzig, Sachsen, Deutschland

Haibing Shao
Umweltinformatik
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
Leipzig, Deutschland

Stephan Schönfelder
Institut für Entwicklungsorientierten
Maschinenbau
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur
Leipzig, Deutschland

Thomas Vienken
Monitoring- und Erkundungstechnologien
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
GmbH, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf am
TU München Campus Straubing für
Biotechnologie und Nachhaltigkeit Straubing
Leipzig, Deutschland

Konstanze Zschoke
geoENERGIE Konzept GmbH
Freiberg, Deutschland



ISBN 978-3-662-67139-9 ISBN 978-3-662-67140-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2024. Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.

Open Access Dieses Buch wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Buch enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Simon Shah-Rohlfis

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Verbundvorhaben „Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes – EASyQuart“ wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Förderinitiative „EnEff.Gebäude.2050 – Innovative orhaben für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand 2050“ unter dem Förderkennzeichen 03EGB0016A-C gefördert. EnEff.Gebäude.2050 ist Teil des 7. Energieforschungsprogramms „Innovationen für die Energiewende“ der Bundesregierung.

Wir bedanken uns herzlich für die Förderung des Verbundvorhabens.

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Geförderte Verbundpartner



Beiträge

Wir bedanken uns für Beiträge zum Verbundvorhaben EASyQuart bei (in alphabetischer Reihenfolge):

- Anke Bucher (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Uwe-Jens Görke (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig)
- Rüdiger Grimm (geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg)
- Nele Hastreiter (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Technische Universität München Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit)
- Steve Henker (geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg)
- Max Jäschke (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Olaf Kolditz (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; Technische Universität Dresden)
- Paula Kroll (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Katrin Lubashevsky (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Marco Pohle (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig)
- Jakob Randow (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Paul Remmler (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig)
- Simon Richter (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Karsten Rink (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; OpenGeoSys Kernentwicklerteam)
- Paul Satke (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Stephan Schönfelder (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig)
- Haibing Shao (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; Technische Universität Bergakademie Freiberg)
- Thomas Vienken (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Technische Universität München Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit)

-
- Ulrike Werban (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig)
 - H. Konstanze Zschoke (geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung in das Verbundvorhaben Easyquart	1
Anke Bucher, Uwe-Jens Görke, Rüdiger Grimm, Nele Hastreiter, Olaf Kolditz, Katrin Lubashevsky, Jakob Randow, Simon Richter, Karsten Rink, Stephan Schönfelder, Haibing Shao, Thomas Vienken und H. Konstanze Zschoke	
1.1 Motivation und Aufgabenstellung	2
1.2 Verbundpartner und deren Expertise	5
1.3 Struktur und inhaltlicher Ansatz des Vorhabens	13
1.4 Abriss zum Stand des Wissens vor und während der Laufzeit von EASyQuart	24
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Initiativen	33
Literatur	37
2 Standorte und Standortmodelle	45
Steve Henker, Nele Hastreiter, Jakob Randow, Karsten Rink, Paul Satke, Thomas Vienken, H. Konstanze Zschoke und Rüdiger Grimm	
2.1 Berlin-Weißensee	47
2.2 Offenbach-Kaiserlei	47
2.3 Kiel-Wik	48
2.4 Köln-Junkersdorf	48
2.5 Untersuchungsfläche im Rhein-Main-Gebiet	49
2.6 Berlin-Gesundbrunnen	49
2.7 Testfeld des UFZ in Leipzig	50
2.8 Wüstenrot	50
2.9 Sonstige	51
Literatur	51
3 Erkundung und Monitoring auf Quartiersebene	53
Nele Hastreiter, Steve Henker, Marco Pohle, Ulrike Werban und Thomas Vienken	
3.1 Anforderungen an Erkundung und Monitoring	53
3.2 Erkundung	56

3.3	Weiterentwicklung von Erkundungsmethoden	67
3.4	Monitoring	70
	Literatur	83
4	Analyse von Untergrundkomponenten	85
	Simon Richter, Katrin Lubashevsky, Jakob Randow, Steve Henker, H. Konstanze Zschoke und Anke Bucher	
4.1	Sensitivitätsstudien	86
4.2	Numerische Unsicherheitsanalysen	124
4.3	Potenzielle Optimierungsstrategien für die Auslegung untertägiger Systemkomponenten	138
	Literatur	146
5	Analyse von Haustechnikkomponenten	149
	Paul Satke, Jakob Randow, Max Jäschke und Stephan Schönfelder	
5.1	Simulation von Lastfällen für Stadtquartiere	150
5.2	Effizienzanalysen des energetischen Gesamtsystems	185
	Literatur	198
6	Benchmarks	201
	Simon Richter, Jakob Randow, Haibing Shao, Katrin Lubashevsky, Steve Henker und Anke Bucher	
6.1	Simulation von Thermal-Response-Tests	202
6.2	Erdwärmesondenfeld in Berlin	218
6.3	Dispersivitätsparameter in OpenGeoSys	228
	Literatur	235
7	Systemintegration	239
	Karsten Rink, Rüdiger Grimm, Nele Hastreiter, Paula Kroll, Paul Remmler, Haibing Shao und H. Konstanze Zschoke	
7.1	Visuelle Daten- und Modellintegration	240
7.2	Gestaltung eines Entscheidungshilfesystems	254
7.3	Empfehlungen zur Anpassung regulativer Rahmenbedingungen	263
7.4	Datenmanagement	269
	Literatur	272
8	Fazit und Ausblick	275
	Jakob Randow, Anke Bucher, Uwe-Jens Görke, Rüdiger Grimm, Nele Hastreiter, Olaf Kolditz, Katrin Lubashevsky, Simon Richter, Karsten Rink, Stephan Schönfelder, Haibing Shao, Thomas Vienken und H. Konstanze Zschoke	
8.1	Fazit	276
8.2	Ausblick	278
8.3	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	280

A	Beschreibung verwendeter Softwareprodukte	285
B	Symbolverzeichnis	293
C	Stichwortverzeichnis	297

Abkürzungsverzeichnis

ANGUS+	Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher im Kontext der Energiewende – Dimensionierung, Risikoanalysen und Auswirkungsprognosen als Grundlagen einer zukünftigen Raumplanung des Untergrundes – ein Leuchtturmprojekt der Förderinitiative „Energiespeicher“
ANGUSII	Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher thm/ c– Integration unterirdischer Speichertechnologien in die Energiesystemtransformation am Beispiel des Modellgebietes Schleswig-Holstein
API	Application Programming Interface
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BB	Brandenburg
BBergG	Bundesberggesetz
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BE	Berlin
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BHE	Erdwärmesonden – eng. Borehole Heat Exchanger
BIM	Building Information Modeling
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BVG	Bundesverband Geothermie e.V.
BW	Baden-Württemberg
BWP	Bundesverband Wärmepumpe e.V.
BY	Bayern
CAES	Compressed Air Energy Storage
CDC	Climate Data Center
CO ₂ MAN	CO ₂ -Reservoirmanagement
COP	Leistungszahl der Wärmepumpe – eng. Coefficient of Performance
DA	Dual Annealing
DE	Differential Evolution

DHWS	Trinkwarmwasserspeicher – eng. Domestic Hot Water Storage
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaft
DoE	Statistische Versuchsplanung eng. Design of Experiment
DP	Direct Push
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWD	Deutscher Wetterdienst
EASyQuart	Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes
EED	Earth Energy Designer
EFH	Einfamilienhaus
EGEC	European Geothermal Energy Council
EnEff:Stadt	Energieeffiziente Stadt
ENVINF	Umweltinformatik
EnVisaGe	Kommunale netzgebundene Energieversorgung – Vision 2020 am Beispiel der Gemeinde Wüstenrot
ETRT	Enhanced-Thermal-Response-Test
EWS	Erdwärmesonde
FE-Modell	Finite-Elemente-Modell
FEFLOW	Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System
FEM	Finite-Elemente-Methode
FHE	Fußbodenheizung – eng. Floor Heat Exchanger
FMI	Functional Mock-up Interface
FMI4BIM	Standardisierte Schnittstelle für Analysemodelle von Anlagen- und Gebäudekomponenten für BIM-basierte Planung und Betrieb
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GeoPLASMA-CE	Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe
GOK	Geländeoberkante
GTZ	Gradtagszahl
GWM	Grundwassermessstelle
HB	Hansestadt Bremen
HCS	HeatCoolSupply
HE	Hessen
HFT	Hochschule für Technik
HGHE	Horizontaler Erdwärmekollektor – eng. Horizontal Ground Heat Exchanger
HH	Hansestadt Hamburg
HP	Wärmepumpe – eng. Heat Pump
HPT	Hydraulic Profiling Tool

HT-ATES	High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage
HTWK	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
IGLU	Untersuchung, Modellierung und Bewertung eines intelligenten geothermischen Langzeitwärmespeichers mit umweltneutralem Verhalten
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
LHS	Latin-Hypercube-Sampling
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
LW	Leckagewächter
MET	Monitoring und Erkundungstechnologien
MOSAIC	MOdel driven Site Assessment, Information, and Control
MV	Mecklenburg Vorpommern
NeI	NetworkInterface
NI	Niedersachsen
NRW	Nordrhein-Westfalen
OGS	OpenGeoSys
OVAT	One-Variable-at-A-Time
PROTECT	Prediction of Deformation to Ensure Carbon Traps
Proxy-Modell	Durch maschinelles Lernen approximiertes Modell
RAM	Random-Access Memory
RP	Rheinland Pfalz
SAGS	Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme
SH	Schleswig-Holstein
SHBIC	SimpleHeatedBuildingIntCooling
SHGO	Simplicial Homology Global Optimisation
SHWS	Heizungspufferspeicher – eng. Space Heating Water Storage
SIMULTAN	Subrosion und Erdfall-Instabilität: integrierte MULTi-skalige Überwachung und Analyse
SL	Saarland
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
TestUM-Aquifer	Geophysikalisches und hydrogeologisches Testfeld zur Untersuchung und zum Monitoring durch die Nutzung des Untergrundes induzierter reaktiver Mehrphasentransportprozesse in oberflächennahen Aquiferen
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TH	Thüringen
THM/C	Thermisch-Hydraulisch-Mechanisch/Chemisch
TRT	Thermal-Response-Test
TRY	Test Reference Year
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH

VAwS	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WP	Wärmepumpe



Einführung in das Verbundvorhaben Easyquart

1

Anke Bucher, Uwe-Jens Görke, Rüdiger Grimm, Nele Hastreiter,
Olaf Kolditz, Katrin Lubashevsky, Jakob Randow, Simon Richter,
Karsten Rink, Stephan Schönfelder, Haibing Shao, Thomas Vienken
und H. Konstanze Zschoke

A. Bucher (✉) · K. Lubashevsky · J. Randow · S. Richter · S. Schönfelder
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: anke.bucher@htwk-leipzig.de

K. Lubashevsky
E-mail: katrin.lubashevsky@htwk-leipzig.de

J. Randow
E-mail: jakob.randow@htwk-leipzig.de

S. Richter
E-mail: simon.richter@htwk-leipzig.de

S. Schönfelder
E-mail: stephan.schoenfelder@htwk-leipzig.de

U.-J. Görke
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland
E-mail: uwe-jens.goerke@ufz.de

R. Grimm · H. K. Zschoke
geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland
E-mail: grimm@geoenergie-konzept.de

H. K. Zschoke
E-mail: zschoke@geoenergie-konzept.de

N. Hastreiter · T. Vienken
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig;
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Technische Universität München Campus Straubing für
Biotechnologie und Nachhaltigkeit, Dresden, Deutschland
E-mail: nele.hastreiter@ufz.de

T. Vienken
E-mail: thomas.vienken@ufz.de

O. Kolditz
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; Technische Universität,
Dresden, Deutschland
E-mail: olaf.kolditz@ufz.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung
dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_1

1.1 Motivation und Aufgabenstellung

Im Jahre 2015 wohnten etwa 75 % der deutschen Bevölkerung in Städten (Statista 2018). Entsprechend dem Ziel des Energiekonzepts der Bundesregierung (Bundesregierung 2018), den Gebäudebestandteil bis 2050 nahezu klimaneutral zu gestalten, spielen städtische Quartiere eine herausragende Rolle bei der Steigerung von Energieeffizienz und somit der Senkung von Schadstoffemissionen. Laut Angaben des Umweltbundesamtes betrug der Anteil von Wärme/Kälte im Jahr 2012 knapp 51 % am Endenergieverbrauch in Deutschland. In privaten Haushalten ist der thermische Anteil mit bis zu 80 %, gemessen am Verbrauch von Endenergie, noch deutlich größer. Davon stammten 2016 lediglich 13,4 % aus erneuerbaren Quellen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022), mit einem seit 2012 nahezu stagnierenden Anteil. Diese Zahlen verdeutlichen das große Effizienzpotenzial von Stadtquartieren im Wärmesektor und deren Schlüsselrolle im Prozess der Energiewende.

Obwohl die Fernwärmeversorgung bereits einen deutlichen Fortschritt bei der Nutzung von Niedrig-Energie-Technologien darstellt, beruht sie in der Regel nicht auf erneuerbaren Quellen und kann für kleinere oder auch entlegene Quartiere unwirtschaftlich sein. Daher kommt der dezentralen Wärmeversorgung von Stadtquartieren eine wachsende Bedeutung zu. Ein grundlastfähiges, direkt nutzbares lokales thermisches Potenzial bietet dabei insbesondere der oberflächennahe geologische Raum. Dieses Potenzial wird in Deutschland in der Regel unter Einsatz von Wärmepumpen genutzt. Folglich ist deren optimierte Betriebsweise ausschlaggebend für einen niedrigen Primärenergieverbrauch sowie die wirtschaftliche Nutzung geothermischer Ressourcen. Zukunftsorientierte Konzepte für die Versorgung von Stadtquartieren mit großflächigen Netzwerken basieren auf adaptiver Erschließung geothermischer Potenziale des Gesamtgebiets unter Berücksichtigung der geologischen Gegebenheiten. Dabei kann es sich z. B. als sinnvoll erweisen, die gesamten untertägigen geothermischen Installationen in einem Bereich zu konzentrieren und dezentrale Quartiersnetze für die Wärme- und Kälteversorgung zu realisieren, statt jedes einzelne Gebäude individuell gebäudenah zu versorgen. Damit verbunden ist die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle zum Bau und Betrieb oberflächennaher geothermischer Anlagen, wenn diese nicht notwendig auf dem Grundstück des Eigentümers der Immobilie errichtet werden. Rechtliche Rahmenbedingungen wie das Bundesberggesetz (BBergG) sind hierbei zu beachten.

K. Rink

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; OpenGeoSys
Kernentwicklerteam, Leipzig, Deutschland
E-mail: karsten.rink@ufz.de

H. Shao

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; Technische Universität
Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland
E-mail: haibing.shao@ufz.de

Für den oberflächennahen geologischen Raum wird es zukünftig insbesondere im Rahmen von Maßnahmen zur Minderung von Auswirkungen der Klimaveränderungen vorrangig im urbanen Bereich bedeutsamer, seine Rolle als Quelle thermischer Energie um Aspekte zu deren Speicherung zu ergänzen (u. a. zur thermischen Regeneration des Untergrunds bei geringer Grundwasserströmung). Bei Stadtquartieren in Mischbebauung (z.B. Wohnen, Gewerbe, öffentlicher Raum) können vielfältige untertägige Nutzungsoptionen zur Wärmegewinnung und Wärmespeicherung in Versorgungsstrukturen eingebunden werden. Die optimale energieeffiziente Dimensionierung eines Gesamtversorgungsnetzes zum Heizen und Kühlen stellt wegen der spezifischen Lastprofile für unterschiedliche Gebäudearten eine besondere Herausforderung dar. Daher sollten Planungsprozesse durch innovative Erkundungs- und Monitoringverfahren sowie numerische Simulationen und moderne Visualisierungsangebote unterstützt werden.

Gegenstand des von den Verbundpartnern (siehe Abschn. 1.2) im Projekt „Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes (EASyQuart)“ praktizierten interdisziplinären Ansatzes war die Entwicklung eines standortbezogenen daten- und wissensbasierten Entscheidungshilfesystems in Bezug auf das Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen. In dem hier verwendeten Sinn stellt das Entscheidungshilfesystem einen Handlungsleitfaden dar, der optimierte Strukturen formuliert, welcher Akteur zu welchem Zeitpunkt in Abhängigkeit von den spezifischen Standortbedingungen mit welchen Instrumentarien im Auslegungsprozess in welcher Weise aktiv werden sollte. Damit wird eine koordinierte geothermische Erschließung gesamter Stadtquartiere ermöglicht. Das Entscheidungshilfesystem basiert auf der Entwicklung und Erweiterung von Workflows, Bewertungskriterien und praxistauglichen wissenschaftlichen Komponenten, die wesentlich über in der aktuellen Auslegungspraxis verwendete Strukturen und einzelne Prognoseinstrumentarien hinausgehen. Es beinhaltet dabei auch die Flexibilisierung von Dimensionierungsprozeduren, Auslegungsverfahren und regulativen Rahmenbedingungen in Form von Handlungsempfehlungen. Der Einsatz des Entscheidungshilfesystems kann in einer frühen Phase der Entwicklung von Quartiersprojekten für die Erstellung von Machbarkeitsstudien sowie auch im eigentlichen Planungsprozess erfolgen (vgl. Abb. 1.1).

Zu den wissenschaftlichen und technischen Komponenten, die in das Entscheidungshilfesystem zur Dimensionierung klein- und großflächiger oberflächennaher geothermischer Systeme im Rahmen von EASyQuart eingebracht wurden, zählen innovative Verfahren

- für die geophysikalische Erkundung und das Monitoring im Untergrund sowie der Haustechnik zur standortbasierten Analyse der Versorgungs- und Bedarfsseite,
- für die numerische Simulation der komplexen Prozesse im Untergrund und in der Haustechnik inklusive deren Kopplung sowie
- für die integrierte 3D-Visualisierung heterogener Daten.

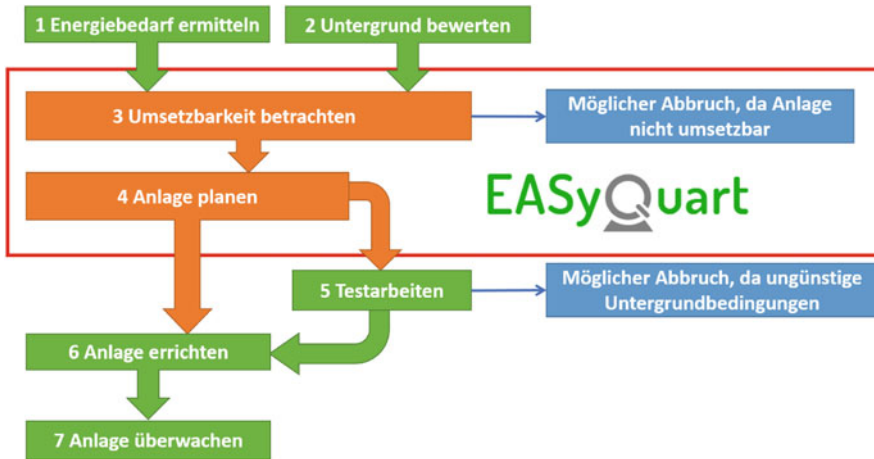


Abb. 1.1 Schematische Darstellung des Planungs- und Betriebsablaufs bei oberflächennahen Geothermiesystemen sowie der von EASyQuart betrachteten Arbeitsschritte

Diese Instrumentarien basieren auf dem aktuellen Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie kommerzieller Angebote. Die dadurch verbesserten und neu entwickelten Workflows, Verfahren, Plattformen und Softwarekomponenten stellen beispielhafte Lösungen für Prognoseinstrumentarien dar, deren Nutzung den Akteuren eines Auslegungs- und Dimensionierungsprozesses für Machbarkeitsstudien oder Planungen empfohlen werden und somit Standards zum Teil neu definieren. Die Projektergebnisse wurden in spezifischen Analysen für die repräsentativen Nutzungsoptionen Wärmegewinnung (z. B. Heizen von Wohn- oder Gewerbebauten sowie öffentlichen Gebäuden mit unterschiedlichen Bedarfscharakteristika) und Wärmespeicherung (z. B. thermische Regeneration des Untergrunds nach vorherigem geothermischem Wärmeentzug verbunden mit Gebäudekühlung) auf ihre Eignung und ihren Leistungsumfang getestet. Für die Parametrisierung von Simulationsmodellen des Untergrunds und der Haustechnik sowie zur Evaluierung einzelner Projektergebnisse wurden Analysen an Demonstrationsstandorten genutzt.

Neben der Entwicklung und Evaluierung spezifischer Planungsinstrumentarien hatten die Forschungsarbeiten in EASyQuart gleichzeitig zum Ziel, das prinzipielle Prozess-, Methoden- und Systemverständnis der betrachteten geothermischen Systeme als Voraussetzung für zuverlässige Planungsprozesse zur energieeffizienten und ökologisch nachhaltigen Gebäudeversorgung mit thermischer Energie basierend auf regenerativen Quellen zu verbessern. Für das spezifische Prozessverständnis wurden auf der Basis geeigneter Labor- und Felduntersuchungen die physikalischen Effekte im Untergrund und in der Haustechnik untersucht, die typisch für definierte Nutzungsoptionen zum Heizen und Kühlen von Referenzgebäuden unterschiedlichen Typs sind und somit auch signifikant für den Planungsprozess sein können. Ein wesentliches wissenschaftlich-technisches Ziel für das Methodenverständnis zur Auswahl geeigneter Prognoseinstrumentarien bestand in der Analyse von Potenzialen

und Limitierungen unterschiedlicher spezifischer Komponenten des Entscheidungshilfesystems (z. B. Verfahren zur Erkundung, Monitoring und der numerischen Simulation von Prozessen im Untergrund und in der Haustechnik). Die auf Basis von Daten und Erkenntnissen von Erkundungs- und Monitoringarbeiten an Demonstrationsstandorten durchgeführten Szenariensimulationen unterstützten die Beurteilung des Leistungsumfanges der betrachteten Prognoseinstrumentarien und halfen mit ihrer komplexen Modellgestaltung, das Systemverständnis der geothermischen Gesamtanlage bestehend aus Untergrund- und Haustechnikkomponenten zu verbessern.

Die Projektergebnisse von EASyQuart erlauben im Auslegungsprozess präzisere Aussagen zu Quantität, Qualität und Lokalisierung von Komponenten oberflächennaher Geothermiesysteme, als sie in der gegenwärtigen Praxis möglich sind und helfen somit, wirtschaftlich nachteilige Systemüber- oder Unterdimensionierungen zu vermeiden. Kriterien für die wirtschaftlich und ökologisch nachhaltige Systemdimensionierung sind dabei vorrangig die Einsparung von Primärenergie durch optimierte Betriebsregimes der Haustechnik, die Wirtschaftlichkeit der lokalen Wärmenetze sowie die ökologische Ressourcennutzung, insbesondere bezüglich der Minimierung einer Beeinflussung von Grundwassersystemen. Als konkrete Nutzung wurden in EASyQuart Erdwärmesondensysteme gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen adressiert. Eine Übertragung der standortunabhängigen Konzepte, Methoden und Ergebnisse auf vielfältige alternative geotechnische Nutzungsoptionen (z. B. Grundwassermanagement) ist problemlos möglich, da die grundlegenden Verfahren und Modelle zur Bearbeitung solcher Problemstellungen äquivalent zu den in EASyQuart entwickelten Komponenten sind.

1.2 Verbundpartner und deren Expertise

Das EASyQuart-Verbundkonsortium wurde von den drei Partnern geoENERGIE Konzept GmbH Freiberg, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) (Hauptsitz Leipzig) mit den Departments Monitoring und Erkundungstechnologien (MET) sowie Umweltinformatik (ENVINF) sowie Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK) mit den Professuren Angewandte Mechanik (HTWK-AM) sowie Simulation energetischer und technischer Systeme (HTWK-SetS) jeweils von der Fakultät Ingenieurwissenschaften gebildet. Die Koordination der Arbeit des Verbundes oblag der HTWK und jedem Arbeitspaket (siehe Abschn. 1.3) war jeweils einer der Verbundpartner als Arbeitspaketleiter zugeteilt.

Alle Verbundpartner verfügen über ausgewiesene Expertisen und Kompetenzen auf den jeweils von ihnen im Verbund bearbeiteten Fachgebieten. Das Konsortium bot daher aus fachlicher Sicht eine optimale, komplementäre Zusammensetzung zur wissenschaftlichen Bearbeitung der verschiedenen EASyQuart-Themenfelder. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Verbundpartnern sowie deren projektrelevanten Vorarbeiten werden im folgenden Überblick angegeben.

geoENERGIE Konzept GmbH

Die geoENERGIE Konzept GmbH mit Sitz in Freiberg/Sachsen wurde im Jahr 2007 gegründet und ist als Fachplaner auf dem Gebiet der Oberflächennahen Geothermie europaweit tätig. Das Leistungsspektrum umfasst dabei die gesamte Kette von Erstberatung über die eigentlichen Planungsstufen, die Durchführung von geothermischen Testarbeiten (z. B. Thermal-Response-Tests (TRT) und Temperaturlogs) und späterer Überwachung der Anlagen (Monitoring). Seit Firmengründung wurden bereits mehr als 500 TRT-Messungen durchgeführt. Zu den Referenzen zählen mehr als 2500 Geothermieprojekte – vom Einfamilienhaus bis hin zum Industriebau. Exemplarisch wurde die größte derzeit in Betrieb befindliche Erdwärmanlage Deutschlands, das Berufskolleg Duisburg, durch geoENERGIE Konzept geplant. Gegenwärtig befindet sich eine große Anzahl weiterer Quartierslösungen in unterschiedlichen Planungsstadien, wie beispielsweise:

- Quartier Kaiserlei Offenbach: Das Projekt Quartier Kaiserlei in Offenbach wird vom Unternehmen seit Beginn der Vorplanung über die Test- und Simulationsarbeiten bis zur Fertigstellung geplant und begleitet.
- Johannistor Residenz Leipzig: Für das Projekt mit Wohn- und Gewerbenutzung wurden geothermische Testarbeiten, die Planung des Sondenfeldes sowie eine thermohydrodynamische Modellierung durchgeführt.
- Ehemaliger Preußischer Freiladebahnhof Leipzig-Eutritzsch: Im Zuge der Vorbereitungen für einen Architektenwettbewerb wurde eine Machbarkeitsstudie mit Vorplanung für das gesamte geplante Quartier mit Wohn- und Gewerbeeinheiten sowie öffentlichen Einrichtungen erstellt.
- Alaunpark Dresden: Für das Projekt „Wohnen am Alaunpark“ wurden geothermische Testarbeiten durchgeführt und für die Ein- bzw. Mehrfamilienhäuser (insgesamt 280 kW Heizen) ein Sondenfeld mit insgesamt 32 Bohrungen (4500 Gesamtbohrmeter) geplant.
- Wohngebiet „Stadtblick“ Weimar: Für die Energieversorgung der Wohnsiedlung (311 kW Heizen und 180 kW Kühlen) wurden geothermische Testarbeiten durchgeführt und das Sondenfeld mit insgesamt 102 Sonden (6885 Gesamtbohrmeter) geplant.

Weitere Anwendungsfelder für das Unternehmen sind Gewerbebauten, Bürogebäude, öffentliche Gebäude (Schulen, Kitas, Turnhallen), Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie der Sanierungs-Wohnungsbau. Die Endkunden sind Architekten, Ingenieure, Bohrunternehmen, Bauherren sowie Projektentwickler. Der Geschäftsführer der geoENERGIE Konzept GmbH ist Mitglied des Erweiterten Vorstandes im Bundesverband Geothermie e. V. (BVG) und in der Fachgruppe Erdwärme beim Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP). Er vertritt zudem die Interessen des BVG auch als Mitglied im Board des European Geothermal Energy Council (EGEC).

Das Unternehmen ist durch eigene Vorarbeiten auf den projektrelevanten Fachgebieten Erkundungs- und Monitoringmethoden, numerische Simulation von Prozessen im Untergrund sowie thermische Gebäudesimulation einschlägig ausgewiesen. Diese Themengebiete gehören zu den Kernaspekten von Auslegungsprozessen ober-

flächennaher geothermischer Systeme, die das Unternehmen seit Jahren erfolgreich praktiziert. Damit der jeweils aktuelle wissenschaftlich-technische Entwicklungsstand in eine innovative Gestaltung der Dimensionierungsprozesse einfließen kann, unterstützt der Antragsteller aktiv relevante Forschungsaktivitäten auf verschiedenen Ebenen. Spezifische Arbeiten wurden und werden dazu im Rahmen der Erkundung und des Monitorings von Untergrundstrukturen und von Veränderungen im Untergrund, der Quantifizierung induzierter Effekte an Demonstrationsstandorten sowie der Vorbereitung, Durchführung und Analyse numerischer Simulationen der gekoppelten Prozesse im Untergrund sowie der Haustechnik geleistet. Weiterhin befasst sich das Unternehmen mit der Simulation von Energieanlagen und Energienetzen zur Prognose des Energiesystems. Beispielhaft werden nachfolgend einige spezifische Projektbeteiligungen des Unternehmens sowie deren Bezug zu EASyQuart näher erläutert:

- Im Rahmen des 2019 abgeschlossenen F&E-Vorhabens *Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe (GeoPLASMA-CE)* war geoENERGIE Konzept u. a. für die Validierung von Gesteinsparametern, die vergleichende Durchführung von Testarbeiten im Raum Vogtland sowie das Kommunikationsmanagement verantwortlich. Diese Untersuchungen waren ebenso wie zahlreiche Aktivitäten in unterschiedlichen Phasen realer Auslegungsprozeduren an verschiedenen Standorten methodische Grundlage für die in EASyQuart durchgeführten Forschungsarbeiten. Von besonderem Interesse waren dabei der Zugang zu Daten für die Validierung des entwickelten Prognoseinstrumentariums sowie deren Bewertung im Vergleich mit etablierten kommerziellen Lösungen, beispielsweise für die Standorterkundung, das Wirkungsmonitoring sowie die numerische Simulation von Prozessen in Untergrund und Haustechnik.
- Mit dem F&E-Projekt *Geothermie-Nomogramm (GT-NOM)* verfolgte das Unternehmen das Ziel, dem Endkunden ein ganzheitliches Projekt im Segment Einfamilienhäuser zu ermöglichen. Komplett neu wurde dabei ein Instrumentarium zur schnellen Vordimensionierung von Erdwärmesonden entwickelt. Der Kunde kann im Ergebnis aller Implementierungen ein Produkt „Erdwärme aus einer Hand“ kaufen. Dies stellt im Erdwärmesektor für den Bereich des Einfamilienhauses ein bisher nicht vorhandenes Arbeitsmittel dar. Bisher oft auftretende Schnittstellenprobleme zwischen den Gewerken können so vermieden werden.

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ

Am UFZ werden vielfältige Aufgabenstellungen der Klima-, Umwelt- und Energieforschung bearbeitet, deren Ergebnisse international anerkannt sind. Auf dem Energiesektor reicht dabei das Spektrum der behandelten Themen von der Prozessmodellierung und -simulation über die Entwicklung innovativer Strategien für das Impaktmonitoring bis zur Untersuchung sozioökonomischer Aspekte.

Das 2005 gegründete Department MET arbeitet an der Entwicklung von Technologien und Messkonzepten zur Erkundung des oberflächennahen Untergrunds. Zur Charakterisierung und dem Monitoring der betrachteten geologischen Räume wird

dabei die mobile Forschungsplattform Model driven Site Assessment, Information, and Control (MOSAIC) genutzt, welche eine Vielfalt nichtinvasiver und minimalinvasiver Methoden und Instrumentarien für die hochauflösende Erkundung komplexer Untergrundstrukturen und -prozesse umfasst. Zudem kann auf eine umfassende Ausstattung an geophysikalischer Ausrüstung und geringinvasiver Direct Push (DP) Sondiertechnik zurückgegriffen werden. Ein breites Forschungsfeld ist die kombinierte Nutzung von geophysikalischen Messkonzepten mit DP-Technologien zur Charakterisierung des Untergrunds. Diese ermöglichen beispielsweise die Umsetzung von schleppgeophysikalischen Messungen in Kombination mit DP gestützten, hochauflösenden Tiefenprofilen *in situ* gemessener geotechnischer oder hydrogeologischer Parameter. In den vergangenen Jahren wurde vom Department intensiv an der Entwicklung von Mess- und Monitoringkonzepten mit dem Fokus auf hydrogeologische Fragestellungen im Kontext einer nachhaltigen intensiven thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrunds geforscht.

Das Department ENVINF befasst sich seit seiner Gründung im Jahr 2007 mit der Entwicklung von numerischen Verfahren und Softwarekomponenten zur Simulation gekoppelter Prozesse in porösen Medien basierend auf der Methode der Finiten Elemente. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte liegen dabei in der Entwicklung numerischer Methoden für gekoppelte Mehrfeldprobleme sowie der Angewandten Informatik (Datenmanagement, Prozesssimulation, Visualisierung, Hochleistungsrechnen). Breiten Raum nehmen zudem Fragen der Entwicklung von Simulationsplattformen zur Behandlung dieser Problemstellungen sowie des Benchmarkings zur Modell- und Softwarevalidierung ein. Integraler Bestandteil dieser Plattformen sind Workflows und Systemkomponenten zur 3D-Visualisierung komplexer, heterogener Daten aus unterschiedlichen Quellen. In diesem Zusammenhang tritt das UFZ als Hauptentwickler und Koordinator des internationalen wissenschaftlichen Open-Source-Softwareprojekts OpenGeoSys (OGS) zur Berechnung Thermisch-Hydraulisch-Mechanisch/Chemisch (THM/C) gekoppelter Prozesse in geklüfteten, porösen Medien auf¹. Neben der Methoden- und Softwareentwicklung besteht ein ausgeprägter Bezug zu Anwendungen in der Hydrologie, der Geotechnik und der Energiespeicherforschung. Zur Steigerung der Effizienz numerischer Simulationen und für die anschauliche Ergebnisauswertung verfügt das UFZ über adäquate Kapazitäten zum Höchstleistungsrechnen und der wissenschaftlichen 3D-Visualisierung. Das Visualisierungszentrum VISLab des UFZ ist eine der größten Forschungsinfrastrukturen für die wissenschaftliche Visualisierung weltweit, mit einem spezifischen Schwerpunkt auf Umweltvisualisierungen².

Die Forschungseinrichtung ist durch eigene Vorarbeiten auf den projektrelevanten Fachgebieten Erkundungs- und Monitoringmethoden sowie wissenschaftliche 3D-Visualisierung einschlägig ausgewiesen und seit Jahren dazu in der Forschung erfolgreich aktiv. Übergeordnete Forschungsthemen und Anwendungsgebiete der vergangenen Jahre sind dabei neben der Tiefen und Oberflächennahen Geothermie

¹ www.opengeosys.org

² www.ufz.de/vislab

die Nutzung des geologischen Untergrunds als Massen- und Energiespeicher, die geologische CO₂-Einlagerung sowie das Grundwasser- und Altlastenmanagement. Spezifische Arbeiten wurden und werden dazu im Rahmen der Erkundung und des Monitorings von Untergrundstrukturen und von Veränderungen im Untergrund, der Quantifizierung induzierter Effekte in Labor- und Feldversuchen sowie des Datenmanagements für Vorbereitung, Durchführung und Analyse numerischer Simulationen der gekoppelten Prozesse im Untergrund inklusive der Struktur- und Ergebnisvisualisierung geleistet. Beispielhaft werden nachfolgend auch für das UFZ einige spezifische Projektbeteiligungen sowie deren Bezug zu EASyQuart näher erläutert:

- Im Rahmen des 2016 abgeschlossenen Verbundvorhabens „Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher im Kontext der Energiewende – Dimensionierung, Risikoanalysen und Auswirkungsprognosen als Grundlagen einer zukünftigen Raumplanung des Untergrundes – ein Leuchtturmprojekt der Förderinitiative „Energiespeicher“ (ANGUS+)“ arbeitete das Department MET an der Entwicklung von Erkundungskonzepten im Vorfeld der Installation und des Betriebs von Wärmespeichern im urbanen Raum sowie der Evaluierung von oberflächengeophysikalischen Methoden für das effiziente Speichermonitoring.
- Das Department ENVINF unterstützte im 2017 beendeten Forschungsprojekt „Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme (SAGS)“ unter Leitung der HTWK 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.
- Für das 2018 abgeschlossene Verbundvorhaben „Untersuchung, Modellierung und Bewertung eines intelligenten geothermischen Langzeitwärmespeichers mit umweltneutralem Verhalten (IGLU)“ entwickelte und testete das Department MET Strategien zur Erfassung und Quantifizierung möglicher Umweltauswirkungen eines geothermischen Langzeitwärmespeichers unter verschiedenen Betriebszenarien. Bei den Wärmespeichern handelt es sich um technische Komponenten mit in Betonbauteile integrierten Wärmeübertragungssystemen. Diese Komponenten können u. a. im Erdreich verbaut werden.
- Die erfolgreichen Projektarbeiten des Departments ENVINF im 2013 abgeschlossenen Vorhaben „CO₂-Reservoirmanagement (CO2MAN)“ hatten zum Ziel, vollständige Workflows inklusive der für die Interaktion der verwendeten Softwaresysteme erforderlichen Softwarekomponenten für die integrierte Visualisierung unterschiedlicher Datensätze aus Geologie, Geophysik und Simulation zu entwickeln. Für den Demonstrationsstandort Ketzin zur geologischen CO₂-Speicherung wurden die zugrunde liegenden geologischen und geophysikalischen Daten, das auf dieser Basis generierte Reservoirmodell und die Simulationsergebnisse in integrierter Form gezeigt. Ausgangspunkt waren Bohrlochdaten, 3D-Seismik und interpretierte stratigrafische Horizonte. Zentrales Element für den gesamten Arbeitsablauf von der Konvertierung des Reservoirgitters aus dem statischen Modell

in die Datenbasis von OGS, über die Generierung zusätzlicher Geometrien, welche bei der Definition der Randbedingungen helfen, und die Simulation bis zur Visualisierung des Modells im VISLab des UFZ war die notwendige Ergänzung von OGS um Schnittstellen zur geologischen Modellierungssoftware GOCAD.

- Die wissenschaftliche 3D-Visualisierung entwickelt sich zunehmend zu einem integralen Bestandteil von Modellierungs- und Auslegungsprozessen, da sie erlaubt, komplexe und große Datensätze sowie Mess- und Simulationsergebnisse verständlicher darzustellen. Zudem bietet sie anschauliche Möglichkeiten der Präsentation von Forschungsergebnissen für Entscheidungsträger oder für die Öffentlichkeit. Die Weiterentwicklung von Workflows für die integrierte Visualisierung unterschiedlicher Datensätze aus Geologie, Geophysik und Simulation inklusive der für die Interaktion der verwendeten Softwaresysteme erforderlichen Softwarekomponenten war Ziel und ist Ergebnis der Arbeiten des Departments ENVINF im 2014 abgeschlossenen Verbundvorhaben „Prediction of Deformation to Ensure Carbon Traps (PROTECT)“. Da die Daten aus unterschiedlichen Quellen in unterschiedlichen Formaten vorlagen, war es zunächst erforderlich, ein abgestimmtes Softwareprotokoll für den Datenaustausch zwischen allen Partnern zu vereinbaren. Zur weiteren Bearbeitung der Quelldaten wurden Konvertierungskomponenten erstellt, um geologische Modelle, Bohrlochinformationen, Seismik-Messungen und geologische Horizonte zu importieren. Die im Rahmen von PROTECT entwickelten Workflows, Algorithmen und Softwarekomponenten gestatten integrierte 3D-Visualisierungen in stationären Systemen sowie die Nutzung mobiler stereoskopischer Darstellungstechniken mit VR-Brillen.
- Im Rahmen des 2020 abgeschlossenen Verbundvorhabens „Subrosion und Erdfall-Instabilität: integrierte MULTi-skalige Überwachung und Analyse (SIMULTAN)“ entwickelte und testete das Department MET Strategien zur Erkundung und Charakterisierung des oberflächennahen Untergrunds (beispielsweise die Kombination geeigneter nicht- und geringinvasiver Erkundungstechniken) zur besseren Charakterisierung des hydrogeologischen Regimes und dessen Variabilität im Vorfeld der Entwicklung eines Erdfallfrühwarnsystems.
- Im 2020 abgeschlossenen Verbundvorhaben „Geophysikalisches und hydrogeologisches Testfeld zur Untersuchung und zum Monitoring durch die Nutzung des Untergrundes induzierter reaktiver Mehrphasentransportprozesse in oberflächennahen Aquiferen (TestUM-Aquifer)“ entwickelte das Department MET Strategien zum Monitoring als Grundlage für das bessere Verständnis von Fließprozessen im Bereich der Hochenthalpiewärmespeicherung in Lockergesteinsgrundwasserleitern.
- In ANGUS+, IGLU, SAGS und TestUM-Aquifer standen die Definition von Auswahlkriterien sowie grundlegende methodische Entwicklungen für geringinvasive, hochauflösende Erkundungsverfahren und effiziente Konzepte zum Wirkungsmonitoring im oberflächennahen geologischen Raum an einzelnen (Groß-)Anlagen im Mittelpunkt. Damit liegt ein breites Angebot an modernen Konzepten und Instrumentarien für Erkundungs- und Monitoringmaßnahmen vor, die auch im Auslegungsprozess für großflächige oberflächennahe Geothermieanlagen benötigt werden. Insofern konnten Ergebnisse der genannten Vorgängerprojekte auch

für EASyQuart nutzbar gemacht werden, waren aber in den Gesamtkontext der Systemoptimierung von unter- und obertägigen Anlagenkomponenten einzuordnen und für spezifische Bedingungen anzupassen, weiterzuentwickeln sowie an Demonstrationsstandorten in ihrer Wirksamkeit zu validieren. Gleiches gilt auch für die Workflows, Algorithmen, Softwarekomponenten und Datentransferschnittstellen, die in den Projekten CO2MAN und PROTECT für die 3D-Visualisierung von geotechnologischen Anwendungen im tiefen Untergrund entwickelt wurden. Auch diese bildeten eine gute Basis für EASyQuart und mussten an die spezifischen Aufgabenstellungen angepasst und an den Demonstrationsstandorten validiert werden.

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur (HTWK) Leipzig

Die HTWK Leipzig wurde 1992 als Hochschule für Angewandte Wissenschaften gegründet und ist heute die größte Einrichtung ihrer Art in Sachsen. Als Nachfolgeinstitution der Technischen Hochschule Leipzig setzt sie eine lange Tradition akademischer Bildung in Leipzig fort, insbesondere in den Bereichen des Bauwesens und der Energiewirtschaft. Dies spiegelt sich im starken Forschungsprofil „Bau & Energie: Ressourcen schonen“ wider, in welchem Untersuchungen zum nachhaltigen Bauen und ressourcenschonenden Energieeinsatz zur Erhaltung der Umwelt im Mittelpunkt stehen. Ausgewählte Forschungsschwerpunkte sind dabei:

- Regenerative Energieerzeugung,
- zuverlässige intelligente Versorgungsnetze,
- Energiewirtschaft sowie
- Energieeffizienz & Verbrauchsoptimierung.

Die Professur Angewandte Mechanik an der Fakultät Ingenieurwissenschaften der HTWK vermittelt in der Lehre und bearbeitet in der Forschung Themen der numerischen Systemanalyse basierend auf kontinuumsmechanischen Methoden. Das schließt u. a. die Betrachtung komplexer gekoppelter Probleme im Kontext der Modellierung unterschiedlicher interagierender physikalischer Vorgänge (z. B. hydro-mechanische Prozesse in gesättigten porösen Medien) ein. Für EASyQuart waren insbesondere Vorarbeiten zur Entwicklung verallgemeinerter Finite-Element-Formulierungen für die Beschreibung hydro-mechanischer Prozesse in gesättigten porösen Medien mit Benchmarks und Anwendungen aus den Gebieten Geo- und Biomechanik von erheblicher Bedeutung. Auf dem Gebiet gekoppelter Problemstellungen erwies sich zudem die Expertise bei der Entwicklung und numerischen Umsetzung neuer Linearisierungstechniken für gemischte Formulierungen zur Beschreibung von nahezu inkompressiblen elastischen Materialien bei großen Deformationen als projektrelevant. In diesem Zusammenhang sind auch Arbeiten zur inversen Modellierung zu erwähnen, die u. a. Ausgangspunkt für die in EASyQuart durchgeführten Optimierungsstudien wurden.

Die Themen der Professur Simulation energetischer und technischer Systeme an der Fakultät Ingenieurwissenschaften der HTWK umfassen in Lehre und Forschung vor allem Simulationsmethoden in den Bereichen Strukturmechanik und Thermody-

namik. Dazu zählen auch Methoden zur Systemsimulation, wie sie in der Gebäudetechnik eingesetzt werden. Mit dem Hintergrund in numerischer Simulation werden an der Professur verschiedene Projekte für Industriepartner von der Festigkeitsbewertung einzelner Bauteile bis zur fluiddynamischen Simulation von Raumluftrömungen bearbeitet. Gerade in Bezug auf die neuen Herausforderungen diskontinuierlicher Lasten und der dynamischen Bereitstellung regenerativer Energieträger sind die Methoden in der Gebäudesimulation wichtig, um in der energetischen Energiebilanz im Gebäude die richtigen Simulationen und Planungen durchführen zu können. In der Zusammenarbeit beider Professuren der HTWK konnten die Schwerpunkte der ober- und untertägigen Simulationen gemeinsam bearbeitet und über ein interdisziplinäres multiphysikalisches Modell gekoppelt werden.

Die Hochschule ist durch eigene Vorarbeiten auf den projektrelevanten Fachgebieten numerische Simulation von Prozessen im Untergrund, numerische Unsicherheitsanalysen und mathematische Optimierung sowie thermische Gebäudesimulation einschlägig ausgewiesen und seit Jahren in der Forschung erfolgreich aktiv. Übergeordnete Forschungsthemen und Anwendungsgebiete der vergangenen Jahre sind dabei vorrangig die Oberflächennahe Geothermie sowie die Nutzung des geologischen Untergrunds als thermischer Energiespeicher. Spezifische Arbeiten wurden und werden dazu im Rahmen der Vorbereitung, Durchführung und Analyse numerischer Simulationen der gekoppelten Prozesse im Untergrund sowie der Haustechnik geleistet. Weiterhin befasst sich die Hochschule intensiv mit der Simulation von Energieanlagen und Energienetzen zur Prognose des Energiesystems.

Analog zu den anderen EASyQuart-Verbundpartnern wird nachfolgend exemplarisch ebenso für die HTWK eine konkrete Projektbeteiligung sowie deren Bezug zu EASyQuart näher erläutert: Im 2017 abgeschlossenen Projekt Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme (SAGS)³ führte die Professur Angewandte Mechanik der Hochschule Forschungsarbeiten zur 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 durch. Speziell mit der in Zusammenarbeit mit dem Department ENVINF des UFZ durchgeführten Erweiterung der wissenschaftlichen Open-Source-Simulationsplattform OGS um numerische Modelle für die Abbildung von Erdwärmesonden (EWS) mit Integration eines Wärmepumpenmodells sowie zur Simulation von Prozessen des Gefrierens sowie Tauens wurden Grundlagen geschaffen, mit denen die in EASyQuart entwickelten und genutzten Unsicherheitsanalysen erst ermöglicht wurden. Basierend auf Projektergebnissen von SAGS wurden erste Anregungen für eine flexible Gestaltung der Auslegungsprozesse für untertägige Komponenten oberflächennaher geothermischer Netzwerke unter Berücksichtigung realer Standortbedingungen formuliert, die in EASyQuart um Aspekte der Integration der Haustechnikseite erweitert und für eine zukünftige wirtschaftliche Verwertung angepasst wurden.

³ <https://www.ufz.de/index.php?en=46270>

1.3 Struktur und inhaltlicher Ansatz des Vorhabens

Das Verbundvorhaben EASyQuart basierte auf einer sehr engen Verknüpfung experimenteller und numerischer Arbeiten zu im Untergrund und in der Haustechnik ablaufenden komplexen Prozessen. Diese Arbeiten hatten die Entwicklung spezifischer Planungsinstrumentarien für die Auslegung oberflächennaher geothermischer Systeme zum Ziel und wurden durch deren Nutzung für Demonstrationsobjekte aus der Auslegungs- und Betriebspraxis entsprechender Anlagen einer sorgfältigen Validierung unterzogen. Dabei gewonnene Erkenntnisse wurden zudem genutzt, den aktuellen Stand behördlicher Vorgaben und Regularien für die Errichtung der betrachteten energetischen Systeme einer kritischen Sichtung zu unterziehen und Anregungen für deren stetige Anpassung zur Berücksichtigung des jeweiligen wissenschaftlich-technischen Standes sowie anwendungsrelevanter Erfordernisse und Bedingungen zu formulieren.

Bezogen auf die inhaltliche Projektstruktur wurde das Vorhaben in neun Arbeitspaketen (AP1 bis AP9) bearbeitet, die vier fachwissenschaftlichen thematischen Blöcken und einem Block zu Projektmanagement und Ergebnistransfer zugeordnet werden konnten (vgl. Abb. 1.2).

Ein erster fachspezifischer thematischer Block befasste sich mit der energetischen Bedarfsermittlung und der darauf basierenden Definition von Referenzmodellen für Gebäudetypen und zu untersuchende Nutzungsoptionen sowie der Festlegung

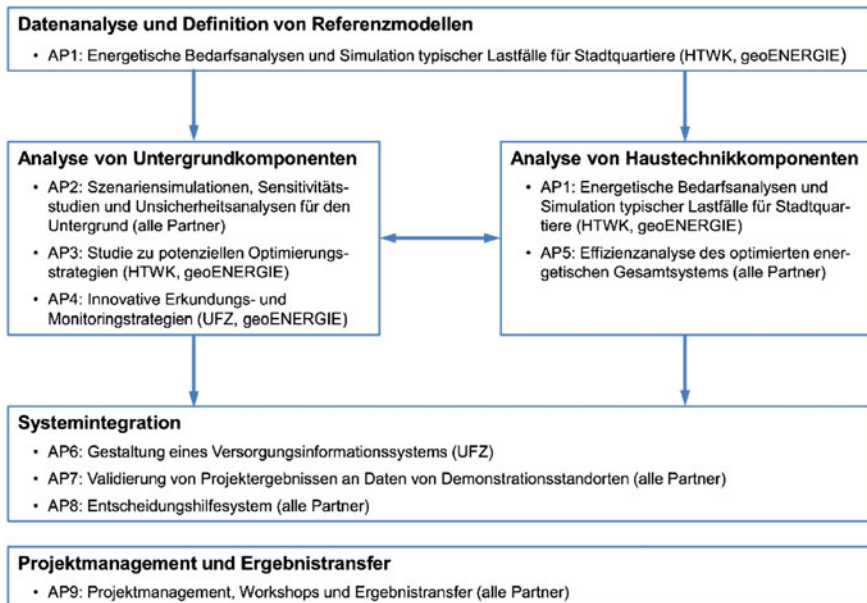


Abb. 1.2 Übergeordnete Projektstruktur für EASyQuart in thematischen Blöcken. (Quelle: Vollantrag Verbundvorhaben EASyQuart, Version vom 30.07.2018)

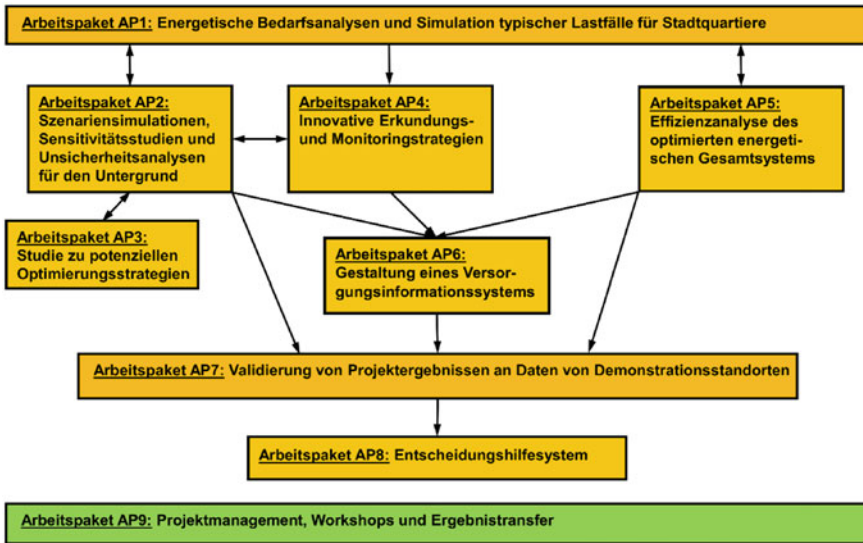


Abb. 1.3 Arbeitspaketstruktur für EASyQuart

typischer Lastprofile. Für diese Modelle und Optionen wurden in zwei weiteren Projektblöcken einerseits die Untergrundbestandteile und andererseits die Haustechnikkomponenten oberflächennaher Geothermiesysteme mit Verfahren der Erkundung, des Monitorings sowie der numerischen Simulation im Detail betrachtet und letztlich miteinander verknüpft. Hierbei gewonnene Erkenntnisse wurden in einem vierten fachwissenschaftlichen Block einer Synthese zugeführt, die u. a. Verfahren zur integrierten 3D-Visualisierung heterogener Daten beinhaltet und aus der wesentliche Schlussfolgerungen für die Praxis formuliert werden konnten. Damit umfassen die bearbeiteten Aufgabenstellungen die gesamte Wertschöpfungskette für die Auslegung und Planung oberflächennaher Geothermiesysteme zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren. Komplettiert wurden die Forschungsarbeiten durch Aktivitäten in den Bereichen Netzwerkbildung und Nachwuchsförderung.

Abb. 1.3 zeigt die Inhalte sowie die Interaktionen der einzelnen Arbeitspakete des Verbundvorhabens in einer vereinfachten Strukturübersicht. Nachfolgend werden deren inhaltliche Schwerpunkte kurz beschrieben. Im Detail werden die verwendeten Methoden und die Projektergebnisse in den Kap. 2 bis 7 dargestellt.

AP1: Energetische Bedarfsanalysen zur Ermittlung typischer Lastfälle für Stadtquartiere in Mischbebauung inklusive Gebäudesimulation

Größere Stadtquartiere zeichnen sich in der Regel durch eine Mischbebauung aus (z. B. Gebäude für Wohnen, Gewerbe, Dienstleistungen, öffentliche Gebäude und Kultureinrichtungen) und können Bestands-, aber auch Neubauten enthalten. Der tages- und jahreszeitliche Heiz- und Kühlbedarf der einzelnen Gebäudetypen unterscheidet sich auf der Bedarfsseite zum Teil deutlich voneinander, was unterschied-

liche Anforderungen an die Versorgungsseite bedingt. Diese Aspekte sind bei der Auslegung einer geothermischen Anlage zu berücksichtigen, was den Planungsprozess im Fall größerer Objekte in Mischbebauung im Gegensatz zu Einzelanlagen, Mehrfachsystemen für große Einzelgebäude oder großflächigen Anlagen für Gebiete mit homogener Nutzung (z. B. reine Eigenheimsiedlungen) sehr komplex gestaltet. Die in der Auslegungspraxis häufig anzutreffende Übertragung der Konzepte, Prozeduren und Prognoseinstrumentarien für Einzelanlagen wird der Komplexität größerer Systeme nicht gerecht. Notwendig war damit zunächst eine gründliche Bestandsaufnahme der thermischen Energiebedarfe einzelner Gebäudetypen und der verfügbaren Haustechnik, um darauf aufbauend Prozeduren und Instrumentarien für eine verbesserte, flexible, standortbezogene und energieeffiziente Auslegung großflächiger oberflächennaher Geothermiesysteme entwickeln und empfehlen zu können.

Ausgangspunkt für die Forschungsarbeiten in EASyQuart war die Auswahl und Definition von repräsentativen Modellen für Referenzgebäude, wie sie aktuell häufig in Stadtquartieren in Mischbebauung errichtet werden. Davon ausgehend wurden ebenso mögliche Varianten für die Haustechnik (z. B. Heizungsanlage mit/ohne Solarkomponenten, mit/ohne Puffersystemen als Wärme- und Kältespeicher, mit/ohne Zwischenwärmeübertrager) betrachtet und entsprechend definiert. Anschließend erfolgte die Identifikation repräsentativer Nutzungsoptionen aus den Bereichen Heizen und Kühlen für die Referenzgebäude. Wichtig war dabei auch die Einbeziehung von Aspekten der Wärmespeicherung im Zusammenhang mit Gebäudekühlung, da diese positive Effekte auf die thermischen Regenerationspotenziale des Untergrunds haben. Gleichzeitig ist jedoch eine Temperatursteigerung in Grundwasserleitern über standortspezifische Grenzwerte hinaus zu vermeiden. Die Referenzgebäudemodelle wurden für real geplante oder existierende Objekte in die Testbeispiele für Demonstrationsstandorte integriert.

Das Arbeitspaket stellte als wesentliches Ergebnis repräsentative Lastprofile für das Heizen und Kühlen der betrachteten Referenzgebäude und deren Nutzungsoptionen bereit. Dabei wurden typische tages- und jahreszeitliche klimatische Bedingungen, die Nutzungsanforderungen des Gebäudes und die Betriebsweise der Haustechnik (z. B. Leistungsregelung, Zwangsabschaltung, Warmwasserbereitung, tatsächliche Heizlasten in Wärmepumpenanlagen) berücksichtigt. Diese Lastprofile dienten den numerischen Untersuchungen im Verbundvorhaben als Randbedingungen.

Im Rahmen von Haustechniksimulationen mit der kommerziellen Software SimulationX wurden typische Energiebedarfe für die Gebäude einer charakteristischen Quartiersbebauung ermittelt, die für die ausgewählten Nutzungsoptionen relevant sind. Damit entstand ein obertägiges Modell, welches die Lastseite mit moderner Haustechnik abbilden kann. Dabei wurde besonderes Augenmerk u. a. auf verschiedene Systemtypen (monovalent und bivalent) sowie unterschiedliche Grenztemperaturen seitens der Haustechnik und die Zielstellung eines ausgeglichenen Temperaturhaushalts gelegt. Die Berechnung des Wärme- und Kältebedarfs für die Nutzung mit geothermischen Ressourcen erfolgte als Zuarbeit für die numerischen Studien der Untergrundprozesse sowie die mögliche Kombination mit anderen regenerativen Quellen thermischer Energie (z. B. Solarthermie, Pelletheizungen).

Die gekoppelte numerische Simulation von Prozessen im Untergrund und der Haustechnik gehört nach wie vor nicht zum Standard in der aktuellen Auslegungspraxis großflächiger oberflächennaher geothermischer Systeme. Es ist jedoch bekannt, dass es Interaktionen und Rückkopplungen der unter- und obertägigen Systemkomponenten gibt, die bei Nichtbeachtung die Energieeffizienz der Gesamtanlage nachhaltig mindern können. Für die in EASyQuart durchgeführte Verknüpfung der entsprechenden Teilsystemsimulationen identifizierte dieses Arbeitspaket erforderliche Daten zur Kopplung der Simulationsmodelle, definierte darauf aufbauend Schnittstellen für die Kombination der Untergrund- und Haustechnikmodelle und setzte diese numerisch um.

AP2: Szenariensimulationen, Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen für die energieeffiziente Auslegung des Untergrundsystems

Für die bestmögliche Ausnutzung des geothermischen Potenzials des oberflächennahen geologischen Raumes ist eine dem Standort optimal angepasste Anordnung und Dimensionierung von untertägigen Wärmeübertragerelementen (z. B. EWS, Erdkollektoren) von entscheidender Bedeutung. Zur Ermittlung ihres optimalen Arrangements beispielsweise bezüglich Anzahl, Lokalisierung oder geometrischer Abmessung wurden verschiedene numerische Szenariensimulationen für vorher definierte Nutzungsoptionen geplant. Grundlage dafür ist die Erstellung und Parametrisierung von geologischen Modellen für reale Standortbereiche. Für die Simulationen wurde vorrangig die wissenschaftliche Open-Source-Softwareplattform OGS verwendet und aufgabenspezifisch erweitert. Ausgehend von relevanten Bilanzgleichungen und konstitutiven Beziehungen umfasste dies im Einzelnen die Definition geeigneter Modelle, deren konkrete numerische Realisierung sowie die Modell- und Softwarevalidierung auf der Basis numerischer Benchmarks.

Die Erstellung geologischer Modelle und deren Parametrisierung mit wesentlichen Eigenschaften wurde basierend auf verfügbarem Kartenmaterial, Informationen früherer Bohrungen sowie Literaturwerten (z. B. für Bodenparameter) geplant und durch im Verlaufe von EASyQuart erhobene Erkundungsdaten an Demonstrationsstandorten unterstützt. Geologische Modelle enthalten Informationen zur Struktur des betrachteten Gebiets (z. B. Stratigrafie), zur Geometrie sowie eventuell vorhandenen Störzonen. Die einzelnen Gesteinsschichten werden bereits im geologischen Modell mit ausgewählten Bodenparametern, wie etwa der Massedichte, versehen.

Zur numerischen Simulation komplexer, transienter physikalischer Prozesse in Natur und Technik werden Orts- und Zeitdiskretisierungsverfahren genutzt, da im Allgemeinfall analytische Lösungen nicht verfügbar sind. Zu den Ortsdiskretisierungsverfahren gehört u. a. die Finite-Element-Methode, auf der auch die hier genutzte Simulationsplattform OGS basiert. Dabei wird das betrachtete Simulationsgebiet in ein Netz bestehend aus überschneidungsfreien Finiten Elementen aufgeteilt und die Lösung des numerischen Problems in diskreten Gitterpunkten des Netzes betrachtet. Zur numerischen Lösung der Testbeispiele werden die geologischen Modelle in Form eines Gitters abgebildet und mit allen notwendigen konstitutiven und Systemparametern sowie den erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen versehen. Zu den konstitutiven Parametern gehören hydrogeologische (z. B. Permea-

bilität), thermische (z. B. Wärmeleitfähigkeit) und gegebenenfalls geomechanische (z. B. Elastizitätsmodul) Parameter der verschiedenen Gesteinsschichten. Systemparameter, wie etwa Zeitschrittweiten, steuern den numerischen Prozess. Zur Erstellung der Simulationsmodelle wurde u. a. der Datenexplorer von OGS genutzt.

Für Szenariensimulationen der Untergrundprozesse wurden im Rahmen der definierten Testbeispiele manuell Anzahl, Positionierung und Dimensionierung von EWS variiert und die Ergebnisse hinsichtlich des Wärmeertrags, des Langzeittemperaturverhaltens des Bodens sowie der Grundwasserbeeinflussung miteinander verglichen. Basierend auf den Ergebnissen der Untergrundsimulationen konnten Haustechniksimulationen über die Simulationsumgebung SimulationX angeschlossen werden, die eine Bewertung der Energieeffizienz der jeweils betrachteten Geothermieanlage gestatten. In diese Szenariensimulationen waren Sensitivitätsstudien integriert, bei denen jeweils einzelne Modellparameter in typischen Bereichen variiert wurden. Daraus konnten Informationen gewonnen werden, welche Parameter großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse ausüben und somit besonderer Sorgfalt bei ihrer Ermittlung bedürfen.

Die für numerische Untergrundsimulationen notwendigen Parameter sind nur an diskreten Punkten bekannt, an denen Daten aus Erkundungsmessungen vorliegen. Für andere geometrische Orte können z. B. hydrogeologische, thermische und geomechanische Bodenparameter nur geschätzt werden. Daher sind diese Parameter mit Unsicherheiten behaftet, die für eine aussagekräftigere Vorhersage der relevanten Prozesse berücksichtigt werden sollten. Dazu dient die Unsicherheitsanalyse, bei der der Einfluss einer statistisch basierten Variation von verschiedenen, aus den zuvor erwähnten Sensitivitätsstudien als besonders relevant identifizierten Parametern auf das Simulationsergebnis untersucht wird. Im Rahmen der Forschungsarbeiten von EASyQuart wurden projektspezifische Konzepte zur numerischen Unsicherheitsanalyse gesichtet, ausgewählt und angepasst. Von besonderer Bedeutung war dabei die Auswahl angemessener Verteilungsmodelle für die untersuchten Parameter. Die Ergebnisse von Unsicherheitsanalysen stellen im Gegensatz zu in der Regel üblichen deterministischen Auslegungsoptionen statistisch abgesicherte Prognosen in vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsintervallen dar. Sie wurden im Verbundvorhaben hinsichtlich ihrer Relevanz für konkrete Umsetzungen der betrachteten Nutzungsoptionen sowie auch hinsichtlich ihrer Bedeutung für eine potenziell erforderliche Flexibilisierung regulativer Rahmenbedingungen bewertet.

AP3: Studie zu potenziellen Optimierungsstrategien der Auslegung untertägiger Netzkomponenten

Die tatsächliche Entzugsleistung und die thermische Regenerationsfähigkeit des Untergrunds durch den Betrieb einer geothermischen Anlage hängen wesentlich von der Anzahl, Anordnung und Dimensionierung der im geologischen Raum installierten Systemkomponenten (z. B. EWS) ab und unterliegen zeitlichen Schwankungen. Das in EASyQuart erarbeitete Entscheidungshilfesystem für die Auslegung derartiger Systeme stellt einen Handlungsleitfaden dar, der Prognoseinstrumentarien benennt und bewertet (u. a. auch numerische Komponenten), jedoch nicht als computergestütztes Dimensionierungsprogramm zu verstehen ist. In der Auslegungspraxis ist

jedoch letztlich eine Softwareplattform wünschenswert, die einen Algorithmus zur Verfügung stellt, mit dessen Hilfe für ein gegebenes Gebiet beispielsweise die optimale Lage oder die optimale Dimensionierung von EWS automatisiert berechnet werden kann. Für Planungsprozesse werden solche Systeme zwar bereits angeboten, sie beruhen aber auf teilweise sehr vereinfachenden Annahmen über Struktur und Parameter des Untergrunds. Damit berücksichtigen sie die realen Standortbedingungen in der Regel nur unzureichend. Im Rahmen von AP3 wurde untersucht, wie ein derartiges, auf realen Bedingungen basierendes Optimierungsproblem prinzipiell formuliert und mathematisch gelöst werden kann.

Grundlegendes Ziel aller mathematischen Optimierungsstrategien ist es, das Minimum einer geeigneten Zielfunktion zu ermitteln. Diese Zielfunktion enthält die zu optimierenden Systemparameter und weist eine zweckmäßige mathematische Struktur auf (zumeist in Form einer Fehlerquadratsumme). Das hier betrachtete Optimierungsproblem ist sehr komplex, da im besten Fall sowohl die Anzahl als auch die Positionierung und die Dimensionierung (z. B. Länge von EWS) als Optimierungsparameter einbezogen werden, um die realen heterogenen Bodencharakteristika und Grundwasserverhältnisse effizient zu nutzen. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Aspekte für den Wärmeentzug (Heizen von Gebäuden) und die Wärmespeicherung (Kühlen von Gebäuden) mitunter gerade entgegengesetzte Wirkung haben. So ist eine Grundwasserströmung beispielsweise wegen der dadurch verbesserten thermischen Regeneration des Untergrunds positiv für den Wärmeentzug, aber durch Abdrift der gespeicherten thermischen Energie mit strömendem Grundwasser negativ für die Wärmespeicherung. Es wurde somit zunächst untersucht, welche der genannten Parameter eines Erdwärmesondensystems sinnvoller Teil einer Zielfunktion zur Optimierung sein sollen, welche mathematische Form diese haben soll und welche Nebenbedingungen im Sinne von Regularisierungsparametern gegebenenfalls einbezogen werden können.

Im weiteren Projektverlauf wurde untersucht, welche mathematisch basierten Optimierungsverfahren für die betrachtete Problemstellung besonders geeignet sind. Grundsätzlich stehen dabei stochastische und deterministische Verfahren zur Verfügung, deren problemspezifische Eignung bewertet wurde. Dazu gehörte u. a. die Untersuchung verschiedener Optimierungsoptionen hinsichtlich ihrer numerischen Umsetzbarkeit (z. B. Vor- und Nachteile bezüglich der Bildung von Ableitungen der Zielfunktion, des Rechenaufwandes, der zu erwartenden Robustheit). Ableitungen der Zielfunktion werden für deterministische Optimierungsverfahren benötigt, sind aber unter Umständen nur numerisch zu bilden, was die Genauigkeit des Verfahrens einschränkt. Stochastische Optimierungsverfahren kommen ohne Ableitungen der Zielfunktion aus, benötigen aber eine große Anzahl auf Basis geeigneter Zufallsalgorithmen ausgewählter numerischer Realisierungen des Optimierungsproblems.

Wegen der Komplexität der Aufgabenstellung wurden gleichzeitig Möglichkeiten einer zweckmäßigen Modellreduktion untersucht, die vereinfachte Lösungen für die Ermittlung einer geeigneten Anordnung der Netzkomponenten einer geothermischen Anlage mit hinreichender Zuverlässigkeit verknüpfen und potenziell Standard im Planungsprozess werden könnten.

AP4: Entwicklung innovativer Erkundungs- und Monitoringstrategien

Die Standorterkundung und das Wirkungsmonitoring haben besondere Bedeutung bei der intensiven thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrunds. Eine nicht ausreichende Datengrundlage bei Bau und Betrieb von geothermischer Anlagen kann beispielsweise zu deutlichen Nutzungseinschränkungen bis hin zur Nutzungskonkurrenz führen. Eine besondere Herausforderung liegt darin, dass in Abhängigkeit von der spezifischen Nutzung unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Erkundung und des Monitorings bestehen. Bei klassischen Erdwärmesondenanlagen führt eine vorhandene Grundwasserdynamik zum Abtransport abgekühlten Grundwassers und kann somit die Ausbildung einer Kälteinsel verhindern, während bei stationären Wärmespeichern eine räumliche Verfrachtung des Wärme- oder Kältereservoirs über die Grundwasserdynamik möglichst vermieden werden soll. Aufgrund der unterschiedlichen Ansprüche, der Variabilität des hydrogeologischen Regimes sowie der komplexen Prozesse und Wechselwirkungen in der ungesättigten Bodenzone und im Grundwasser wurden in diesem Arbeitspaket nutzungsabhängige, standortbezogene, aber übertragbare, innovative Erkundungs- und Monitoringstrategien entwickelt und in der Praxis getestet, mittels derer die Funktion der thermischen Nutzung optimiert und Auswirkungen auf das Grundwasser und den Boden erfasst werden können.

Als methodische Grundlage für die Erkundungs- und Monitoringstrategien dienten Ergebnisse der in EASyQuart durchgeführten numerischen Sensitivitätsstudien und Unsicherheitsanalysen. Die Verbundpartner diskutierten den aktuellen Stand von Regularien, gängigen Praktiken, technologischen Aspekten und der Wirksamkeit kommerziell verfügbarer Methoden für die Erkundung und das Monitoring bei der Dimensionierung oberflächennaher geothermischer Systeme. Daraus wurden gemeinsam standort-, szenarien- und nutzungsabhängige Anforderungen an Erkundung und Monitoring definiert.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden projektspezifisch geeignete Erkundungs- und Monitoringverfahren sowie -strategien ausgewählt und angepasst sowie auf ihre Eignung, Aussagekraft und Effizienz geprüft. Dabei profitierte der Verbund insbesondere von den umfangreichen Erfahrungen und der ausgewiesenen Expertise des UFZ bei der Entwicklung nicht- oder geringinvasiver Verfahren zur Standorterkundung (z. B. Geoelektrik, Direct Push) sowie innovativer Konzepte zum Grundwasser- und Temperaturmonitoring in oberflächennahen geologischen Schichten. Die Palette der Anwendungsmöglichkeiten umfasst dabei sowohl hydrogeologische Studien wie z. B. Grundwassermanagement inklusive Schadstoffanalysen als auch geotechnologische Nutzungen der betrachteten Ressourcen wie z. B. Oberflächennahe Geothermie.

Zum Test und der Bewertung von Praxisrelevanz der ausgewählten Verfahren und Methoden wurden durch den Verbundpartner UFZ an ausgewählten Demonstrationsstandorten Messpositionen erschlossen sowie Technik für die Standorterkundung installiert, eingerichtet und kalibriert. Dabei wurde auf innovative, geringinvasive Konzepte zurückgegriffen, die in der aktuellen Auslegungspraxis noch nicht etabliert sind. Die durch die Standorterkundung gewonnenen Daten unterstützten die Erstellung geologischer Modelle sowie die Kalibrierung und Validierung der auf den

geologischen Modellen basierenden Simulationsmodelle für die numerische Analyse der komplexen physikalischen Prozesse im Untergrund.

Für die Demonstrationsstandorte wurde zudem an geeigneten Messpositionen durch das UFZ Technik zum Wirkungsmonitoring (z. B. Grundwassermessstellen (GWM)) installiert, eingerichtet und kalibriert. Basierend auf Daten aus dem Wirkungsmonitoring konnten Anfangs- und Randbedingungen (z. B. Grundwasserdynamik) für die Simulationsmodelle erfasst sowie Ergebnisse von Prognosesimulationen validiert werden, wie z. B. räumliche und zeitliche Entwicklung von Temperaturfeldern im Untergrund.

Zu den wesentlichen Projektergebnissen von EASyQuart gehören die Erfassung des Standes der aktuellen Auslegungspraxis für oberflächennahe geothermische Systeme, der Test innovativer Prognoseinstrumentarien für verschiedene Phasen des Auslegungsprozesses sowie die Bewertung von deren Relevanz und Umsetzbarkeit hinsichtlich einer flexibleren Gestaltung der Auslegungsverfahren. In diesem Sinne wurden Beiträge zum Vergleich von Aufwand und Nutzen etablierter und für die gängige Praxis neuartiger Verfahren zur Standorterkundung und zum Wirkungsmonitoring geleistet. Konkret wurden Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der vom UFZ angepassten und entwickelten Erkundungs- und Monitoringkonzepte gegenüber etablierten Lösungen bewertet und die Potenziale für deren Einsatz in praxisrelevanten Planungsprozessen eingeschätzt. Dazu wurden durch den Verbundpartner geoENERGIE Konzept GmbH an Demonstrationsstandorten in der aktuellen Auslegungspraxis etablierte Verfahren für Standorterkundung und Wirkungsmonitoring zu vergleichenden Studien eingesetzt. Neben den so mit unterschiedlicher Methodik erhobenen Standortdaten wurde zusätzlich die Auswertung von Datensätzen in der Literatur sowie verfügbarer Laborversuche für die Bewertung der Verfahren genutzt.

AP5: Effizienzanalyse des optimierten energetischen Gesamtsystems aus Gebäude, Haustechnik und geothermischer Versorgung

Erst die Verknüpfung von Ergebnissen der Simulation komplexer physikalischer Prozesse im oberflächennahen Untergrund mit Ergebnissen der Gebäudesimulation für die Haustechnik bei Wärme- und Kälteversorgung erlaubt zuverlässige Analysen der Energieeffizienz eines kompletten geothermischen Systems mit seinen unter- und obertägigen Anlagen. Aus entsprechenden Untersuchungen in EASyQuart konnten insbesondere Schlussfolgerungen für ein intelligentes Systemmonitoring abgeleitet werden, um im Bedarfsfall regeltechnisch in das Betriebsregime des Systems eingreifen zu können.

Für die in AP1 betrachteten Referenzgebäudemodelle mit ihren typischen Lastprofilen erfolgten unter Berücksichtigung der für EASyQuart definierten Nutzungsoptionen in Verbindung mit Ergebnissen von Untergrundsimulationen Effizienzuntersuchungen zur Energiebilanz im Gebäude. Dabei wurde untersucht, welchen Einfluss eine optimierte Auslegung der untertägigen Systemkomponenten im Zusammenhang mit angepassten Gebäude- und Anlagenmodellen auf die Effizienz des Gesamtsystems hat.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden bestehende Haustechnikmodelle analysiert und systematisch erweitert. Ergebnisse von Prognosesimulationen konnten

teilweise mit realen Monitoringdaten von Haustechnikanlagen an Demonstrationsstandorten validiert werden.

Aus der Effizienzbewertung ausgewählter Gesamtsysteme wurden mögliche Konsequenzen für potenzielle Erweiterungen eines intelligenten Anlagenmonitorings bzw. für Veränderungen der Betriebsweise geothermischer Systeme mit ihren unter- und obertägigen Komponenten abgeleitet. So konnten beispielsweise Projektergebnisse für eine Optimierung von Anzahl und Lage der vorgeschriebenen GWM genutzt werden, deren Überwachung einen erheblichen Faktor bei den Betriebskosten eines geothermischen Systems darstellt. Darüber hinaus wurden innovative Monitoringkonzepte entwickelt, die die Bereiche Haustechnik, Simulation und Hydrogeologie sinnvoll miteinander verknüpfen. Mit diesem neuartigen Ansatz können anwendungsbezogene Schwellenwerte für Kennzahlen von Wärmepumpen definiert werden, mit deren Hilfe ein frühes Erkennen von Betriebsanomalien und die Abschätzung etwaiger Auswirkungen auf den Boden bzw. das Grundwasser möglich sind.

AP6: Gestaltung eines Versorgungsinformationssystems für Stadtquartiere unter Nutzung integrierter 3D-Visualisierungsmodelle

Unter Einbeziehung innovativer Techniken zur 3D-Visualisierung wurden in EASyQuart Strategien zur Kommunikation und Information sowie zur Datenexploration und Validierung gestaltet, die Teil von Entscheidungshilfesystemen für Planer, Technologieanbieter und potenzielle Nutzer von Ver- und Entsorgungsstrukturen in Stadtquartieren werden können, aber auch anschauliche Instrumente für die öffentliche Diskussion relevanter Projekte bereitstellen. Die integrierte Visualisierung bezieht dabei unter- und obertägige Strukturen (z. B. geologische Formationen, Erdwärmesondensysteme, Gebäude, Gebäudetechnik), Ver- und Entsorgungssysteme (z. B. Leitungsnetzwerke) sowie die Ergebnisse von Erkundungs- und Monitoringkampagnen ebenso ein wie die Ergebnisse numerischer Prozesssimulationen.

Basierend auf Erfahrungen aus anderen Anwendungsgebieten (z. B. Hydrosystemmodellierung) wurden zunächst Workflows für die Gestaltung projektrelevanter 3D-Visualisierungen erarbeitet. Diese legen für jede der zuvor genannten Dateneinheiten (Strukturen, Netzwerke, Messdaten, Simulationsergebnisse) die Abläufe von deren Integration in das Visualisierungssystem über die Art der Darstellung bis hin zu den notwendigen Algorithmen für die Visualisierung fest. Anschließend wurden für jeden Datentyp die spezifischen Visualisierungs-Algorithmen ausgewählt und die für die jeweilige Darstellung erforderlichen Komponenten vorhandener Visualisierungssoftware erweitert bzw. neu entwickelt. Gleichzeitig wurden Methoden für die integrierte Darstellung komplexer Wärme- und Kälteversorgungssysteme unter Berücksichtigung unter- und obertägiger Strukturen als potenzieller Bestandteil von Planungsinstrumentarien programmiert.

Informationen aus Dateneinheiten wie Strukturen, Netzwerke, Messdaten oder Simulationsergebnisse werden in voneinander unabhängiger Weise erhoben und weisen jeweils eine fachspezifische Struktur auf. Für die Integration der Daten in einem einheitlichen Visualisierungssystem müssen sie über Schnittstellen in dieses überführt werden. Dazu wurden in EASyQuart ein aufgabenspezifisches Datenin-

tegrationskonzept zur Aufnahme, Aufbereitung und Nutzung verteilter Realdaten erarbeitet, Schnittstellen zwischen der Software zur Datenerhebung und der Visualisierungssoftware definiert sowie Adapter zum Transfer heterogener Daten in ein integriertes Software-Framework programmiert.

Mit dem Vorliegen von Daten für reale Testbeispiele, basierend auf Informationen von den Demonstrationsstandorten, konnten sukzessive reale 3D-Visualisierungen aufgebaut werden. Diese integrieren Projektergebnisse aus verschiedenen Quellen in einer einheitlichen Darstellung für Fachdiskussionen oder öffentliche Präsentationen und zeigen das Potenzial des Versorgungsinformationssystems, durch die Verwendung anschaulicher Visualisierungsverfahren die Dimensionierung oberflächennaher, geothermischer Systeme zu unterstützen. 3D-Visualisierungslösungen wurden für stationäre Systeme (z. B. das TESSIN VISLab des UFZ), mobile Visualisierungstechnik (z. B. für Präsentationen auf Tagungen, Workshops, Arbeitstreffen), Arbeitsplatzkomponenten (z. B. Head-mounted Displays) und die dreidimensionale Dokumentenpräsentation vorbereitet.

AP7: Validierung von Projektergebnissen an Daten von Demonstrationsstandorten

Eine Reihe von Aspekten des im Rahmen von EASyQuart entwickelten Prognoseinstrumentariums als Bestandteil eines Entscheidungshilfesystems zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren (Workflows, Bewertungskriterien, Verfahren für Erkundung, Monitoring, numerische Simulation und integrierte 3D-Visualisierung etc.) konnten mit Daten unterschiedlicher realer Standorte validiert werden. Entsprechende Daten standen teilweise dem Verbundpartner geoENERGIE Konzept GmbH aus bereits realisierten Projekten zur Verfügung (z. B. spezifische Erkundungs- und Monitoringdaten) bzw. wurden während der Bearbeitung von EASyQuart im Rahmen von Feldarbeiten an ausgewählten Demonstrationsstandorten erhoben.

Basierend auf bei Verbundpartnern vorliegenden, behördlich verfügbaren, der Literatur entnommenen sowie im Vorhaben zusätzlich ermittelten Daten wurde die Parametrisierung numerischer Testbeispiele vervollständigt. Diese sind erst damit optimal für Simulationen und die 3D-Visualisierung vorbereitet. Zu den hier ermittelten Modellparametern gehören ergänzende Systemparameter für den Untergrund und die Haustechnik, sowie Anfangs- und Randbedingungen der Modelle, die an den Demonstrationsstandorten bereits bekannt waren oder im Rahmen von EASyQuart ermittelt wurden. Eingeschlossen waren hierbei auch Betriebsparameter für die Kopplung von Simulationen des Untergrunds und der Haustechnik. Neben Erkundungsdaten und Systemparametern wurden an den Demonstrationsstandorten ebenfalls Monitoringdaten erfasst. Damit wurden Vergleiche berechneter und gemessener Werte ermöglicht, mit deren Hilfe die unterschiedlichen, im Vorhaben entwickelten Prognoseinstrumentarien und -konzepte als Teil eines Entscheidungshilfesystems validiert und bewertet werden konnten.

Erkundungsdaten und Parametersätze, die an den Demonstrationsstandorten erhoben wurden, dienten als Grundlage für die Ableitung einer Methodik zur Abschätzung des maximalen Wärmeentzugs aus dem Boden und Grundwasser für deren nachhaltige geothermische Nutzung. Dabei wurden die dominierenden, standort-

abhängigen natürlichen und anthropogenen Einflüsse auf das unterirdische Temperaturregime und auch ein möglicher Rückgewinnungsgrad von Wärme oder Kälte bei der saisonalen Speicherung berücksichtigt. Diese Arbeiten sind zweckmäßig, da in der aktuellen Auslegungspraxis entsprechende Parameter für die dem Boden zu entziehende geothermische Energie auf vereinfachten, empirischen Beziehungen beruhen und in der Regel vor allem die Grundwasserverhältnisse nur unzureichend berücksichtigen.

AP8: Entscheidungshilfesystem

Wirtschaftliches Hauptziel von EASyQuart war die Entwicklung eines daten- und wissensbasierten Entscheidungshilfesystems zur standortoptimierten Auslegung dezentraler Wärme- und Kälteversorgungssysteme unter Nutzung des oberflächennahen Untergrunds. Damit werden Dienstleistungsmodelle für Machbarkeitsstudien in der Vorplanung und die eigentlichen Planungsprozesse für die betrachteten geothermischen Systeme unterstützt. Mit der Integration verschiedener konkreter Prognoseinstrumentarien in Verfahren zur Entscheidungsfindung wurde hiermit ein zentraler Aspekt in der Arbeitsplanung des Verbundvorhabens adressiert. Die in EASyQuart erarbeiteten themenspezifischen Konzepte und Erfahrungen zu Erkundung, Monitoring, Simulation und Visualisierung wurden in einem übergeordneten Sinn in einer Art Handlungsleitfaden zusammengefasst, in dem optimale Strukturen formuliert wurden, welcher Akteur zu welchem Zeitpunkt mit welchen Instrumentarien im Auslegungsprozess aktiv werden sollte. Gleichzeitig wurden spezifische Planungsinstrumentarien benannt, bewertet und hinsichtlich ihrer Nutzungspotenziale charakterisiert.

Ausgehend von den Projektergebnissen wurden Beiträge zur Anpassung der Auslegungspraxis sowie regulativer Rahmenbedingungen formuliert. Dazu wurden u. a. für verfügbare Richtlinien, Leitfäden und Planungsunterlagen (z. B. DIN, VDI) Formulierungen und Regelungen identifiziert, die sich angesichts der in EASyQuart gewonnenen Erkenntnisse als nicht mehr zeitgemäß erwiesen und relevante Änderungen sowie Ergänzungen vorgeschlagen.

AP9: Projektmanagement, Workshops und Ergebnistransfer

Aufgabe der Gesamtkoordination des Verbundvorhabens war die Sicherstellung des wissenschaftlich-technischen Projektfortschritts in Zusammenhang mit den finanziellen Aspekten des Vorhabens sowie die Verbreitung von Projektergebnissen für Experten, potenzielle Nutzer, Behörden und gesellschaftliche Organisationen.

Um den Projektverlauf für alle Beteiligten transparent zu halten und den Wissensaustausch zwischen den Arbeitspaketen und Verbundpartnern zu gewährleisten, wurde in Ergänzung zu Arbeitstreffen einzelner Gruppen der Projektfortschritt auf halbjährlichen Verbundtreffen vorgestellt und diskutiert. Diese Treffen haben maßgeblich zur notwendigen Abstimmung und Integration der Projektarbeiten zwischen den Partnern beigetragen und es darüber hinaus ermöglicht, die inhaltliche Breite des Verbundvorhabens zu diskutieren sowie entsprechende fachliche Verknüpfungen zu identifizieren und auszubauen.

Als wesentliche Unterstützung des Verbundes bei dessen strategischer Ausrichtung, der Kooperation mit Dritten sowie den Verwertungsabsichten und -möglichkeiten erwies sich die Bildung eines projektbegleitenden Beirats mit unabhängigen Vertretern von Verbänden und Behörden. Die gemeinsame Diskussion von Zielen, Methoden und Ergebnissen des Vorhabens ermöglichte eine kontinuierliche Anpassung von Projektaktivitäten an jeweils aktuelle Erfordernisse der Praxis.

Ein essenzieller Bestandteil der Verwertungsplanung von EASyQuart war die Organisation von zwei Anwenderworkshops, die der unmittelbaren Verbreitung von Projektergebnissen vorrangig in Kreisen potenzieller Nutzer dienten. Als wesentliche Formen des Ergebnistransfers wurden (grundsätzlich gemeinsame) Publikationen der Verbundpartner in referierten Fachzeitschriften und die aktive Teilnahme an nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen realisiert.

Die in der Antragsphase für das Verbundvorhaben EASyQuart erstellten Arbeits-, Zeit- und Kostenpläne wurden während der Projektlaufzeit in Abstimmung zwischen den Verbundpartnern und mit dem Projektträger kontinuierlich an die jeweils aktuelle Situation angepasst. Dabei kann festgestellt werden, dass die Arbeiten im Projekt insgesamt weitestgehend planmäßig verliefen, sodass die übergeordneten Vorhabenziele uneingeschränkt erreicht werden konnten.

1.4 Abriss zum Stand des Wissens vor und während der Laufzeit von EASyQuart

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 Stadtquartieren zunehmend an Bedeutung. In Deutschland ist die Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen ein mittlerweile technisch etabliertes Verfahren zum Heizen und Kühlen. Hierbei werden offene Systeme (z. B. Brunnenanlagen für die direkte energetische Nutzung von Grundwasser) und geschlossene Systeme (z. B. Erdwärmekollektoren oder EWS – ein in Deutschland sehr häufig verbautes System) genutzt. Die Gesamtzahl der in Deutschland installierten Systeme zur Nutzung oberflächennaher Geothermie liegt aktuell laut Bundesverband Geothermie ([Bundesverband Geothermie e.V. 2023](#)) bei rund 440.000 mit einer installierten Leistung von 4400 MW. Nach einer starken Zunahme des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Wärmesektor, stagnierte der Anteil in den letzten Jahren bei etwa 14–15 % ([Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022](#)). In Deutschland werden für die Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen Systeme mit Wärmepumpen benötigt, um die für die Gebäudeversorgung erforderlichen Temperaturen zu erreichen. Daher haben sich vor allem gestiegene Stromnebenkosten für den Betrieb der Wärmepumpen negativ auf die weitere Implementierung geothermischer Systeme ausgewirkt. Es werden neue Konzepte für die Erschließung und den Betrieb benötigt, die eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Nutzung der oberflächennahen Geothermie ermöglichen, um das

große CO₂-Einsparpotenzial dieser Technologie gegenüber konventionellen Heiz- und Kühlsystemen auszuschöpfen.

Für die Dimensionierung oberflächennaher geothermischer Einzelanlagen und Netzwerke haben insbesondere deren ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit sowie die Steigerung der Energieeffizienz hohe Priorität. Bezüglich der Optimierung des Einsatzes von EWS als Einzelanlagen liegen umfangreiche Erfahrungswerte und ein breites Literaturangebot vor, welches hier lediglich exemplarisch mit ausgewählten Quellen zitiert werden kann. So 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 Dimensionierung skizzieren (vgl. [Bockelmann et al. 2011](#); [Koenigsdorff 2011](#); [Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 2009, 2011](#); [VBI 2008](#); [VDI 4640-1 2010](#)).

Beim Betrieb von mehreren EWS 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 Dimensionierung von großflächigen Geothermiesystemen getroffen werden. Der Leitfaden Erdwärme des BWP ([Bundesverband Wärmepumpe e.V. 2018](#)) weist beispielsweise auf die Wichtigkeit eines sachgemäßen Designs von Erdwärmesondenanlagen hin, ohne detaillierte Handlungsempfehlungen zu geben. Die intensive, großflächige Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen, sowohl durch Großprojekte (Wohnanlagen, Bürogebäude etc.) als auch durch viele individuelle Kleinanlagen auf engem Raum (z. B. Einfamilienhäuser), stellt somit eine wachsende Herausforderung dar, die sowohl zuverlässiger Planungs- und Auslegungsinstrumentarien aufseiten der Ausführenden und Betreiber bedarf, als auch zukünftig eines thermischen Untergrundmanagements ([Hähnlein, et al. 2011](#)). Dazu werden neuartige Quartierslösungen benötigt – eine geothermische grundstücksbezogene Einzellerschließung ist im Fall großflächiger Systeme ökonomisch und ökologisch nur bedingt anschlussfähig gegenüber der Quartiersentwicklung ([Schelenz 2017](#)). Besonders im urbanen Bereich ist eine übergeordnete Betrachtung notwendig, da das thermische Regime im Untergrund einer Vielzahl von natürlichen, aber auch anthropogenen Einflüssen (z. B. tiefen Infrastrukturen wie Abwasserleitungen, Tiefkeller, Tiefgaragen oder U-Bahntunnel) unterliegt ([Menberg et al. 2013](#)). Dazu ergibt sich im urbanen Raum aufgrund der hohen Nutzungsdichte bereits heute ein erhöhtes Konfliktpotenzial zwischen geothermischen Nutzern, aber auch mit anderen Nutzungsarten, z. B. Trinkwasser- oder Prozesswassergewinnung ([Epting und Huggenberger 2013](#); [Ferguson und Woodbury 2006](#)). Dies erfordert Quartierslösungen, die eine optimierte Anlagendimensionierung (z. B. Installationslänge der EWS) und einen effizienten ökonomischen Betrieb unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit erlauben.

Durch eine potenziell übermäßige thermische Ausbeutung besteht im Zusammenhang mit oberflächennahen geothermischen Systemen die Gefahr der Ausbildung von Temperaturanomalien im Untergrund. In Extremfällen kann es zu Gefrierer-

scheinungen im Untergrund kommen, die besonders im Wechsel mit Tauphasen Schäden an den Sonden, in der Hinterfüllung im Bohrloch oder selbst an den Gebäuden hervorrufen können. Eine starke Abkühlung des Untergrunds mindert zudem die Effizienz solcher Systeme (Stober und Bucher 2014) mit entsprechenden Auswirkungen auf deren wirtschaftlichen Betrieb. Neben unsachgemäßer Ausführung und Überlastung der Anlagen wurden insbesondere mangelhafte Dimensionierungen sowie unberücksichtigte Wechselwirkungen mit benachbarten Systemen als Ursachen deren ungenügender Effizienz erkannt (Bassetti et al. 2006; Casasso und Sethi 2014; Personenkreis Geothermie der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie 2011). Demgegenüber führt eine Überdimensionierung oberflächennaher geothermischer Systeme zu unnötig hohen Investitionskosten. Diese Probleme kommen dabei umso mehr zum Tragen, je größer die Anlage ist, z. B. je mehr EWS installiert wurden. Als Ursachen für die Über- und Underdimensionierung sind insbesondere unvollständige Kenntnisse der thermischen Untergrundparameter verbunden mit unzureichender Erkundung der geologischen Verhältnisse sowie fehlerhafte Annahmen des Wärme- und Kältebedarfs während des Auslegungsprozesses zu nennen (Hein et al. 2016a).

In der Bewertung des hier erläuterten Stands von Wissenschaft und Technik für die Optimierung von Anlagen zur Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden zeigt sich, dass die gegenwärtige Auslegungspraxis auf Dokumenten (z. B. Leitfäden, Richtlinien) und regulativen Rahmenbedingungen beruht, die vorrangig für die Planung von Einzelanlagen (z. B. eine EWS gekoppelt mit einer Wärmepumpe zur Wärmeversorgung eines Eigenheims) erstellt wurden. Mit der aktuell stark wachsenden Anzahl von in Planung befindlichen großflächigen oberflächennahen Geothermienetzwerken zur Versorgung von Gebäudekomplexen und ganzen Stadtquartieren hat die Anpassung der Auslegungsprozesse nicht Schritt gehalten. So ist beispielsweise selbst bei Wohngebieten mit intensiver Nutzung Oberflächennaher Geothermie (z. B. Eigenheimgebiete) die geothermische grundstücksbezogene Einzlerschließung heute noch gängige Praxis (Vienken et al. 2015). Diese Vorgehensweise ist ökonomisch und ökologisch nur bedingt anschlussfähig. Für großflächige oberflächennahe geothermische Systeme werden vielmehr Quartierslösungen benötigt, die sowohl eine optimierte Anlagendimensionierung (z. B. Anzahl, Anordnung und Installationslänge von EWS) als auch einen effizienten ökonomischen Betrieb unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit erlauben.

Ein freier Zugang zu den für die Standortbewertung und Dimensionierung notwendigen Daten für alle Beteiligten (z. B. Bürger, Planer und Genehmigungsbehörden) ist von übergeordneter Bedeutung. Fachplaner und Behörden können in diesem Zusammenhang neben nachvollziehbaren und konsistenten Abläufen zur Bewertung von Standorten und der Genehmigung geplanter Anlagen auch von zentralen, vollständigen Datenbanken für grundlegende, z. B. geologische, Daten profitieren. Grundvoraussetzung für die optimierte Dimensionierung der Anlagen und Systeme sowie der nachhaltigen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrunds ist jedoch eine ergänzende, lokale Vorerkundung standortspezifischer Bedingungen. Dafür, wie auch für analytische oder numerische Berechnungen des zu prognostizierenden Systemverhaltens, werden in der aktuellen Auslegungspraxis häufig vereinfachte Annahmen

getroffen, die den realen Gegebenheiten bei der großflächigen Bewirtschaftung des oberflächennahen geothermischen Raumes mit den vorhandenen Nutzungskonkurrenzen nur bedingt entsprechen. So wird beispielsweise die Relevanz von Gefrierprozessen im Untergrund im Zusammenhang mit dem Betrieb geothermischer Systeme bisher kaum untersucht, obwohl diese bei geothermischen Netzwerken deutlich gegenwärtiger sind als bei Einzelanlagen und zu den zuvor genannten Schadensbildern führen können.

Ergänzend zu diesen allgemeinen Erläuterungen wird nachfolgend der Stand des Wissens für die jeweiligen Arbeitsgebiete dargelegt.

Erkundungs- und Monitoringmethoden

Für die Konzeption und Genehmigung oberflächennaher geothermischer Anlagen sind Aussagen über die konkreten Standortbedingungen von essenzieller Bedeutung, um zunächst die prinzipielle Machbarkeit und dann in einem weiteren Schritt die zu erwartende Effizienz der Anlage modellbasiert über einen längeren Zeithorizont bewerten zu können (siehe u. a. [Meng et al. \(2019\)](#); [StMUGV \(2005\)](#)). Wesentliche Kennwerte zur Auslegung von Geothermiesystemen sind die Wärmeleitfähigkeit, die ungestörte Untergrundtemperatur und Informationen zur Grundwasserdynamik. Zur Relevanz der Grundwasserdynamik kann u. a. bei [Magraner et al. \(2021\)](#) und [Perego et al. \(2022\)](#) nachgeschlagen werden. Messwerte zur Wärmeleitfähigkeit können u. a. im Labor an Proben bestimmt werden, die während einer Bohrung gewonnen wurden. Hierbei wird aber ein möglicher Einfluss von Grundwasserströmungen nicht erfasst. Mithilfe von Thermal-Response-Tests kann die scheinbare Wärmeleitfähigkeit (Mischsignal aus der Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix und einem etwaigen Einfluss der Grundwasserdynamik) *in situ* bestimmt werden ([Sanner et al. 2000](#)). Dieser Test ist aber in Bezug auf die Quantifizierung des Einflusses der Grundwasserdynamik mit erheblichem Aufwand und verbleibenden Unsicherheiten verbunden, dies gilt insbesondere unter heterogenen Untergrundbedingungen ([Angelotti et al. 2018](#)). Dennoch haben Untersuchungen gezeigt, dass in dieser Form ermittelte Materialparameter häufig noch immer genauer sind als allein über die Lithologie geschätzten Werte ([Schelenz 2017](#)). Abweichungen können zu einer Über- oder Underdimensionierung der Geothermieanlage führen ([Koenigsdorff 2011](#); [Marc et al. 2007](#)). Während der Einsatz innovativer hydrogeologischer und geophysikalischer Messmethoden ([Dietrich und Leven 2006](#); [McCall et al. 2005](#)) in vielen Anwendungsbereichen zu den Standards zählt, ist eine Verwendung dieser Methoden in der oberflächennahen geothermischen Vorerkundung bislang unüblich. Bei der Installation von Kleinanlagen im Ein- und Mehrfamilienhausbereich < 30 kW Heizleistung wird in der Regel auf eine Vorerkundung verzichtet ([VDI 4640-1 2010](#)), obgleich Studien belegen, dass eine Erhebung von Vorortparametern maßgeblich zu einer optimierten Anlagendimensionierung und besseren Vorhersage der Umweltauswirkungen beitragen kann ([Meng et al. 2019](#); [Schelenz et al. 2017](#)). Die fehlende Umsetzung liegt vor allem daran, dass bei der derzeit gängigen grundstücksbezogenen Erschließungspraxis finanzielle Restriktionen häufig keine Messung der relevanten Parameter erlauben. Selbst bei Großanlagen > 30 kW Heizleistung werden häufig nur TRTs durchgeführt, die zwar eine *in-situ*-Messung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds

erlauben, aufgrund der integralen Messwerterhebung aber in der Regel keine differenzierten Aussagen über den Untergrundaufbau zulassen. Eine Ausnahme hiervon ist der Enhanced-Thermal-Response-Test (ETRT), der jedoch in der Praxis aufgrund des erhöhten Aufwandes und der damit einhergehenden Kosten nicht standardmäßig eingesetzt wird. Weiterhin liegt eine große Herausforderung, insbesondere bei der geothermischen Quartierserschließung, in der räumlichen Größe des zu charakterisierenden Gebietes gegenüber geothermischen Einzelanlagen. Insbesondere in Bereichen mit variabler Geologie ist eine Charakterisierung des Schichtenaufbaus und seiner räumlichen Variabilität (vor allem hinsichtlich der für die Geothermie relevanten Kennwerte) ausschließlich über Punktmessungen wie den TRT mit einem sehr großen Aufwand verbunden. Gerade für oberflächennahe Anwendungen (bis ca. 30 m Tiefe) auf Quartiersskala wie flache EWS oder offene Systeme ist daher die Anwendung innovativer Erkundungsstrategien (z. B. Kopplung geringinvasiver DP Sondiertechnik und oberflächengeophysikalischer Messungen (Klingler 2021; Utom 2019; Wunderlich et al. 2018)) notwendig. Damit kann die oftmals große Modellunsicherheit, die durch die Approximation von Parametern wie hydraulische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit oder Porosität entsteht, reduziert werden und die Anlagen können nachhaltig ausgelegt als auch ökologisch und ökonomisch nachhaltig betrieben werden.

Das Monitoring von Umweltauswirkungen bei der Nutzung großer oberflächennaher geothermischer Anlagen findet in der Regel über die Installation von Grundwasser- oder Bodentemperaturmessstellen mit Temperaturstichtagsmessungen oder kontinuierlichen Aufzeichnungen von Grundwasser- oder Bodentemperaturen mittels installierter Messsensorik (Temperatur-Logger) statt. Die Bewertung bzw. Quantifizierung der von der Nutzung der Oberflächennahen Geothermie verursachten Boden- und Grundwassertemperaturänderungen erfolgt dann durch den Vergleich der vermeintlich ungestörten Untergrundtemperaturen im Grundwasseranstrom mit den Messwerten der Abstrommessstellen. Das Monitoring der Grundwassertemperaturen ist dadurch mit erheblichen Kosten verbunden, die eine wirtschaftliche Nutzung Oberflächennaher Geothermie einschränken können. Etwaige Betriebsanomalien werden beim klassischen Monitoring in der Regel erst dann erkannt, wenn Auswirkungen bereits messbar sind. Da die Quantifizierung der Auswirkungen auf Messungen an wenigen Aufschlusspunkten beruht, ist zudem deren Repräsentativität entscheidend. Insbesondere in neuen Quartieren kann es zu einer langfristigen Änderung der Untergrundtemperaturen (i. d. R. Anstieg) unabhängig durch die Nutzung Oberflächennaher Geothermie kommen. Dieser als „urbane Grundwasserwärminsel“ beschriebene Effekt (Balke 1974; Böttcher und Zosseder 2022; Zhu et al. 2010) und seine Auswirkungen auf das geothermische Potenzial sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (Arola und Korkka-Niemi 2014; Hemmerle et al. 2022; Zhu et al. 2010). Vor allem gilt es aber, mögliche Veränderungen der Grundwassertemperatur durch die Errichtung von Gebäuden und Versiegelung von Oberflächen (z. B. als Verkehrs- und Parkflächen) zu quantifizieren und diese Veränderung aktiv bei der Bewertung der durch die Geothermienutzung hervorgerufenen Veränderung der Boden- und Grundwassertemperatur zu berücksichtigen.

Numerische Simulation von Prozessen im Untergrund

Die in geotechnischen Anwendungen ablaufenden Vorgänge koppeln thermische, hydraulische, mechanische sowie chemische (THM/C) Prozesse miteinander. Der Begriff THM/C-Modellierung ist mittlerweile Standard in der Literatur zur Simulation geotechnischer Systeme. Zu den Grundlagen der hierfür relevanten Mechanik und Numerik poröser Medien sowie zur Nutzung im Bereich der Ingenieurwissenschaften, der Bio- und Geomechanik existiert ein kaum übersehbares Literaturangebot. Allerdings wurde eine umfassende Kopplung der zuvor angeführten Prozesse bisher nur unter vereinfachten Annahmen beschrieben und realisiert. So werden z. B. oft Phasenübergänge, inelastische Deformationen und nicht-isotherme Reaktionssysteme nicht im vollständigen THM/C-Kontext betrachtet. Es stehen zwar etablierte Softwareprodukte für die einzelnen Prozesse zur Verfügung, deren Weiterentwicklung für neue Fragestellungen ist jedoch kaum möglich, da der Quellcode oft nicht frei zugänglich verfügbar und eine programmtechnische Entwicklungskompetenz beim Anwender nicht vorhanden ist. Gleichzeitig vermindert die Kopplung dieser spezialisierten Codes über Datentransfer drastisch die Rechengeschwindigkeit und ist fehleranfällig, wenn die Codes z. B. konzeptionell bedingt unterschiedliche Rechengitter mit permanenter Inter- bzw. Extrapolation von Daten verwenden.

Geotechnische Anwendungen können derzeit mit einer Reihe etablierter kommerzieller und wissenschaftlicher Programmsysteme simuliert werden. Als repräsentative, unvollständige Auswahl seien hier die TOUGH- (Pruess 2004) und FLAC-Familie (Moridis et al. 2009), Code_Bright (Olivella et al. 1996) und DuMux (Flemisch et al. 2011) genannt.

In der aktuellen Auslegungspraxis für die Planung oberflächennaher geothermischer Anlagen werden meist kommerzielle Programmsysteme genutzt, die auf analytischen Modellen basieren. Zur Herleitung entsprechender analytischer Lösungen 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. 2013) berücksichtigen. Weiterhin gehen alle analytischen Lösungen von homogenen Untergrundeigenschaften aus.

Zur Berücksichtigung aller relevanten Effekte, die im oberflächennahen Untergrund bei dessen geothermischer Bewirtschaftung beobachtet werden, sind numerische Simulationen unverzichtbar. Als kommerziell verfügbares Berechnungswerkzeug sei hier beispielhaft das Programm Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System (FEFLOW) (Diersch 2014) erwähnt, welches zur Integration von Wärmepumpen über eine Schnittstelle zur Gebäudesimulationssoftware TRN-SYS (Fiksel et al. 1995) verfügt. FEFLOW wurde insbesondere für die Simulation von Fluid-, Masse- und Wärmetransport in porösen Medien entwickelt und spricht damit ein Anwendungsgebiet an, dem auch die in EASyQuart untersuchten Systeme zuzuordnen sind.

Wie zuvor erwähnt, können die genannten Softwareplattformen zur Simulation komplexer Prozesse im Untergrund aktuell nur einen spezifischen Teil des gesamten notwendigen Prozessspektrums abdecken. Des Weiteren ist ein Erwerb dieser Programme für klein- und mittelständische Unternehmen wirtschaftlich in der Re-

gel nicht vertretbar. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Projektarbeiten in EASyQuart ein anderer Weg verfolgt: Die unter Koordination des UFZ von einem internationalen Konsortium entwickelte Open-Source-Programmplattform OGS steht als freies, wissenschaftliches Simulationssystem zur Verfügung (Kolditz et al. 2012) und wurde für die spezifischen Fragestellungen von EASyQuart modifiziert bzw. ergänzt. Ausgangspunkt war dabei eine Programmversion, die über ein integriertes EWS-Wärmepumpen-Modell verfügt (Hein et al. 2016a, b; Hein 2018; Shao et al. 2016; Zheng et al. 2016). Sowohl FEFLOW als auch OGS basieren auf dem sogenannten Dual-Continuum-Approach (Diersch et al. 2011a, b). Bei diesem Ansatz werden die EWS als Linienelemente idealisiert, die in ein dreidimensionales Netz des umgebenden Untergrunds integriert werden. Der horizontale und vertikale Wärmetransport mittels Wärmeleitung und Advektion wird dabei durch ein thermisches Widerstands-Kapazitäts-Netzwerk abgebildet. Die größten Vorteile dieser Vorgehensweise sind die vollständige Verfügbarkeit der Quellen von OGS sowie die dort realisierte Konzeption einer intrinsischen Prozesskopplung als gemischte Finite-Element-Formulierung.

Numerische Unsicherheitsanalysen und mathematische Optimierungsverfahren

Die Unsicherheit bezüglich der Daten, mit denen numerische Simulationen der im Untergrund ablaufenden Prozesse durchgeführt werden, stellt ein wesentliches Problem für die optimale Auslegung von geotechnischen Systemen dar. Konkrete Daten für die Parametrisierung der Simulationsmodelle liegen nur lokal, beispielsweise für Bohrkerne, vor. Die Werte für die umliegenden Bereiche sind nur zu schätzen. Mittels Monte-Carlo-Simulationen kann in diesem Zusammenhang die Unsicherheit quantifiziert werden, mit der Parameter flächenmäßig verteilt angegeben werden. Dabei wird unter Nutzung geostatistischer Techniken eine Vielzahl stochastisch äquivalenter Modelle generiert, mit denen die Unbestimmtheit der genutzten Daten berücksichtigt werden kann (Chilès und Delfiner 2012; Pyrcz und Deutsch 2014). Zur numerischen Simulation müssen für die Parameter geeignete Verteilungen ausgewählt werden, die z. B. aus Erkundungsmessungen am jeweils betrachteten Standort zu ermitteln sind.

Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Messdaten, die zudem oft nur in geringer Auflösung vorliegen, gibt es insbesondere für tiefe geotechnologische Anwendungen wie auch beispielsweise für die geologische Speicherung von Energieträgern (z. B. Methan, Wasserstoff) und Abfällen (z. B. Kohlendioxid) umfangreiche Forschungsarbeiten zur Unsicherheitsanalyse. Damit werden geschätzte Modellparameter (z. B. hydraulische, thermische oder mechanische Parameter des Untergrunds) weiterer geostatistisch basierter Variationen unterzogen und die Simulationsergebnisse können im Sinne einer mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit behafteten Lösung interpretiert werden. Eine Reihe von Autoren stellt das Thema der Unsicherheitsanalysen in Verbindung mit der Parameterschätzung zur Kalibrierung von Simulationsmodellen vor (Ewing und Lin 1991; Neuman 1973; Sun 1999; Yeh 1986).

Aktuelle Projekte betrachten in Bezug auf EWS u. a. Sensitivitätsanalysen zum Lastprofil (Gao et al. 2022) oder zu bestehenden sowie neu entwickelten Verpress-

materialien, um die Einflüsse auf den Wärmetransport zu analysieren (Badenes et al. 2020; Chicco und Mandrone 2022). Unsicherheitsanalysen werden zu Themen wie dem Bohrlochwiderstand (Choi et al. 2022) oder der tatsächlichen Position von EWS im geologischen Untergrund (Steinbach et al. 2021) durchgeführt.

Für die Lösung von Optimierungsproblemen stehen im Wesentlichen zwei Klassen von Optimierungsverfahren zur Verfügung: gradientenbasierte (deterministische) und gradientenfreie (stochastische) Ansätze. Bei beiden Ansätzen wird ein Minimum für eine geeignete Zielfunktion gesucht. Dabei nutzen gradientenbasierte Verfahren in den Iterationsschritten die erste bzw. teilweise auch die zweite Ableitung der Zielfunktion, um in Richtung des gesuchten Minimums voranzuschreiten (Dennis und Schnabel 1996; Rao 2009). Voraussetzung dabei ist, dass die Ableitung der Zielfunktion nach den gesuchten Parametern existiert und berechnet werden kann. Die stochastischen Verfahren kommen meist ohne die Berechnung der Ableitung aus (Endres et al. 2018; Nelder und Mead 1965; Storn und Price 1997; Xiang et al. 1997). In diesem Zusammenhang wird beispielsweise durch geschickte Kombination und Variation von Parametersätzen nach bestimmten Evolutionsstrategien versucht, einen die Zielfunktion optimierenden Parametersatz zu ermitteln. Diese Verfahren verlangen eine sehr große Anzahl an Berechnungen des Zielfunktionswertes, was insbesondere bei Berücksichtigung komplexer Simulationsgebiete, wie den hier betrachteten Problemstellungen, sehr aufwendig ist. Für die Oberflächennahe Geothermie wurden Optimierungsproblemstellungen formuliert, mit dem Zweck, den durch Erdwärmesondenfelder bedingten thermischen Einfluss im Erdreich zu minimieren, extreme Temperaturanomalien zu vermeiden und auf diesem Wege die Leistung der Wärmepumpe zu verbessern. Konkret wird dabei die maximale Temperaturveränderung minimiert, indem entweder die Entzugsleistung optimal auf die Sonden verteilt wird oder unnötige Sonden in einem vorgegebenen Netz identifiziert und ausgeschlossen werden (Bayer et al. 2014; Hecht-Méndez et al. 2013; de Paly et al. 2012).

Thermische Gebäudesimulation

Dynamische Prozesse in Gebäuden und Anlagen wie z. B. Wärmeleitung, Konvektion, Luftströmung u. a. können mit Programmen wie beispielsweise TRNSYS, EnergyPlus oder der Programmiersprache Modelica simuliert werden. Diese Ansätze ermöglichen die Simulation kompletter Energiesysteme und werden zunehmend auch in der Planungspraxis eingesetzt, um komplexe Szenarien der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien abzubilden. Sola et al. (2018) geben einen vergleichenden Überblick über den aktuellen Stand dieser Ansätze. Für die Betrachtung von EWS und anderen geothermischen Baugruppen stehen häufig spezielle Softwaremodule zur Verfügung bzw. können vom Anwender selbst über offene Schnittstellen integriert werden. TRNSYS und andere spezialisierte Programmsysteme für die Simulation von EWS, wie beispielsweise SBM (Eskilson 1986), COSOND (Eugster 1991) oder das Programm EWS (Huber und Schuler 1997), betrachten jedoch im Wesentlichen technische Systemkomponenten und berücksichtigen das Erdreich nur in stark vereinfachter Form. Für heterogene Untergrundzusammensetzungen, Grundwasserleiter oder die Berücksichtigung benachbarter thermischer Anlagen sind aus-

föhrlichere Betrachtungen notwendig. Im Rahmen von Co-Simulationen werden spezialisierte Programmsysteme wie z. B.

- FEFLOW und EnergyPlus (Sagerschnig et al. 2014),
- FEFLOW und MATLAB (Welsch et al. 2017) oder
- TOUGH und Modelica (Hu et al. 2020)

gekoppelt, um den Untergrund dreidimensional diskretisiert zu modellieren und die zuvor angesprochenen Bedingungen zu berücksichtigen.

In Bezug auf das Gebäude schreibt das [Gebäudeenergiegesetz – GEG \(2020\)](#) bei Neubauten die Pflicht zur Nutzung erneuerbarer Energien vor. Zu diesen erneuerbaren Energien zählen neben der solaren Strahlungsenergie und der in Biomasse enthaltenen Energie auch die Erd- und Umweltwärme, die mittels luft- und erdreichgekoppelter Wärmepumpenanlagen erschlossen werden können.

Für einzelne Planungsvorhaben ist die gekoppelte Simulation von Erdreich, Wärmepumpenanlage, Heizungsanlage, Gebäude und Regelungstechnik oft zu aufwendig und nicht wirtschaftlich. Aus technischer Sicht ist eine gekoppelte Simulation sehr anspruchsvoll, da hier auch verschiedene mathematische Simulationsmethoden vereint werden müssen. Eine optimale Konfiguration des Zusammenspiels dieser fünf Teilsysteme kann nur durch eine systematische Untersuchung mit detaillierten Modellen vorgenommen werden. Der ISE-Feldtest (Miara et al. 2011) zeigt, dass hier großer Handlungsbedarf besteht, denn die Bandbreite der Jahresarbeitszahlen liegt bei den untersuchten Luft-/Wasser-Wärmepumpenanlagen zwischen 2,2 und 4,2 sowie bei den Sole-/Wasser-Wärmepumpen zwischen 3,0 und 5,4. Bezüglich der Forderungen des [Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG \(2009\)](#) erreichen viele Anlagen nicht die angestrebten Jahresarbeitszahlen.

Wissenschaftliche 3D-Visualisierung

Wissenschaftliche 3D-Visualisierung ist integraler Bestandteil von Modellierungs-Workflows, der es Wissenschaftlern gestattet, große Datensätze und numerische Simulationsergebnisse übersichtlich darzustellen und diese selbst besser zu verstehen, als auch einer breiten Öffentlichkeit anschaulich zu vermitteln. Für ingenieurtechnische Anwendungen ist die 3D-Visualisierung mittlerweile zu einem unverzichtbaren Werkzeug der Interpretation komplexer und zeitlich wie räumlich veränderlicher Datenmengen in einer Vielzahl wissenschaftlicher und technischer Bereiche geworden (Harder et al. 2016; Molnar und Gruchalla 2018; Neubert et al. 2019). Um die Vorteile dieser virtuellen Darstellungsformen optimal nutzen zu können, sind geeignete Workflows, Schnittstellen und Programmkomponenten erforderlich, deren Entwicklung aufgrund der Größe der Daten (Dubois und Lekien 2019; Wu et al. 2022) und der Variabilität unterschiedlicher Datenquellen und der Breite der Anwendungsbereiche im konkreten Fall eine große wissenschaftliche Herausforderung darstellt (Childs et al. 2013; Kolditz et al. 2019; Rink et al. 2014).

Methoden und Instrumentarien der wissenschaftlichen 3D-Visualisierung sind häufig auf Anwendungen für die Nutzung durch Behörden (Serpen et al. 2005; Weers und Huggins 2020) oder durch Firmen beschränkt, wobei Letztere die verwen-

ten Ansätze nur in Ausnahmefällen publizieren (so beispielsweise [Hanson \(2021\)](#) zur Dokumentation der kommerziellen CoViz4D-Software). In der aktuellen Auslegungspraxis für oberflächennahe geothermische Einzelanlagen bzw. großflächige Systeme spielt 3D-Visualisierung bisher eine untergeordnete Rolle. Auch für die Visualisierung von Gebäuden, wie sie für eine geeignete Darstellung von Haustechnikkonzepten von Vorteil wäre, finden sich lediglich vereinzelte Anwendungen für Smart Homes ([König et al. 2021](#)) oder die Nutzung öffentlicher Gebäude ([Oppermann und Munzner 2020](#)). Mit der Entwicklung von Arbeitsplatzlösungen und mobiler Visualisierungstechnik verdient dieses Element der Darstellung, Validierung, Diskussion und Präsentation komplexer, mehrkomponentiger Systeme mit heterogenen Daten aus unterschiedlichen Quellen verstärkte Beachtung.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Initiativen

Die Aktivitäten der Verbundpartner innerhalb des Forschungsverbundes EASyQuart waren in ergänzender Weise gut mit Untersuchungen und Ergebnissen weiterer themenrelevanter Projekte abgestimmt, die unter Beteiligung der Partner in anderen internationalen und nationalen Programmen gefördert wurden. Für die Auswahl, Entwicklung und Evaluierung innovativer numerischer Simulationsverfahren zur Analyse des Systemverhaltens und der Auswirkungen einer umfassenden geothermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrunds im urbanen Raum sowie integrativer Methoden zur 3D-Visualisierung heterogener Daten ist dabei insbesondere das in der Zwischenzeit beendete Verbundvorhaben „Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher thm/c- Integration unterirdischer Speichertechnologien in die Energiesystemtransformation am Beispiel des Modellgebietes Schleswig-Holstein (ANGUSII)“ (Förderung durch das vormalige BMWi) zu nennen, in welches das UFZ als Partner eingebunden war. In diesem Zusammenhang konnten für EASyQuart relevante Techniken in enger Kooperation mit entsprechenden städtischen Behörden u. a. auch an einem zur geologischen Wärmespeicherung genutzten Standort in Hamburg validiert werden.

In den zwei, mittlerweile abgeschlossenen, Projektphasen des Verbundvorhabens TestUM-Aquifer (Förderung durch das BMBF) entwickelte das Department MET des UFZ Strategien zum Monitoring als Grundlage für das bessere Verständnis von Fließprozessen im Bereich der Hochenthalpiewärmespeicherung in Lockergesteinsgrundwasserleitern. Gewonnene Erkenntnisse vereinfachten und verkürzten strategische Entscheidungen sowie Vorbereitungszeiten für Projektarbeiten zum Grundwasser- und Temperaturmonitoring an für EASyQuart relevanten Standorten und konnten im Projekt erfolgreich auf deren Übertragbarkeit für den urbanen Raum getestet werden. Die Auswahl geeigneter Erkundungsverfahren für den Untergrund an im Rahmen von EASyQuart analysierten Standorten wurde durch Erkenntnisse unterstützt, die das Department MET des UFZ im ebenfalls bereits beendeten Verbundvorhabens SIMULTAN (Förderung durch das BMBF) gewinnen konnte.

Spezifische Projektziele bestanden dort u. a. in der Entwicklung und Erprobung von Strategien zur Erkundung und Charakterisierung des oberflächennahen Untergrunds (beispielsweise durch Kombination geeigneter nicht- und geringinvasiver Erkundungstechniken) zur besseren Charakterisierung des hydrogeologischen Regimes und dessen Variabilität im Vorfeld der Entwicklungen eines Erdfallfrühwarnsystems.

Im Rahmen des 2019 abgeschlossenen, durch die Europäische Kommission geförderten Verbundvorhaben „Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe (GeoPLASMA-CE)“ war die geoENERGIE Konzept GmbH u. a. für die Validierung von Gesteinsparametern, die vergleichende Durchführung von Testarbeiten im Raum Vogtland sowie das Kommunikationsmanagement verantwortlich. Diese Untersuchungen stellten ebenso wie zahlreiche Aktivitäten in verschiedenen Phasen realer Auslegungsprozeduren an diversen Standorten methodische Grundlagen für EASyQuart bereit. Von besonderem Interesse waren dabei der Zugang zu Daten für die Validierung des Prognoseinstrumentariums sowie dessen Bewertung im Vergleich mit etablierten kommerziellen Lösungen, beispielsweise für die Standorterkundung, das Wirkungsmonitoring sowie die numerische Simulation von Prozessen in Untergrund und Haustechnik. Die Erhebung und Nutzung von Daten zu Parametrisierungs- und Validierungszwecken war auch Gegenstand einer Reihe weiterer Initiativen, in die Beteiligte des Verbundvorhabens EASyQuart gemeinsam mit unterschiedlichen externen Partnern im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben oder auch – im Falle der geoENERGIE Konzept GmbH – im Rahmen von Geschäftsaktivitäten involviert waren. Im Kap. 2 werden diese näher erläutert.

Zusammen mit anderen Partnern aus Industrie, Forschung, Verwaltung und Behörden erarbeiteten die EASyQuart-Verbundpartner im Förderzeitraum eine Projektskizze im Rahmen der BMBF-Initiative „WIR! – Wandel durch Innovationen in der Region“ aus der Programmfamilie „Innovation & Strukturwandel“. Der Antrag unter dem Titel „Grüne Wärme – Wärmeversorgung der „Stadt der Zukunft“ und der Region im Kontext von Transformation und Adaption – RegioZukunft:Wärme“ thematisierte die Entwicklung, Gestaltung und Umsetzung innovativer ganzheitlicher Ansätze sowie effizienter, ökologisch nachhaltiger und partizipativer Konzepte für eine klimaneutrale Transformation der urbanen und regionalen Wärmeenergieversorgung in den Braunkohlerevieren Sachsens und Sachsen-Anhalts auf der Basis erneuerbarer Energiequellen. Da in diesem Rahmen der geologische Untergrund als Quelle und Speicherort thermischer Energie eine der wesentlichen Transfertechnologien darstellen soll, besaß diese Initiative relevante Schnittstellen zum Vorhaben EASyQuart. Von den Gutachtern wurde die Skizze für die Konzeptphase der Förderinitiative empfohlen, in der ein entsprechendes WIR!-Konzept erstellt wurde. Obwohl die Umsetzungsphase mit diesem Konzept nicht erreicht werden konnte, wurden einzelne Konzeptideen punktuell in andere Initiativen integriert, die bereits zu weiteren Fördermittelanträgen mit inhaltlichen Bezügen zu EASyQuart führten. Exemplarisch seien in diesem Zusammenhang mit den Verbundvorhaben „Modelle zur Systemintegration von Aquiferspeichern in Städten (SpeicherCity)“ sowie „Design und Pilotanlagentest für die Nutzung kontaminierter Aquifere für das Wärmemanagement mit ATES-Anlagen (KONATES)“ zwei erfolgreiche Projektaktivitäten

im Rahmen der BMBF-Ausschreibung „Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in Aquiferen“ genannt.

Zu den Hauptergebnissen des Verbundvorhabens EASyQuart gehörte die Entwicklung eines integrierten Modellierungs- und Softwareansatzes zur numerischen Analyse gekoppelter multiphysikalischer Prozesse in oberflächennahen geothermischen Systemen inklusive des dazugehörigen Datenmanagements und einer synoptischen 3D-Visualisierung heterogener Daten aus verschiedenen Quellen. Für die Realisierung der ausgewählten und entwickelten Modelle und Algorithmen im Rahmen der wissenschaftlichen Open-Source-Softwareplattform OGS war die intensive Zusammenarbeit mit anderen nationalen und internationalen Modelliererguppen des OpenGeoSys-Konsortiums unerlässlich. Beispielhaft seien dazu die engen Kontakte zur Christian-Albrechts-Universität zu Kiel sowie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg genannt. Beide universitäre Einrichtungen waren und sind auch in Kooperation mit dem UFZ an vielfältigen gemeinsamen Forschungsaufgaben beteiligt. Darüber hinaus koordiniert das UFZ eine OGS-Workshop-Reihe, bei deren jährlich stattfindenden Veranstaltungen auch der jeweils aktuelle Stand der EASyQuart-Projektarbeiten zur Modellierung und numerischen Simulation präsentiert wurde. Zu diesen Veranstaltungen wurden zudem zwischen unterschiedlichen OGS-Entwicklergruppen gezielt Synergien in der Modell- und Softwareentwicklung herausgearbeitet, von denen auch das EASyQuart-Vorhaben profitieren konnte (z. B. bei der Nutzung und Implementierung spezifischer numerischer Erdwärmesondenmodelle im Rahmen von Mehrfach-Kontinuums-Ansätzen).

Das Verbundvorhaben EASyQuart brachte sich aktiv in die Arbeit der durch die RWTH Aachen sowie durch das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg koordinierten Begleitforschung EnEff.Gebäude.2050 bzw. Energiewendebauen ein. Dabei wurden u. a. folgende konkrete Maßnahmen unterstützt:

- Erstellung von Projektinformationsmaterial (z. B. Projektposter für Internetseiten der Begleitforschung und Projektforen),
- Beteiligung an jährlichen Projektforen mit eigenen Beiträgen,
- Teilnahme an einem Telefoninterview mit der Begleitforschung im Mai 2020,
- Unterstützung von Online-Fragebogenaktionen.

In diesem Zusammenhang wurden auch Kontakte zu weiteren Initiativen der genannten Fördermaßnahme geknüpft. So wurden beispielsweise verschiedene Projekte angefragt, inwiefern dort erzielte Resultate im Rahmen von EASyQuart verwendet werden können. Zu einer konkreten Zusammenarbeit kam es dabei mit dem Projekt „Kommunale netzgebundene Energieversorgung - Vision 2020 am Beispiel der Gemeinde Wüstenrot (EnVisaGe)“ der Förderlinie EnEff:Stadt, in deren Rahmen Daten von Monitoringmaßnahmen eines geothermischen Umsetzungsprojekts in Wüstenrot für die Validierung von in EASyQuart entwickelten Simulationsinstrumentarien genutzt werden konnten. Details werden wiederum in Kap. 2 dieses Buches näher erläutert. Im Vorfeld des EASyQuart-Anwenderworkshops im September 2022 im Leipziger KUBUS wurden zudem weitere Verbundvorhaben identifiziert, die sich aktuell in Förderung befinden und mit denen inhaltliche Schnittstellen zu EASyQuart

bestehen. Vertreter dieser Vorhaben wurden zum Anwenderworkshop mit Vorträgen eingeladen. Eine Zusammenarbeit mit diesen Projekten wird insbesondere für eine potenzielle Nachfolgeaktivität von EASyQuart interessant. Konkret wurden Kontakte mit folgenden Verbundvorhaben aufgenommen:

- „Geoportal-basiertes Monitoring eines geothermisch gespeisten kalten Nahwärmenetzes als Beitrag zur Wärmewende mit aktiver Nutzereinbindung (GeoWärmeWende)“ koordiniert durch die RWTH Aachen. Kooperationsoptionen bestehen bezüglich der Entwicklung von Planungsplattformen für oberflächennahe geothermische Systeme (z. B. Instrumentarien, Schnittstellen, Geodateninfrastruktur), der Anpassung von Simulationsprogrammen für Gebäudetechnik, Wärmepumpen, Wärmenetze, geothermische Quellsysteme und Untergrund sowie der bidirektionalen Kopplung von Simulationen der Anlagentechnik und der Multi-Physik-Modelle des Untergrunds.
- „Nutzung multipler Wärmequellsysteme im urbanen Quartierskontext am Beispiel des Lagarde Campus in Bamberg (MultiSource)“ unter Koordination der TH Nürnberg Georg Simon Ohm. Spezifische Anknüpfungspunkte zu EASyQuart bzw. Nachfolgeinitiativen liegen beispielsweise in der Entwicklung von Simulationsmodellen für Wärmequellsysteme sowie deren Kopplung zur Haustechnik sowie in der geologischen und bodenkundlichen Begleitung u. a. für thermische und hydrogeologische Simulationen.
- „Nachhaltige Bewirtschaftung großer oberflächennaher Geothermieanlagen durch Regeneration mit Solar-, Umwelt- und Abwärme (Geo-Resume)“ koordiniert durch das Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH). Sich mitbreak EASyQuart überlappende Arbeitsgebiete sind in folgenden Bereichen zu finden: Verbesserung von Bewertungsgrundlagen für Planung, Genehmigung und Betrieb von Erdwärmesondenfeldern, Entwicklung von Konzepten für einen nachhaltigen und leistungsoptimierten Betrieb oberflächennaher geothermischer Systeme (z. B. mittels thermischer Regeneration des Untergrunds), Analyse der Energietransporte zwischen Anlage und Untergrund mittels Modellierung und Simulation, Erarbeitung eines zweckmäßigen Monitorings und von Verfahren zur Zustandsanalyse des Untergrunds, Bereitstellung von Hinweisen für die Genehmigungspraxis und eine verallgemeinerte wissenschaftlich-technische Bewertung der Maßnahmen als Entscheidungshilfe sowie Erstellung von Planungsinstrumentarien.
- „Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme (QEWsplus)“ unter Koordination der Hochschule Biberach. Bezüglich der Qualitätssicherung und -steigerung oberflächennaher geothermischer Anlagen besteht ein übereinstimmendes Gesamtziel mit dem Vorhaben EASyQuart. Das beinhaltet u. a. die Untersuchung von Aspekten der Qualitätssicherung und -steigerung der betrachteten Systeme von der Auslegung und Planung über die Ausführung bis hin zur Inbetriebnahme und Entwicklung von Lösungen, erweiterte thermische Testmethoden (verbesserte TRTs, thermische Tomografie) sowie die multifunktionale Modellierung von oberflächennahen Geothermiesystemen.

Im letzten Projektjahr von EASyQuart wurde eine enge Kooperation mit den Stadtwerken Leipzig als potenziellen Nutzer von Projektergebnissen vereinbart. Konkret planen die Stadtwerke Leipzig die Ertüchtigung der Wärmeversorgung eines eigenen Verwaltungs- und Dienstleistungsstandorts durch den Einsatz unterschiedlicher Quelltechnologien. Dazu gehört auch die Errichtung eines Erdwärmesondenfeldes, dessen Erkundung durch Projektarbeiten von EASyQuart begleitet wird. In einem potenziellen Nachfolgevorhaben ist die Erstellung und Bearbeitung eines digitalen Zwillings der vorgesehenen oberflächennahen Geothermieanlage inklusive Wärmepumpen- und Haustechnik geplant.

Projektbegleitender Beirat

Die strategische Ausrichtung und Kooperation sowie die Verwertungsabsichten und -möglichkeiten von EASyQuart wurden durch einen projektbegleitenden Beirat unterstützt. Während der Projektlaufzeit diskutierte das Konsortium auf regelmäßigen Treffen (z. B. während der regulären Verbundtreffen und zu den Anwenderworkshops) mit dem Beirat die Ziele, Methoden sowie Ergebnisse des Vorhabens sowie deren praktische Relevanz. Wir bedanken uns an dieser Stelle herzlich beim Beirat für die Unterstützung und wertvollen Hinweise bei der Projektbearbeitung.

Literatur

- Angelotti A, Ly F, Zille A (2018) On the applicability of the moving line source theory to thermal response test under groundwater flow: considerations from real case studies. *Geoth Energy* 6(1):12. <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0098-z>
- Arola T, Korkka-Niemi K (2014) The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from quaternary aquifers in Finland. *Hydrogeol J* 22(8):1953–1967. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1174-5>
- Badenes B, Sanner B, Mateo Pla MÁ et al (2020) Development of advanced materials guided by numerical simulations to improve performance and cost-efficiency of borehole heat exchangers (BHEs). *Energy* 201(117):628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117628>
- Balke KD (1974) Der thermische Einfluss besiedelter Gebiete auf das Grundwasser, dargestellt am Beispiel der Stadt Köln. *GFW-Wasser/Abwasser*, Heft 3
- Bandos TV, Montero Á, Fernández E et al (2009) Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics* 2(38):263–270. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.01.003>
- Bassetti S, Rohner E, Matthey B (2006) Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden. Schlussbericht. <https://docplayer.org/31008916-Dokumentation-von-schadensfaellen-bei-erdwaermesonden.html>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Bayer P, de Paly M, Beck M (2014) Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling. *Appl Energy* 136:445–453. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.029>
- Bockelmann F, Fisch N, Kipry H (2011) Erdwärme für Bürogebäude nutzen. BINE-Fachbuch, Fraunhofer-IRB-Verl, Stuttgart

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2021. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland.html. Zugegriffen: 27. Okt. 2022
- Bundesregierung (2018) Das Energiekonzept: Deutschlands Weg zu einer bezahlbaren, zuverlässigen und umweltschonenden Energieversorgung. <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/auftakt.html>. Zugegriffen: 02. Juli 2018
- Bundesverband Geothermie eV (2023) Nutzung der Geothermie in Deutschland. <https://www.geothermie.de/geothermie/geothermie-in-zahlen.html>. Zugegriffen: 7. Jan. 2023
- Bundesverband Wärmepumpe eV (2018) Leitfaden Erdwärme – Grundlagenwissen und Praxistipps. https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcpagflip/Leitfaden_Erdwaerme_2018_Web.pdf. Zugegriffen: 5. Jan. 2023
- Böttcher F, Zosseder K (2022) Thermal influences on groundwater in urban environments – A multivariate statistical analysis of the subsurface heat island effect in Munich. *Sci Total Environ* 810(152):193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152193>
- Casasso A, Sethi R (2014) Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: a sensitivity analysis. *Renew Energy* 62:737–746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.019>
- Chicco JM, Mandrone G (2022) How a sensitive analysis on the coupling geology and borehole heat exchanger characteristics can improve the efficiency and production of shallow geothermal plants. *Heliyon* 8(6):e09545, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09545>
- Childs H, Geveci B, Schroeder W et al (2013) Research challenges for visualization software. *Computer* 46(5):34–42. <https://doi.org/10.1109/MC.2013.179>
- Chilès JP, Delfiner P (2012) *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Wiley series in probability and statistics. Wiley, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781118136188>
- Choi W, Kikumoto H, Ooka R (2022) Probabilistic uncertainty quantification of borehole thermal resistance in real-world scenarios. *Energy* 254(124):400. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124400>
- Dennis JE, Schnabel RB (1996) *Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations*. No. 16 in *Classics in applied mathematics*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia
- Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011a) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 1 Fundamentals. *Computers Geosci* 37:1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.003>
- Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011b) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Computers Geosci* 37(8):1136–1147, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.002>
- Diersch HJG (2014) *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- Dietrich P, Leven C (2006) Direct push-technologies. In: Kirsch R (Hrsg) *Groundwater geophysics*. Springer, Berlin, S 321–340, https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6_11
- Dubois J, Lekien JB (2019) Highly efficient controlled hierarchical data reduction techniques for interactive visualization of massive simulation data. In: *EuroVis 2019 – short papers*, S 5. <https://doi.org/10.2312/EVS.20191167>
- Endres SC, Sandrock C, Focke WW (2018) A simplicial homology algorithm for Lipschitz optimisation. *J Global Optim* 72(2):181–217. <https://doi.org/10.1007/s10898-018-0645-y>
- Epting J, Huggenberger P (2013) Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – definition of a potential natural state. *J Hydrol* 501:193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.002>
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG (2009) Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich

- Eskilson P (1986) Superposition borehole model: manual for computer code, January 1986. University of Lund, Department of Mathematical Physics
- Eugster WJ (1991) Erdwärmesonden – Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund: Feldmessungen und Modellsimulation. PhD thesis, ETH Zurich, 10.3929/ETHZ-A-000626202, medium: application/pdf,X, 139 S
- Ewing RE, Lin T (1991) A class of parameter estimation techniques for fluid flow in porous media. *Adv Water Res* 14(2):89–97. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(91\)90055-S](https://doi.org/10.1016/0309-1708(91)90055-S)
- Ferguson G, Woodbury AD (2006) Observed thermal pollution and post-development simulations of low-temperature geothermal systems in Winnipeg, Canada. *Hydrogeol J* 14(7):1206–1215. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0047-y>
- Fiksel A, Thornton JW, Klein SA, Beckman WA (1995) Developments to the TRNSYS simulation program. *J Solar Energy Eng* 117(2):123–127. <https://doi.org/10.1115/1.2870836>
- Flemisch B, Darcis M, Erbertseder K et al (2011) DuMux: DUNE for multi-{phase,component,scale,physics,...} flow and transport in porous media. *Adv Water Res* 34(9):1102–1112, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.03.007>
- Gao Z, Hu Z, Chen T et al (2022) Numerical study on heat transfer efficiency for borehole heat exchangers in Linq County, Shandong Province, China. *Energy Rep* 8:5570–5579. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.012>
- Gebäudeenergiegesetz – GEG (2020) Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden
- Hanson B (2021) Geothermal visualization: comprehensive examination of geothermal data. <https://www.dgi.com/blog/geothermal-visualization-comprehensive-examination-geothermal-data/>. Zugriffen: 10. Nov. 2022
- Harder J, Riehmman P, Würfel S et al (2016) Visual monitoring of photovoltaic systems. Workshop on visualisation in environmental sciences (EnvirVis), S 4. <https://doi.org/10.2312/ENVIRVIS.20161101>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.019>
- Hein P, Kolditz O, Görke UJ et al (2016) A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl Therm Eng* 100:421–433. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.039>
- Hein P, Zhu K, Bucher A et al (2016) Quantification of exploitable shallow geothermal energy by using borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Energy Convers Manage* 127:80–89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.097>
- Hein PS (2018) On the efficient and sustainable utilisation of shallow geothermal energy by using borehole heat exchangers. PhD thesis, Technische Universität Dresden, Dresden. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-232226>
- Hemmerle H, Ferguson G, Blum P et al (2022) The evolution of the geothermal potential of a subsurface urban heat island. *Environ Res Lett* 17(8):084,018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7e60>
- Hu J, Doughty C, Dobson P et al (2020) Coupling subsurface and above-surface models for design of borefields and geothermal district heating and cooling systems. In: Proceedings, 45th workshop on geothermal reservoir engineering
- Huber A, Schuler O (1997) Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Tech. rep. Bundsamt für Energie, Bern
- Hähnlein S, Blum P, Bayer P (2011) Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser* 16(2):69–75. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0162-0>
- Klingler S (2021) Combination of geophysical and hydrogeological methods for the targeted assessment of fine-grained valley fills. Dissertation, Universität Tübingen. <https://doi.org/10.15496/publikation-59662>

- Koenigsdorff R (2011) *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude: Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*. Fraunhofer IRB-Verl. 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* 67:589–599. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x>
- Kolditz O, Rink K, Nixdorf E et al (2019) Environmental information systems: paving the path for digitally facilitated water management (Water 4.0). *Engineering* 5(5):828–832, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.08.002>
- König B, Limberger D, Klimke J et al (2021) RoomCanvas: a visualization system for spatiotemporal temperature data in smart homes. *EuroVis 2021 – Short papers*, S 5. <https://doi.org/10.2312/EVS.20211048>
- Magraner T, Montero Á, Cazorla-Marín A et al (2021) Thermal response test analysis for U-pipe vertical borehole heat exchangers under groundwater flow conditions. *Renew Energy* 165:391–404. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.029>
- Marc S, Erich M, Burkhard S et al (2007) Wirtschaftliche Aspekte beim Einsatz von Geothermal-Response-Tests. In: *Proc Geothermiekongress Bochum*, S 1–12
- McCall W, Nielsen DM, Farrington SP et al (2005) Use of direct-push technologies in environmental site characterization and ground-water monitoring. In: *Practical handbook of environmental site characterization and ground-water monitoring*, 2. Aufl. CRC Press
- Menberg K, Blum P, Schaffitzel A et al (2013) Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. *Environ Sci Technol* 47(17):9747–9755. <https://doi.org/10.1021/es401546u>
- Meng B, Vienken T, Kolditz O et al (2019) Evaluating the thermal impacts and sustainability of intensive shallow geothermal utilization on a neighborhood scale: Lessons learned from a case study. *Energy Convers Manage* 199(111):913. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.11.1913>
- Miara M, Günther D, Kramer T et al (2011) *Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb*, Tech. rep. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Freiburg
- Molnar S, Gruchalla K (2018) Visualizing electrical power systems as flow fields. *Workshop on visualisation in environmental sciences (EnvirVis)*, S 9. <https://doi.org/10.2312/ENVIRVIS.20181139>
- Moridis GJ, Doughty C, Finsterle S et al (2009) *Proceedings of the TOUGH symposium 2009*. Lawrence Berkeley National Laboratory – Earth Sciences Division. <https://escholarship.org/uc/item/1zf1b81h>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Nelder JA, Mead R (1965) A simplex method for function minimization. *Comput J* 7(4):308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- Neubert F, Haase M, Rink K et al (2019) WP-D: environmental information system. In: *Sachse A, Liao Z, Hu W, Dai X, Kolditz O (Hrsg) Chinese water systems*. Springer International Publishing, Cham, S 207–229. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97568-9_6
- Neuman SP (1973) Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. *Water Resour Res* 9(4):1006–1021. <https://doi.org/10.1029/WR009i004p01006>
- Olivella S, Gens A, Ramírez J et al (1996) Numerical formulation for simulator (CO-DE_bright) for coupled analysis of saline media. *Eng Comput* 13:87–112. <https://doi.org/10.1108/02644409610151575>
- Oppermann M, Munzner T (2020) Ocupado: visualizing location-based counts over time across buildings. *Comput Graphics Forum* 39(3):127–138. <https://doi.org/10.1111/cgf.13968>
- de Paly M, Hecht-Méndez J et al (2012) Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming. *Geothermics* 43:57–65. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.03.001>

- Perego R, Dalla Santa G, Galgaro A et al (2022) Intensive thermal exploitation from closed and open shallow geothermal systems at urban scale: unmanaged conflicts and potential synergies. *Geothermics* 103(102):417. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102417>
- Personenkreis Geothermie der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie (2011) Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Tech. rep. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.bgr.bund.de/Infogeo/DE/Downloads/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.html. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Pruess K (2004) The TOUGH codes - a family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone J* 3(3):738–746. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0738>
- Pyrzc MJ, Deutsch CV (2014) Geostatistical reservoir modeling, 2. Aufl. Oxford University Press, Oxford
- Rao SS (2009) Engineering optimization: theory and practice, 4. Aufl. Wiley, Hoboken (oCLC: ocn320352991)
- Rink K, Bilke L, Kolditz O (2014) Visualisation strategies for environmental modelling data. *Environ Earth Sci* 72(10):3857–3868. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2970-2>
- Sagerschnig C, Arndt D, Frey M (2014) Aktuelle Softwareentwicklung für die Planungspraxis: Gekoppelte Simulationen für geothermische Nutzungen. IBPSA BauSim 2014
- Sanner B, Reuss M, Mands E et al (2000) Thermal response test-experiences in Germany. In: *Proceedings Terrastock*, S 177–182
- Schelenz S (2017) Untersuchung des Einflusses ausgewählter Untergrundparameter auf die nachhaltige thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes im urbanen Raum. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:8-diss-213225>
- 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):73. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6331-9>
- Serpen U, Kaya E, Aksoy N (2005) 3D visualization of geothermal features. In: *Proceedings of the world geothermal congress 2005*, IGA
- Shao H, Hein P, Sachse A et al (2016) Geoenergy modeling II: shallow geothermal systems. *SpringerBriefs in Energy*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45057-5>
- Sola A, Corchero C, Salom J et al (2018) Simulation tools to build urban-scale energy models: a review. *Energies* 11(12):3269. <https://doi.org/10.3390/en11123269>
- Statista (2018) Anteil der in Städten lebenden Bevölkerung in Deutschland und weltweit von 1950 bis 2010 und Prognose bis 2030. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152879/umfrage/in-staedten-lebendebevoelkerung-in-deutschland-und-weltweit>. Zugegriffen: 02. Juli 2018
- Stauffer F, Bayer P, Blum P et al (2013) Thermal use of shallow groundwater. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/b16239>
- Steinbach P, Schulte DO, Welsch B et al (2021) Quantification of bore path uncertainty in borehole heat exchanger arrays using adaptive anisotropic stochastic collocation. *Geothermics* 97(102):194. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102194>
- StMUGV (2005) Oberflächennahe Geothermie. Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund. Broschüre. Tech. rep., StMUGV Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz; StMWIVT Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Energie/Rohstoffe/2021-10-20_Geothermie.pdf. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Stober I, Bucher K (2014) Geothermie. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41763-4>

- Storn R, Price K (1997) Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J Global Optim* 11(4):341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Sun NZ (1999) Inverse problems in groundwater modeling, theory and applications of transport in porous media, Bd 6. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1970-4>
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2009) Geothermisches Kartenwerk im Maßstab 1 : 50.000 – GTK 50
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2011) Erdwärmesonden – Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie. Tech. rep., Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11868>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Utom AU (2019) Observation-based conceptual site modeling framework combining surface geophysical, direct push-based, hydrogeochemical and stable isotope methods. Dissertation, Universität Tübingen. <https://doi.org/10.15496/publikation-30454>
- VBI (2008) Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. VBI Schriftenreihe 18
- VDI 4640-1 (2010) Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte Blatt 1. Tech. rep
- 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. <https://doi.org/10.1111/gwat.12206>
- Weers J, Huggins J (2020) Getting data out of the ground: modern challenges facing EGS collab, the DOE geothermal data repository, and the geothermal industry. In: Proceedings of the 44th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford Geothermal Program
- Welsch B, Rühaak W, Schulte D et al (2017) Co-simulation of geothermal applications and HVAC systems. *Energy Procedia* 125:345–352. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.040>
- Wu M, Chiang Y, Musco C (2022) Streaming approach to in situ selection of key time steps for time-varying volume data. *Computer Graphics Forum* 41(3):309–320. <https://doi.org/10.1111/cgf.14542>
- Wunderlich T, Fischer P, Wilken D et al (2018) Constraining electric resistivity tomography by direct push electric conductivity logs and vibrocores: an exemplary study of the Fiume Morto silted riverbed (Ostia Antica, western Italy). *Geophysics* 83(3):B87–B103. <https://doi.org/10.1190/geo2016-0660.1>
- Xiang Y, Sun DY, Fan W, Gong XG (1997) Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model. *Phys Lett A* 233(3):216–220. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(97\)00474-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(97)00474-X)
- Yeh WWG (1986) Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. *Water Resour Res* 22(2):95–108. <https://doi.org/10.1029/WR022i002p00095>
- 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 Thermal Eng* 105:314–326. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.158>
- Zhu K, Blum P, Ferguson G et al (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ Res Lett* 5(4):044,002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044002>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Standorte und Standortmodelle

2

Steve Henker, Nele Hastreiter, Jakob Randow,
Karsten Rink, Paul Satke, Thomas Vienken,
H. Konstanze Zschoke und Rüdiger Grimm

Für die im Verbundprojekt Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes (EASyQuart) durchgeführten Untersuchungen, Validierungen und Realmessungen wurden eine Reihe von Standorten und -modellen verwendet. Mit der Einschränkung, dass kein einheitliches Gesamtmodell für die Durchführung aller Vorhaben an einem Standort zur Verfügung stand, wurden für die jeweiligen Anwendungsfälle spezifische Bezugspunkte genutzt. Für einzelne

S. Henker (✉) · H. K. Zschoke · R. Grimm
geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland
E-mail: henker@geoenergie-konzept.de

H. K. Zschoke
E-mail: zschoke@geoenergie-konzept.de

R. Grimm
E-mail: grimm@geoenergie-konzept.de

N. Hastreiter · T. Vienken
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig;
HochschuleWeihenstephan-Triesdorf, Technische Universität München Campus Straubing für
Biotechnologie und Nachhaltigkeit, München, Deutschland
E-mail: nele.hastreiter@ufz.de

T. Vienken
E-mail: thomas.vienken@ufz.de

J. Randow · P. Satke
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: jakob.randow@htwk-leipzig.de

P. Satke
E-mail: paul.satke@htwk-leipzig.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_2

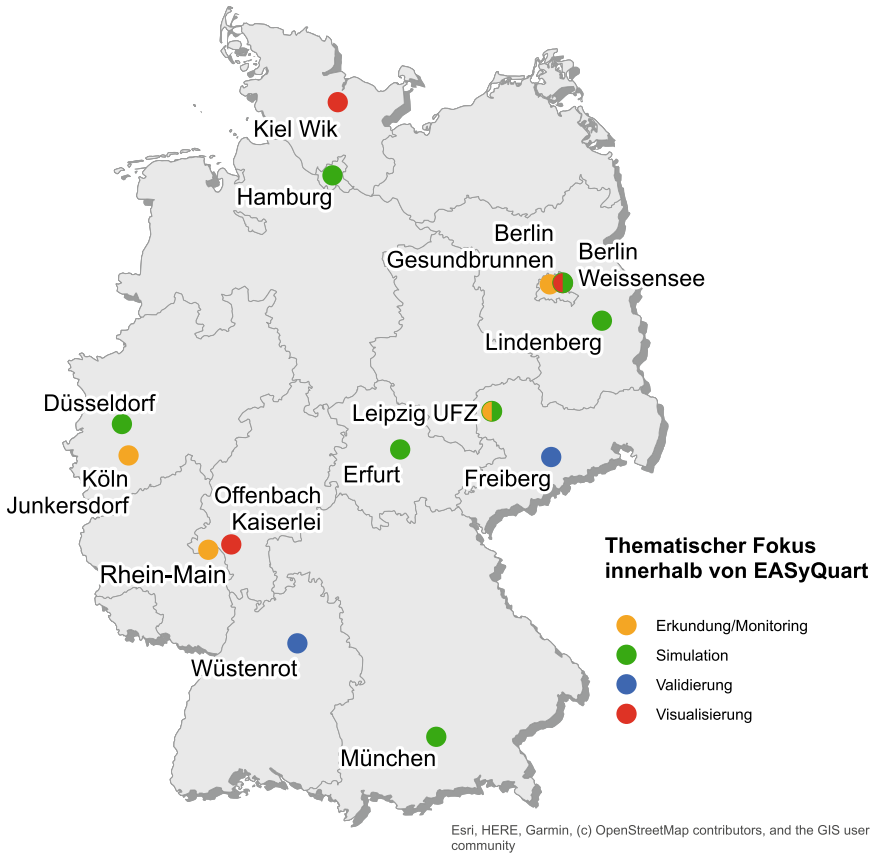


Abb. 2.1 Übersichtskarte der in EASyQuart verwendeten Standorte

Modelle konnten überdies generierte Daten aus der Begleitforschung bezogen werden, welche für Validierungszwecke der erstellten Simulationsmodelle herangezogen wurden.

Abb. 2.1 zeigt den örtlichen Ursprung der im Projekt EASyQuart verwendeten Daten und Standortmodelle. Die farbliche Einteilung unterscheidet zwischen den Arten der verwendeten Daten.

K. Rink
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig; OpenGeoSys
Kernentwicklerteam, Leipzig, Deutschland
E-mail: karsten.rink@ufz.de

2.1 Berlin-Weißensee

In Berlin wurde für die Wärme- und Kälteversorgung eines öffentlichen Gebäudes ein Heizkonzept basierend auf erdgekoppelten Wärmepumpen umgesetzt. Die benötigte Primärenergie aus dem geologischen Untergrund wird von 16 Erdwärmesonden extrahiert. Für die Planung hat die geoENERGIE Konzept GmbH ein umfassendes 3D-Modell des Standorts entwickelt und numerische Langzeitsimulationen durchgeführt, welche im Rahmen des Genehmigungsprozesses von den verantwortlichen Behörden verlangt werden. Die Simulationsergebnisse sollen eine ausreichende Dimensionierung sowie eine nachhaltige Betriebsweise des Erdwärmepumpensystems garantieren. Das mit einer Größe von ca. $1100\text{ m} \times 800\text{ m} \times 175\text{ m}$ und in über 3 Mio. Elementen diskretisierte sehr komplexe Modell wurde in EASyQuart für eine Vergleichsrechnung zwischen der kommerziellen und etablierten Software Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System (FEFLOW) und dem vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) Leipzig entwickelten Open-Source-Tool OpenGeoSys (OGS) aufbereitet. Das ursprünglich in FEFLOW aufgebaute Modell konnte in OGS importiert und die genutzten Parameter analog verwendet werden. Unter anderem konnten mit den Modelldaten umfangreiche Analysen durchgeführt sowie der Programmcode von OGS angepasst und optimiert werden. Die zugehörigen Ergebnisse wurden in [Randow et al. \(2022\)](#) veröffentlicht. Detaillierte Simulationsergebnisse können außerdem in [Kap. 6](#) eingesehen werden. Weiterhin konnten am Standort durchgeführte Thermal-Response-Tests (TRT) mittels analytischer sowie numerischer Verfahren erneut abgebildet und validiert werden. Darüber hinaus wurde für dieses Projekt eine interaktive 3D-Visualisierung zur Darstellung aller gemessenen und simulierten Daten erstellt, welche in [Abschn. 7.1.3](#) beschrieben wird.

2.2 Offenbach-Kaiserlei

In Offenbach am Main war für die Versorgung eines Quartiers, bestehend aus Wohn- und Gewerbeeinheiten, vorgesehen, dass anteilig die Wärme- und Kälteversorgung über erdgekoppelte Wärmepumpen erfolgt. Das Quartier setzt sich u. a. aus sanierten Bestandsgebäuden und Neubauten zusammen. Das Bauvorhaben gliedert sich in einzelne Bauabschnitte bzw. Bauteile, welche sich in ihrer Nutzungsform (Wohnen, Gewerbe) sowie deren energetischen Anforderung unterscheiden (Heiz- und Kühlbedarf). Das Gesamtsondenfeld setzt sich letztendlich aus insgesamt fünf Teilsondenfeldern zusammen, mit jeweils separaten Wärmepumpen. Das Gesamtsondenfeld besteht aus insgesamt 263 EWS à 100 m (153 Doppel-U-Sonden) und 125 m (110 Doppel-U-Sonden). Die EWS wurden alle errichtet, sind jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht in Betrieb genommen worden, sodass keine tatsächlichen Verbrauchs- sowie Monitoringdaten zur Einschätzung der Betriebsweise vorliegen.

Im Zuge einer thermohydrodynamischen Modellierung wurde durch die geoENERGIE Konzept GmbH bestimmt, wie der Untergrund räumlich und langfristig

durch die geothermische Anlage thermisch beeinflusst wird. Auch für dieses Quartier wurden alle verfügbaren Daten in einer 3D-Szene visualisiert, deren Details in Abschn. 7.1.4 beschrieben werden.

2.3 Kiel-Wik

Eingebettet in eine größere Studie für das Bundesland Schleswig-Holstein mit dem Fokus auf die Gewinnung und Speicherung erneuerbarer Energien wurden für den Stadtteil Kiel-Wik Methoden für die Zusammenführung heterogener Observations- und Simulationsdaten für eine intuitive Darstellung von Energiesystemen untersucht. Basierend auf im Rahmen des ANGUSII-Forschungsprojekts gesammelten und erzeugten Daten wurde in enger Abstimmung mit Geowissenschaftlern der Universität Kiel eine komplexe Visualisierungsstudie für die zuvor genannten Fragestellungen aufgesetzt. Neben der für ganz Schleswig-Holstein erfassten Infrastruktur an Solarparks, Biogasanlagen sowie On- und Offshore-Windparks wird für den Kieler Stadtteil Wik ein Simulationsszenario für die Speicherung von Wärme in einem Grundwasserleiter visualisiert. Gemeinsam mit statistisch modellierten Daten zur Wärmebedarfsverteilung kann somit die mögliche Kapazität des Speichers dem benötigten Bedarf gegenübergestellt werden. Für eine anschauliche Gestaltung, die neben Experten auch die interessierte Öffentlichkeit adressieren soll, wurden möglichst intuitive Darstellungsarten der verwendeten Daten gewählt. So werden beispielsweise der für das Untersuchungsgebiet relevante Gebäudebestand durch etwa 3500 Modelle dargestellt, die geografische Einordnung durch die Verwendung von Luftbildern und geografischen Karten erleichtert und die Simulationsergebnisse durch Isotemperaturflächen approximiert. Das Ergebnis ist ein Prototyp für ein Umweltinformationssystem zu Fragen der Energieinfrastrukturen, das auch für die Erstellung von vergleichbaren Studien für andere Untersuchungsgebiete genutzt werden kann (vgl. Abschn. 7.1.5).

2.4 Köln-Junkersdorf

Bei dem Demonstrationsstandort Köln-Junkersdorf handelt es sich um ein ca. 350 m × 550 m großes Wohnquartier im Kölner Westen mit intensiver Nutzung oberflächennaher Geothermie. Im Zuge der Sanierung von Wohngebäuden im Bestand sowie dem Neubau von Wohngebäuden, vornehmlich im Zeitraum von 2010 bis 2015, wurde die Wärmeversorgung von 51 der rund 150 Einfamilienhäuser in dem Quartier auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie umgestellt. Hierbei lag der Fokus auf der Wärmebereitstellung durch Nutzung von EWS. Der geologische Untergrund des Testgeländes besteht aus Sand- und Kiesablagerungen der quartären Terrassenabfolge des Rheins, die von einer feinsandigen, gelegentlich tonigen und schwachkie-sigen Schluffschicht mit einer lokal variierenden Mächtigkeit von 6–8 m überdeckt

werden. Bodenprofile, die während der Installation von EWS aufgenommen wurden, belegen eine lokale Mächtigkeit der quartären Schichtenfolge von 30–40 m, auf die die Nutzung der oberflächennahen Geothermie am Teststandort beschränkt ist. Der Grundwasserflurabstand beträgt rund 21 m. Der Übergang zwischen Quartär und Tertiär wird in der Literatur durch Feinsandablagerungen mit reduzierter hydraulischer Leitfähigkeit beschrieben (Losen 1984). Die Grundwasserströmung im Bereich des Demonstrationsstandortes erfolgt in ost-nordöstlicher Richtung zum Rhein als Hauptvorfluter in etwa 6,5 km Entfernung. Detaillierte Informationen über die Stratigrafie und Hydrogeologie im Raum Köln gibt Klostermann (1992), weitere Informationen zum Demonstrationsstandort finden sich in Vienken et al. (2019) sowie Meng et al. (2019).

2.5 Untersuchungsfläche im Rhein-Main-Gebiet

Bei dem Demonstrationsstandort handelt es sich um eine landwirtschaftlich genutzte Fläche zwischen Bingen und Mainz mit einer Größe von ca. 430 m × 760 m. Die Fläche liegt rund 1000 m vom Rhein entfernt, der geologische Untergrund im oberflächennahen Bereich besteht entsprechend aus Sand und Kiesablagerungen des Rheins, die im Liegenden von einer Schluff- und Tonschicht abgelöst werden, die das oberste Grundwasserstockwerk entsprechend abgrenzt. Im Untersuchungsgebiet selbst variiert die Tiefenlage des Stauers zwischen 6,1 m und 10,7 m unter Geländeoberkante (GOK). Die grundwassergesättigte Mächtigkeit des obersten Grundwasserleiters variiert zwischen 4,3 m und 7,3 m. Daher repräsentiert der Demonstrationsstandort eine Fläche, die insbesondere für die Nutzung von Erdwärmekollektoren oder offenen Systemen zur Wärme- und Kältebereitstellung sowie der saisonalen Energiespeicherung geeignet wäre.

2.6 Berlin-Gesundbrunnen

Das Wohn- und Gewerbegebäude im Norden von Berlin wird durch 18 EWS mit einer Tiefe von jeweils 99,9 m EWS geothermisch beheizt und gekühlt. Die Vorerkundung zeigt einen ausgeprägten Grundwasserleiter in einer Tiefe von 70–90 m unter GOK. Vom Projektpartner geoENERGIE Konzept GmbH werden die Auswirkungen der thermischen Untergrundnutzung in Form von Stichtagsmessungen der Temperaturprofile in einer Anstrom- und zwei Abstrommessstellen seit 2020 in einem viermonatigen Turnus dokumentiert. Der Standort konnte im Rahmen von EASyQuart insbesondere zur Anwendung eines ergänzenden, angepassten Monitoringkonzepts sowie zum Vergleich verschiedener Monitoringtechnologien genutzt werden.

2.7 Testfeld des UFZ in Leipzig

Das Testfeld Leipzig befindet sich auf dem Standort des UFZ im Zentrum des Wissenschaftsparks in Leipzig. Die Testfläche hat eine Größe von ca. 50 m × 25 m und bietet Raum für eine Vielzahl von Experimenten im Bereich Messtechnik und Untergrunderkundung. Im Projekt EASyQuart wurde der Standort insbesondere innerhalb des Schwerpunktes Monitoring umfangreich genutzt. Der geologische Untergrund ist durch die quartären Lockergesteinsablagerungen der Grundmoräne aus dem Saale-Komplex aufgebaut. Die Ablagerungen zeichnen sich dabei durch eine ausgeprägte Heterogenität aus, d. h., es finden sich starke Variationen des Korngrößenspektrums über kurze vertikale Distanzen in den zahlreich abgeteufte Bohrungen und Erkundungs Sondierungen. Unter einer ca. 0,3 m mächtigen Auffüllung folgt ein knapp 10 m mächtiger siltig-toniger Geschiebemergel mit variierenden Sand- und Kiesanteilen. Der Geschiebemergel ist von einzelnen Sandeinschaltungen unterbrochen. Ab ca. 10 m unter GOK folgt der eigentliche Grundwasserleiter, in dem sich wiederum siltig-tonige Einschaltungen finden. Der Grundwasserspiegel liegt im Bereich der Stauerunterkante und kann damit lokal leicht gespannt ausgeprägt sein.

2.8 Wüstenrot

Die Gemeinde Wüstenrot in Baden-Württemberg ist ein Vorreiter auf dem Weg zur Energiewende. In der ca. 3000 ha großen Kommune soll eine Plusenergiegemeinde entstehen, die ihren Energiebedarf komplett aus erneuerbaren Energien decken kann und deren Überschüsse ins Netz eingespeist werden. Die Mitarbeiter des Forschungsprojekts Kommunale netzgebundene Energieversorgung – Vision 2020 am Beispiel der Gemeinde Wüstenrot (EnVisaGe) der Hochschule für Technik Stuttgart unterstützen das Vorhaben durch konkrete Planungen für die Energienutzung mithilfe innovativer Planungswerkzeuge auf Grundlage von 3D-GIS-Daten. Potenzialanalysen verschiedener Standorte und Szenarien sollen die Methodik skalierbar und auf weitere Projekte anwendbar machen. Im Rahmen dieses Projekts wurde u. a. die Neubausiedlung „Vordere Viehweide“ konzeptioniert und umgesetzt, welche über einen agrothermalen Flächenkollektor mit Wärme versorgt wird. In insgesamt elf Gebäuden wurde ein Monitoring der Haus- und Anlagentechnik installiert und durchgeführt, in sechs Gebäuden ist dieses besonders detailliert und umfangreich (vgl. [Brennenstuhl et al. 2019](#)). Mit freundlicher Genehmigung der Projektverantwortlichen von EnVisaGe konnten die Gebäude- und Monitoringdaten für die Validierung von in EASyQuart erstellten Simulationsmodellen der Haus- und Gebäudetechnik genutzt werden. Die zur Verfügung gestellte Datenbank beinhaltet die detaillierte Messwertaufzeichnung zahlreicher hausseitiger Sensoren. Für die Modelle der Gebäudetechnik sind dabei vor allem die Temperaturen im Heizkreislauf sowie die Kenndaten der Wärmepumpe und des Wärmetauschers (im Kühlfall) von Interesse. Mithilfe einer vorgelagerten Datenanalyse konnten fehlerhafte und unplau-

sible Messwertaufnahmen erkannt und daraus ein optimaler Validierungszeitraum bestimmt werden.

2.9 Sonstige

Der Verbundpartner geoENERGIE Konzept GmbH stellte Messdaten eines Einfamilienhauses am Standort Freiberg zur Verfügung. Insbesondere die detaillierten Geometrie- und Materialparameter waren wichtig, um das Gebäudemodell der Modella Bibliothek *GreenCity* zu validieren. Entsprechende Wetterdaten des Standortes wurden dem Test Reference Year (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen.

Die Wetterstation am Standort Lindenberg hat Messwerte mit der geringsten Anzahl von Messfehlern aufgenommen, sodass tatsächliche Wetterdaten als Randbedingung für Langzeitanalysen der gekoppelten Simulation, bestehend aus Gebäude- und Anlagenmodell sowie Untergrundmodell, verwendet werden konnten. Andere Standorte beinhalten wesentlich mehr Messfehler in den Daten der solaren Einstrahlung, die den Simulationszeitraum auf kürzere Zeitintervalle beschränken.

Die bisher nicht einzeln aufgeführten Standorte Düsseldorf, Erfurt, Hamburg und München wurden mit den Standorten Leipzig und Berlin in Form von Umweltbedingungen des TRY als Randbedingungen der Quartierssimulation definiert. Ziel dieser Auswahl war das Abbilden eines möglichst breiten Spektrums von Umweltbedingungen, die ein Stadtquartier in Deutschland beeinflussen können.

Literatur

- Brennenstuhl M, Zeh R, Otto R et al (2019) Report on a plus-energy district with low-temperature DHC network, novel agrothermal heat source, and applied demand response. *Appl Sci* 9(23):5059. <https://doi.org/10.3390/app9235059>
- Klostermann J (1992) Das Quartär der Niederrheinischen Bucht: Ablagerungen der letzten Eiszeit am Niederrhein. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld
- Losen H (1984) Grundwasserstände und Grundwasserbeschaffenheit im südlichen Teil der linksrheinischen Kölner Scholle. Eine hydrogeologische und statistische Analyse. PHD, RWTH Aachen
- Meng B, Vienken T, Kolditz O et al (2019) Evaluating the thermal impacts and sustainability of intensive shallow geothermal utilization on a neighborhood scale: lessons learned from a case study. *Energy Convers Manage* 199(111):913. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111913>
- Randow J, Chen S, Lubashevsky K et al (2022) Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization: a case study in Berlin. *Geotherm Energy* 10(1):1. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00211-9>
- Vienken T, Kreck M, Dietrich P (2019) Monitoring the impact of intensive shallow geothermal energy use on groundwater temperatures in a residential neighborhood. *Geotherm Energy* 7(1):8. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0123-x>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Erkundung und Monitoring auf Quartiersebene

3

Nele Hastreiter, Steve Henker, Marco Pohle, Ulrike Werban und Thomas Vienken

3.1 Anforderungen an Erkundung und Monitoring

Im Rahmen des Projektes Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes (EASyQuart) wurden die Anforderungen an die Erkundung und das Monitoring untersucht, die aus der geothermischen Erschließung auf Wohngebietskala hervorgehen. Diese besonderen Anforderungen entstehen aus der räumlichen Dimension der Untersuchungsgebiete sowie aus der hohen geothermischen Nutzungsdichte bei Quartieren.

N. Hastreiter (✉) · T. Vienken

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf am TU München Campus Straubing,
Straubing, Deutschland

E-mail: nele.hastreiter@ufz.de

T. Vienken

E-mail: thomas.vienken@ufz.de

S. Henker

geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland

E-mail: thiel@geoenergie-konzept.de

N. Hastreiter · M. Pohle · U. Werban · T. Vienken

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland

E-mail: marco.pohle@ufz.de

U. Werban

E-mail: ulrike.werban@ufz.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_3

In der Regel ist für Kleinanlagen mit einer Heizleistung von $< 30 \text{ kW}$ gemäß Stand der Technik keine separate Vorerkundung vorgesehen. Dies sind typischerweise Anlagen, wie sie in der individuellen Versorgung von Einfamilienhäusern (EFH) oder kleineren Mehrfamilienhäusern genutzt werden. Hier beruht die Erkundung in der Regel auf der Auswertung von Literatur oder Geodaten hauptsächlich in Bezug auf die zu erwartenden durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten, mittleren Untergrundtemperaturen oder mittleren Entzugsleistungen. Diese Daten dienen als Grundlage zur Anlagendimensionierung, z. B. Ermittlung der benötigten Installationslänge von Erdwärmesonden (EWS). Beim Abteufen der Bohrungen zur Installation der EWS kann adaptiv auf Grundlage des geförderten Bohrgutes, das eine geologische Einordnung der erbohrten Schicht oder Schichten erlaubt, die Anlagendimensionierung bei Bedarf in gewissem Umfang angepasst werden.

Obgleich eine Anlagendimensionierung ohne Vorerkundung zu Unsicherheiten führen kann, ist eine Erkundung im Vorfeld der Installation von geothermischen Kleinanlagen in der Regel wirtschaftlich nicht vertretbar. Anders ist dies bei geothermischen Großanlagen mit einer Leistung $> 30 \text{ kW}$. Hier wird häufig zusätzlich zur Literatur- und Geodatenrecherche ein sogenannter Thermal-Response-Test (TRT) zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit integral über die installierte Erdwärmesondenslänge bzw. mittels Enhanced-TRT auch tiefenorientiert, durchgeführt. Der TRT wird dabei in der Regel an einer ersten Pilotinstallation einer EWS durchgeführt, die idealerweise über den Test hinaus als Teil der geothermischen Installation genutzt werden kann. Auf Grundlage der Literatur- und Geodatenrecherche in Kombination mit den TRT-Daten kann eine maßgeschneiderte ortsspezifische Anlagendimensionierung erfolgen und eine Über- oder Unterdimensionierung des Systems mit negativen Auswirkungen auf Betrieb und Kosten vermieden werden. Eine Skalierung dieses Ansatzes auf Quartiersskala ist allerdings nicht uneingeschränkt möglich, da bei zunehmender Größe des Untersuchungsgebietes die Wahrscheinlichkeit der Variabilität im geologischen Schichtaufbau steigt und entsprechend berücksichtigt werden muss. Zwar kann die Anzahl der durchgeführten TRT prinzipiell erhöht werden, um eine bessere räumliche Abdeckung zu erzielen; dies ist aber mit einem nicht zu unterschätzenden Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Des Weiteren stellt der TRT eine Punktmessung dar, deren Messwert zunächst nur für den Ort der Messung gilt. Eine Übertragbarkeit von Punktmessungen auf ein Untersuchungsgebiet oder Teile davon ist daher von der Heterogenität des Untergrundes, der damit verbundenen Variabilität der Zielparameter und deren Einfluss auf die geothermische Anlage in Planung und Betrieb abhängig. Die Frage nach der Anzahl von Messungen zur zuverlässigen Charakterisierung einer Untersuchungsfläche kann nicht pauschal beantwortet werden, sondern ist, insofern diese Information benötigt wird, Teil der standortspezifischen Erkundung.

Heterogenitäten können durch eine Vielzahl geo(morpho)logischer Prozesse entstehen. Durch diese Heterogenitäten können die petrophysikalischen und/oder hydrogeologischen Eigenschaften im Untergrund über kurze vertikale oder auch horizontale Distanzen zum Teil erheblich variieren. Besonders stark und hinsichtlich der Anlagendimensionierung relevant können diese Heterogenitäten in Lockergesteinsablagerungen bzw. Lockergesteinsgrundwasserleitern ausgeprägt sein. Deren

Charakterisierung ist insofern herausfordernd, da für die geothermische Erkundung neben relevanten Parametern wie der ungestörten Untergrundtemperatur, der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des wassergesättigten Sediments auch die hydraulische Leitfähigkeit und die Grundwasserfließgeschwindigkeiten von großer Bedeutung sind. Zusätzlich zum konduktiven Wärmetransport erfolgt ein konvektiver Wärmetransport über das fließende Grundwasser. Damit ist die Kenntnis der hydraulischen Leitfähigkeit und deren räumlicher Verteilung wesentlich zur Beurteilung der thermischen Entzugsleistung, möglicher Umweltauswirkungen wie z. B. Kälte- oder Wärmefahnen, aber auch zur Abschätzung von Anlageninteraktionen, der sogenannten nachbarschaftlichen Beeinflussung. Die Berücksichtigung von Anlageninteraktionen ist insbesondere in Wohnquartieren mit hoher Anlagendichte sehr relevant und sollte daher im Rahmen von Machbarkeitsstudien oder in der frühen Phase der geothermischen Erkundung erfolgen.

Wichtig ist, dass die Erkundung in ihrem Informationsgrad, Aufwand und den Kosten stets dem Erkundungsziel angepasst ist. Daher müssen, insbesondere unter der Prämisse komplexer (hydro)geologischer Untergrundverhältnisse, neue Wege in der geothermischen Erkundung auf Quartiersskala gegangen werden, um die geothermische Erkundung selbst unter komplexen Bedingungen flexibel und kostengünstiger zu gestalten. Gerade bei der Beschreibung komplexer Lockergesteinsgrundwasserleiter hat sich gezeigt, dass eine Charakterisierung rein basierend auf Punktuntersuchungen wie klassischer Bohrungen mit einem für die Geothermie nicht zu vertretenden Aufwand verbunden wäre. Daher müssen bestehende Techniken wie der TRT an diese Herausforderungen angepasst werden. Zu den neuen Wegen in der Vorerkundung zählen u. a. der Einsatz effizienter Sondiertechnik wie die Direct-Push-Technologie oder auch ein bereits seit Jahren in vielen Bereichen der Hydrogeologie verfolgter erfolgreicher Ansatz durch Kopplung flächenhafter geophysikalischer Daten und Punktmessungen. Im Rahmen von EASyQuart wurden diese Ansätze beispielhaft an Demonstrationsstandorten bezüglich ihrer Eignung zur geothermischen Erkundung von Flächen auf Quartierskala bewertet.

Eine der großen Herausforderungen beim Übertragen dieser Erkundungskonzepte ist die Erkundungstiefe. Die in EASyQuart betrachteten Erkundungsmethoden, allen voran die Direct-Push-Sondiertechnik, wird bei Tiefen von einigen Zehner Metern, jedoch selten tiefer als 40 m eingesetzt. Diese vergleichsweise geringe Erkundungstiefe steht einer Installationslänge von häufig 99 m und mehr bei EWS in der oberflächennahen Geothermie gegenüber. Die im Rahmen von EASyQuart betrachteten Erkundungskonzepte sind daher nicht ohne weitere Adaption bei großen Erkundungstiefen anwendbar. Aus den Fallbeispielen geht jedoch hervor, dass in den betrachteten Fällen eine größere Erkundungstiefe kaum erforderlich war. Zudem werden standortunabhängige Konzepte beschrieben, die durch Modifikation der speziellen Erkundungstechniken einer Vielzahl von Standortbedingungen gerecht werden. Die Forderung aus der Praxis nach verbesserten Erkundungsmethoden mit einer für die Geothermie ausreichenden Erkundungstiefe ist nachvollziehbar und Lösungen sind verfügbar. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass Aufwand und Kosten mit zunehmender Erkundungstiefe erheblich ansteigen. In Abhängigkeit der Komplexität der Standortbedingungen und der geothermischen Nutzung

wäre daher zu klären, ob eine geothermische Erschließung unter herausfordernden Standort- oder Nutzungsbedingungen nur bis in Tiefen erfolgen sollte, aus denen auch zuverlässige Daten vorliegen. Auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie kann dann entschieden werden, ob ein ökologisch und ökonomisch nachhaltiger Betrieb von Geothermieanlagen auch in flacheren Tiefen möglich ist.

Die ökologisch nachhaltige Nutzung, d. h. die Quantifizierung und Überwachung von Umweltauswirkungen erfolgt bei größeren geothermischen Installationen häufig über ein Boden- bzw. Grundwassertemperaturmonitoring. Dafür werden Boden- und/oder Grundwassertemperaturmessstellen im An- und Abstrom von größeren Geothermiesystemen installiert und die Untergrundtemperaturen in diskreten Zeitintervallen mittels Stichtagsmessungen oder quasi-kontinuierlich mittels autonomer Messtechnik erfasst. Der Unterschied zwischen An- und Abstromtemperaturen wird der geothermischen Nutzung zugeschrieben und dient zur Kontrolle der Einhaltung behördlicher Auflagen für den Betrieb. Damit besitzt das Temperaturmonitoring wesentliche Relevanz hinsichtlich der Kontrolle und Bewertung der ökologisch und ökonomisch nachhaltigen geothermischen Nutzung. In Anbetracht der Relevanz gab es bislang aber nur eingeschränkte Untersuchungen zur Repräsentativität gemessener Untergrundtemperaturen im urbanen Raum. Wichtige Faktoren, die die Repräsentativität der Messung beeinträchtigen können, sind u. a. die Messstellenlokation, das eingesetzte Temperaturmessgerät bzw. die Vergleichbarkeit verschiedener Temperaturmessgeräte und die Definition der von der Geothermie unbeeinflussten Boden- und Grundwassertemperatur im urbanen Raum. Die Untersuchung dieser Unsicherheiten stellt einen weiteren Arbeitsbereich von EASyQuart dar.

Letztlich sind Erkundung und Monitoring eng miteinander verwoben, da die verlässliche Erkundung als Grundlage einer verlässlichen Vorhersage und dem Monitoring etwaiger Umweltauswirkungen dient.

3.2 Erkundung

Im Folgenden werden innovative Konzepte bei der geothermischen Erkundung anhand von ausgewählten Fallbeispielen vorgestellt. Die dabei verwendeten Erkundungstechnologien wurden standortbezogen ausgewählt. Durch eine angepasste Auswahl der Erkundungstechniken sind die Erkundungskonzepte jedoch auf andere Standorte übertragbar.

3.2.1 Erkundungskonzept Bestandssanierung, Fallbeispiel Köln-Junkersdorf

Im Zuge der Sanierung von Bestandsgebäuden sowie dem Neubau einzelner Wohngebäude vornehmlich im Zeitraum von 2010 bis 2015 wurde die Wärmeversorgung von 51 der rund 150 EFH in dem Quartier auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie (insbesondere Nutzung von EWS zur Wärmeerzeugung) umgestellt. Der



Abb. 3.1 Installierte Erdwärmeanlagen im Untersuchungsgebiet Köln-Junkersdorf aus [Vienken et al. \(2019\)](#)

Demonstrationsstandort ist in [Abb. 3.1](#) schematisch dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass es während der Sanierungs- bzw. Neubauphase zu keiner koordinierten geothermischen Erkundung oder geothermischen Entwicklung auf Quartierskala kam. Vielmehr erfolgte die Vorerkundung und Anlagenplanung grundstücksbezogen. Aufgrund der Größe der einzelnen Anlagen mit einer Leistung von < 30 kW wurde bei der Vorerkundung auf Literaturstudien bzw. Bohrprofile bereits abgeteufter Erdwärmesondenbohrungen zurückgegriffen. [Schelenz et al. \(2017\)](#) zeigen allerdings deutlich anhand eines Fallbeispiels aus der Region Leipzig, dass eine koordinierte, grundstücksübergreifende geothermische Erkundung erheblich zu einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen intensiven Nutzung Oberflächennaher Geothermie beitragen kann. Vorteile einer solchen Erkundung sind u. a. die Möglichkeit einer maßgeschneiderten Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen sowie der zuverlässigen Abschätzung induzierter Temperaturänderungen durch die Nutzung Oberflächennaher Geothermie (z. B. Kältefahnen) und Quantifizierung der Auswirkung auf die Wärmepumpeneffizienz bei hoher Anlagendichte. Vor diesem Hintergrund ist das folgende Erkundungskonzept als Ergänzung zur grundstücksbezogenen Erkundung im Bestand zu sehen. Das Ziel ist es, mit möglichst geringem finanziellem und technischem Aufwand eine geeignete Datengrundlage zu schaffen, wie sie für ein zielgerichtetes Monitoring und insbesondere für die modellbasierte Vorhersage bzw. Bewertung induzierter Umweltauswirkungen und deren Auswirkung auf die Anlageneffizienz benötigt wird. Für einen entsprechenden Bewertungsansatz siehe [Meng et al. \(2019\)](#). Eine Erhebung oberflächennaher geophysikalischer Daten war aufgrund der bereits bestehenden Bebauung nicht möglich und wurde wegen der ge-

ringen lateralen Variabilität im geologischen Schichtenaufbau in diesem Falle nicht benötigt. Relevante Faktoren bei der Auswahl des Standortes waren:

- Große Dichte von Anlagen zur Nutzung Oberflächennaher Geothermie,
- thermische Nutzung ausschließlich des quartären Grundwasserleiters bis in eine Tiefe von ca. 35 m unter Geländeoberkante (GOK),
- gute Erschließbarkeit dadurch, dass städtische Grünflächen als Lokationen für die Erkundungs Sondierungen und Installation der Grundwassermessstellen (GWM) genutzt werden konnten,
- vorwiegende Nutzung der Geothermie zu Heizzwecken (Abkühlung des Grundwassers während der Heizperiode), daher keine zusätzliche Effektüberlagerung durch Nutzung des Grundwassers zur Gebäudeklimatisierung im Sommer.

Hinweis: Das im Folgenden erläuterte Erkundungskonzept beruht auf Daten, die bereits 2013 erhoben wurden. Die verwendeten Methoden, insbesondere der Einsatz geringinvasiver Direct-Push-Sondiertechnik, waren zu diesem Zeitpunkt noch kein etablierter Standard in der geothermischen Erkundung – auch hinsichtlich der Verbreitung von Anbietern in Deutschland. Dies hat sich über die letzten Jahre jedoch stark verändert. Die Direct-Push-Technologie ist mittlerweile ein Standard in der hydrogeologischen Erkundung nicht- bzw. geringkonsolidierter Lockergesteine mit einer Erkundungstiefe bis ca. 40 m geworden und hat dadurch eine entsprechende Marktdurchdringung und Verfügbarkeit erreicht.

Vorerkundung auf Grundlage verfügbarer Fachinformationen

Zunächst wurde anhand der hydrogeologischen Karte (siehe u. a. Geodatenportal Nordrhein-Westfalen (NRW), Geologischer Dienst NRW) sowie weiteren verfügbaren Fachinformationen (z. B. Fachinformationssystem ELWAS) die zu erwartende vorwiegende Grundwasserfließrichtung ermittelt und nach dem Vorhandensein von GWM im Bestand zur Durchführung von Voruntersuchungen recherchiert. Die Auswertung der Fachinformationen ergab eine Grundwasserfließrichtung in Richtung Osten. Ebenfalls wurde festgestellt, dass sich weder in dem Untersuchungsgebiet noch im näheren Umfeld aktive GWM im Bestand befinden und daher eigene Aufschlussarbeiten für die Erkundung und das Monitoring durchgeführt werden mussten.

Informationen zur Wärmeleitfähigkeit des oberflächennahen Untergrundes als ein wesentlicher Parameter zur Dimensionierung und Nutzung von Erdwärmesondenanlagen wurden über den „Geothermie in NRW – Standortcheck“ des Geologischen Dienstes NRW (<https://www.geothermie.nrw.de>) ermittelt. Für das Untersuchungsgebiet ergeben sich laut Standortcheck für eine Installationstiefe bis 40 m unter GOK geringe, d. h. $0,5 - 0,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, bis mittlere ($1,0 - 1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) Wärmeleitfähigkeiten. Weitere Informationen über den geologischen Aufbau ergaben die Bohrprofile, die bei dem Abteufen der Erdwärmesondenbohrungen erstellt wurden. Aufgrund der insgesamt zu erwartenden geringen Wärmeleitfähigkeiten boten sich hier zusätzliche Untersuchungen zum besseren Verständnis und zur differenzierteren Betrachtung des geologischen Untergrundes und des hydrogeologischen Regimes an.

Bei allen Arbeiten mit invasiver Sondiertechnik, wie sie in diesem Projekt zur Installation von Temperaturmessstellen und Charakterisierung des oberflächennahen Untergrundes genutzt wurde, ist das Einholen zahlreicher Freigaben und Genehmigungen zwingend erforderlich, zumal die Untersuchungen zwischen dem Gebäudebestand durchgeführt wurden. Daher beinhalteten die Vorarbeiten u. a.:

- Festlegung geeigneter Untersuchungspunkte,
- Einholen von Leitungsfreigaben für alle Untersuchungspunkte (z. B. Strom, Wasser, Abwasser, Gas, Ferngas, Fernwärme und Medienträger wie Telefon, Kabel-TV, Internet),
- Überprüfung auf Kampfmittelverdacht bzw. Kampfmittelfreigabe durch die für die Kampfmittelbeseitigung verantwortliche Stelle (in diesem Fall der Kampfmittelbeseitigungsdienst),
- Einholen der notwendigen behördlichen Genehmigungen.

Detailerkundung

Nach Festlegung und Freigabe der Untersuchungspunkte erfolgte die Detailerkundung mit folgenden Zielen:

- Erkundung des Aufbaus und der Mächtigkeit der quartären Schichtenfolge bis in eine Tiefe von ca. 35 m unter GOK (max. Installationstiefe der EWS am Standort),
- Ermittlung hydrogeologischer Parameter, darunter:
 - hydraulische Leitfähigkeit,
 - Ermittlung der Mächtigkeit der ungesättigten bzw. der grundwassergesättigten Zone des quartären Grundwasserleiters,
 - Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit, Ermittlung der von der Geothermienutzung unbeeinflussten Grundwassertemperatur,
- Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes.

Die Detailerkundung wurde an den geplanten Lokationen der Grundwassertemperaturmessstellen mittels Direct-Push-Technologie durchgeführt. Detaillierte Informationen zur Direct-Push-Technologie finden sich u. a. in [Dietrich und Leven \(2006\)](#), [McCall et al. \(2005\)](#) und [Leven et al. \(2011\)](#). Wesentliche Informationen daraus sind im Folgenden zusammengefasst. Direct Push beschreibt ein geringinvasives Sondierverfahren, bei dem ein Stahlhohlgestänge mittels Druck oder Einsatz eines Percussionshammers in den Untergrund eingebracht wird. Direct Push kann dabei zur Boden-, Grundwasser- oder Bodenluftprobenahme oder zur Installation von Grundwasser- oder Bodenluftmessstellen eingesetzt werden. Alternativ können Sensoren am Ende des Sondiergestänges angebracht werden. Hierdurch können quasi-kontinuierliche Vertikalprofile der hydrogeologischen, geotechnischen, geophysikalischen oder geochemischen Eigenschaft des Untergrundes erhoben werden. Bei Direct Push handelt es sich um ein materialverdrängendes Verfahren, d. h. im Gegensatz zur klassischen Bohrung wird beim Sondierfortschritt kein Bohrgut

gefördert. Im Folgenden werden die Erkundungsschritte und die dabei eingesetzten Direct-Push-Verfahren kurz erläutert.

Erkundung des Schichtaufbaus

Für die geologische Erkundung wurden zunächst Bodenproben an ausgewählten Punkten entnommen und geologisch angesprochen. Für die Bodenprobenahme wurde das Geoprobe-Dual-Tube-Verfahren eingesetzt. Dabei können über eine Schutzverrohrung kontinuierlich Bodenproben in PVC-Linern entnommen werden. Aufgrund der kiesigen Untergrundverhältnisse, die die Eindringtiefe bei Direct-Push-Sondierungen erheblich beeinflussen können, wurde mit dem Geoprobe Dual-Tube 21 ein Verfahren mit möglichst geringem Durchmesser des Sondiergestänges (hier 54 mm Außendurchmesser) ausgewählt, um eine möglichst hohe Eindringtiefe zu erzielen. Aufgrund des reduzierten Außendurchmessers konnten somit nur Liner mit einem Durchmesser von 30 mm verwendet werden. Durch die Grobkiesanteile im Untergrund kann eine Beeinträchtigung der Bodenprobenahme (z. B. durch Zusetzen des Probenehmers) nicht ausgeschlossen werden. Dies kann wiederum zu Kernverlust und ungenauer Zuordnung von Schichtgrenzen innerhalb eines Liners führen. Darüber hinaus kann es aufgrund des dynamischen Sondiervorgangs zu Setzungen innerhalb der Liner kommen. Folgende Erkundungstiefen wurden erreicht: Ansatzpunkt 2 = 24,20 m unter GOK, Ansatzpunkt 5 = 21,50 m unter GOK, Ansatzpunkt 6 = 24,12 m unter GOK; alle Sondierungen wurden abgebrochen, nachdem kein weiterer Sondierfortschritt festgestellt wurde.

Die ermittelte Schichtenfolge besteht im Wesentlichen aus einer 6 bis 10 m mächtigen, feinsandigen, gelegentlich tonigen und schwachkiesigen Schluffschicht gefolgt von den sand- und kiesdominierten Ablagerungen der Mittelterrasse. Diese bestehen aus schluffigem bis feinsandigem Grobsand und Mittelkies mit vereinzelt Schlufflinsen. Mit zunehmender Tiefe steigt der Grobkornanteil, mit sandigem Mittelkies als Hauptbestandteil ab einer Tiefe von 19 bis 21 m. Als Besonderheit wurde festgestellt, dass die gewonnenen Proben aus der ungesättigten Zone sehr trocken und zuweilen sehr verfestigt wirken. Es kann nicht abschließend geklärt werden, ob die Proben eine tatsächlich sehr geringe Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone widerspiegeln oder ob es aufgrund der entstehenden Reibungswärme bei dem insgesamt sehr geringen Sondierfortschritt zu einem Austrocknen der Proben während der Probenahme kam.

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an gewonnenen Proben eignen sich Nadelsonden. Aufgrund der gestörten Probenahme sowie der Verfestigung des Materials, die gegebenenfalls auf die Hitzeentwicklung bei der Probenahme selbst zurückzuführen ist, wurde von Messungen an dem Material abgesehen. Zumal sich eine relevante Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Proben bei Testmessungen ergab und der Wassergehalt nicht eindeutig bestimmt werden konnte. Hier müssten zur Reduzierung von Unsicherheiten weitere Literaturwerte recherchiert oder, idealerweise, *In-situ*-Messungen an ausgewählten Stellen z. B. über den TRT oder den Enhanced-TRT durchgeführt werden. Aufgrund der zu erwarten-

den geringen Wärmeleitfähigkeiten wurde der Fokus der weiteren Erkundung auf das hydrogeologische Regime zur Berücksichtigung eines möglichen konvektiven Wärmetransportes über fließendes Grundwasser ausgerichtet.

Ermittlung hydrogeologischer Parameter

Die Erkundung der hydrogeologischen Eigenschaften des geologischen Untergrundes erfolgte in verschiedenen Schritten, die im Folgenden erläutert werden.

Hydraulic Profiling

In einem ersten Schritt wurde das Hydraulic Profiling Tool (HPT) zur hydrostratigraphischen Charakterisierung des Untergrundes und zur Ermittlung der Mächtigkeit der Schluffüberdeckung eingesetzt. Dafür wird eine Sensorsonde mit einer bevorzugten Sondiergeschwindigkeit von 2 cm/s in den Untergrund getrieben. Über einen Filter an der Seite der Messsonde wird kontinuierlich Wasser (ca. 200 ml/min) in den Untergrund injiziert. Zeitgleich wird in der Höhe des Injektionsfilters der Wasserdruck gemessen. Bereiche höherer hydraulischer Leitfähigkeit zeichnen sich daher durch hohe Injektionsraten und einen geringen Injektionsdruck aus. Bereiche mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit hingegen werden durch geringe Durchflussraten und hohe Injektionsdrücke charakterisiert. Aus dem Verhältnis von Durchfluss zu Injektionsdruck ($HPT_{rel.k_f}$) können daher im gemessenen Vertikalprofil Bereiche ähnlicher oder unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeiten unterschieden werden. Dieses Tool ist für den Einsatz im grundwassergesättigten Bereich vorgesehen. Allerdings kann die Verteilung der Messwerte auch dazu genutzt werden, um qualitative Aussagen über die Heterogenität der Schichtenfolge im ungesättigten Bereich zu treffen. Eine weitere Anwendung ist bei Kenntnis des Luftdrucks die Approximation des Grundwasserstandes schon kurz nach der Sondierung. Diese Abschätzung zum Zeitpunkt der Sondierung (vergleichbar mit einer Stichtagsmessung) ist möglich, ohne eine GWM zu errichten. Zusätzlich kann über seitlich angebrachte Elektroden an der Messsonde die elektrische Leitfähigkeit des Bodens während des Vortriebs gemessen werden – dies dient in diesem Falle primär der Ermittlung der Mächtigkeit der Schluffüberdeckung. Die elektrische Leitfähigkeit ist dabei u. a. von der Bodenart, dem Tongehalt, der Porosität und der elektrischen Leitfähigkeit des Porenwassers abhängig. Unter nicht salzhaltigen Bedingungen korrespondiert eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit sehr häufig mit der Zunahme des Tonmineralgehalts im Untergrund. Im Untersuchungsgebiet wurden HPT-Sondierungen (inkl. Messung der elektrischen Leitfähigkeit) an den Ansatzpunkten 1, 3, 4 und 6 durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 3.2 dargestellt. Insgesamt bestätigt sich das Bild der Bodenprobenahme, indem zunächst eine Deckschicht von variabler Mächtigkeit (bis ca. 8 m) mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit identifiziert werden kann, die im Liegenden von heterogenen klastischen Sedimenten abgelöst werden. Einzelne Peaks der elektrischen Leitfähigkeit deuten auf isolierte Tonlinsen. Die Kiesschicht zeichnet sich durch eine geringe elektrische Leitfähigkeit aus. Sehr geringe elektrische Leitfähigkeiten können zudem durch eine schlechte elektrische Ankopplung der Elektroden an das Bodenmaterial im ungesättigten Bereich verursacht werden. An Punkt 6 scheint die Quartärbasis entgegen der vorliegenden

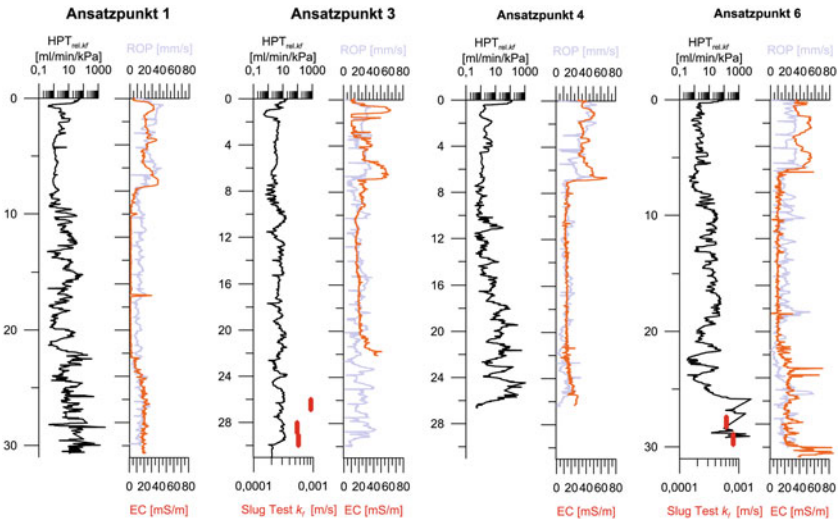


Abb. 3.2 Übersicht der Direct-Push-Ergebnisse am Demonstrationsstandort

Schichtverzeichnisse bereits bei 30 m unter GOK erreicht und die Sondierung wurde gestoppt. Der besondere Vorteil der Direct-Push-Sondiertechnik gegenüber klassischen Bohrungen ist die größere Effizienz, d. h. Untersuchung von mehr Punkten in vergleichbarer Zeit sowie die direkte Anzeige der *In-situ*-Messwerte. So kann ein Durchhörtern auch geringmächtiger Trennschichten effektiv verhindert werden. Weitere Informationen zu dem eingesetzten HPT-Verfahren finden sich u. a. in [McCall et al. \(2009\)](#) sowie [McCall und Christy \(2020\)](#).

Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit mittels Slug-Test

Zur Messung absoluter Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) wurden pneumatische Slug-Tests auf Grundlage der HPT-Ergebnisse in ausgewählten Tiefen durchgeführt. Für die Durchführung dieser Tests wurden temporäre GWM mit einer Filterlänge von 1,06 m mittels Direct Push installiert. Bei dieser Variante des klassischen Slug-and-Bail-Tests wird die erzwungene Grundwasserspiegeländerung in der betrachteten Messstelle mittels Druckluftbeaufschlagung herbeigeführt. Nachdem sich der Wasserstand in der Messstelle entsprechend der Druckbeaufschlagung angepasst hat, wird die Druckluft schlagartig abgelassen und der Wiederanstieg des Wassers in der Messstelle über einen Druckaufnehmer aufgezeichnet. Über eine Kurvenanpassung (siehe [Butler \(1998\)](#); [Zlotnik und McGuire \(1998\)](#)) können somit absolute k_f -Werte, die jeweils einen integralen Messwert des Durchlässigkeitsbeiwertes über die Filterlänge von 1,06 m darstellen, erhoben werden. Aus Qualitätssicherungsgründen wurden pro Tiefe Redundanzmessungen mit verschiedener Druckbeaufschlagung ausgeführt. Slug-Tests wurden in insgesamt fünf Tiefen an den Sondieransatzpunkten 3 und 6 durchgeführt. Die erhobenen Messwerte variieren dabei nur im geringen Umfang zwischen $9,13 \cdot 10^{-4}$ m/s und $5,37 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Messstelleninstallation

Im Anschluss an die Vorerkundung wurden sieben GWM installiert. Die nach der Installation durchgeführten Stichtagsmessungen belegen eine von West nach Ost gerichtete Grundwasserfließrichtung. Basierend auf den durchgeführten Slug-Tests wurde ein durchschnittlicher Durchlässigkeitsbeiwert von $6,9 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt. Bei einem durchschnittlichen hydraulischen Gradienten von $6 \cdot 10^{-4}$ (basierend auf mehreren Stichtagsmessungen) liegt die Grundwasserfließgeschwindigkeit bei ca. 13 m/a in Richtung Osten. Die Ermittlung der unbeeinflussten Grundwassertemperatur erfolgte dann im Rahmen des Grundwassertemperaturmonitorings. Zusätzliche Stichtagsmessungen wären auch über die temporären GWM zur Durchführung der pneumatischen Slug-Tests möglich gewesen. Aufgrund des geringen Innendurchmessers der temporären GWM war der Einbau der vorgesehenen Messtechnik nicht möglich, jedoch Messungen mit einem Kabellichtlot mit Temperaturfühler mit reduziertem Durchmesser. Die temporären Messstellen hatten eine Standzeit von ca. einem Tag und wurden mit geringem Aufwand (Zeitaufwand ca. 1,5 h) rückstandslos wieder entfernt. In diesem Falle erfolgte die Installation der Grundwassertemperaturmessstellen zeitnah nach Durchführung der Slug-Tests, sodass auf eine Stichtagsmessung in den temporären GWM verzichtet wurde.

Insgesamt zeigt sich, dass das angewandte Erkundungskonzept gut geeignet ist, um im Nachgang der grundstücksbezogenen geothermischen Erkundung weitere Daten beispielsweise für eine grundstücksübergreifende Modellierung möglicher Umweltauswirkungen zu liefern. Dabei liegen die Vorteile der Direct Push basierten *In-situ*-Messtechnik in ihrer vertikalen Auflösung, der schnellen Verfügbarkeit von Daten (z. B. bei HPT-Sondierungen liegen die Ergebnisse in beinahe Echtzeit vor) und deren Effizienz. Deutlich werden aber auch die herausfordernden Bedingungen für die Direct-Push-Sondiertechnik am Standort, die in einigen Fällen zu einem vorzeitigen Sondierabbruch führten. Werden Vor- und Nachteile abgewogen, dominieren aber doch die hier erzielte Datenqualität des Erkundungskonzeptes z. B. gegenüber der Durchführung klassischer Bohrungen.

3.2.2 Erkundungskonzept Neuerschließung

Bei dem in diesem Abschnitt betrachteten Demonstrationsstandort handelt es sich um eine landwirtschaftlich genutzte Fläche mit einer Größe von ca. 430 m x 760 m zwischen Bingen und Mainz in ca. 1000 m Entfernung zum Rhein. Aufgrund der geologischen und hydrogeologischen Standortbedingungen erscheinen offene Systeme oder Erdwärmekollektoren als besonders geeignet zur Nutzung Oberflächennaher Geothermie am Standort, da zunächst von einem geringen Installationsaufwand bei idealerweise hohem thermischen Entzugspotenzial auszugehen ist. Im Rahmen der Bewertung der Machbarkeit beim Einsatz offener Systeme müssen zunächst u. a. die Eigenschaften des Grundwasserleiters, d. h. die grundwassergesättigte Mächtigkeit sowie die hydraulische Leitfähigkeit und deren räumliche Variabilität charakterisiert werden. Die räumliche Charakterisierung ist in diesem Falle besonders relevant, da der Grundwasserleiter in flachen Tiefen von einer grundwasserstauenden Schicht im

Liegenden begrenzt wird, die nicht durchörtert werden darf. In Bezug auf die Nutzung von Erdwärmekollektoren ist die Kenntnis über eine etwaige räumliche Variabilität der Wärmeleitfähigkeit in den oberflächennahen Schichten sowie Informationen über den Grundwasserflurabstand wichtig. Ziele der durchgeführten Erkundung, wie sie im Rahmen einer Machbarkeitsstudie geeignet wäre, sind daher:

- Flächenhafte Ermittlung der Mächtigkeit des Grundwasserleiters, inkl. der Ermittlung der Mächtigkeit der ungesättigten Zone,
- flächenhafte Ermittlung der Tiefenlage der Oberkante des Grundwasserstauers,
- hydraulische Charakterisierung und *In-situ*-Messung der hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich des Grundwasserleiters.

Die Herausforderung bei der Charakterisierung der Fläche liegt vor allem in deren Dimension mit einer Größe von rund 33 ha. Daher wurde an diesem Demonstrationsstandort der bereits zuvor kurz erläuterte Ansatz aus der kombinierten Anwendung von oberflächengeophysikalischen Messungen und vertikal hochauflösenden Direct-Push-Sondierungen angewendet.

Als Methode der geophysikalischen Vorerkundung wurde die elektrische Widerstandstomografie genutzt. Bei diesem Verfahren wird dem Untergrund mittels Elektroden, die entlang von Transekten positioniert werden, ein elektrisches Feld aufgeprägt (siehe u. a. Knödel et al. (2005)). Über die Stärke des eingespeisten Stroms und über die an den Elektroden gemessenen Spannung kann die Verteilung des elektrischen Widerstandes entlang des Messtransektes berechnet werden. Unter nicht salzhaltigen Bedingungen korrespondiert eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit sehr häufig mit der Zunahme des Tonmineralgehalts im Untergrund. Messungen entlang der folgenden Transekte wurden durchgeführt:

- Zwei kombinierte Transekte im Norden der Untersuchungsfläche mit Ost-West-Ausrichtung mit einer Gesamtlänge von 656 m,
- ein Transekt mit West-Ost-Ausrichtung mit einer Länge von 516 m im Süden der Fläche,
- ein Nord-Süd verlaufendes 446 m langes Transekt über das Zentrum der Fläche.

Der Elektrodenabstand (Messung in Wenner-Konfiguration) betrug bei den Messungen 2 m. Abb. reffig:ERTspsIng zeigt die Verteilung der erfassten elektrischen Widerstände entlang des West-Ost orientierten Profils im Süden der Untersuchungsfläche.

Aus Abb. 3.3 wird deutlich, dass eine ca. 8–10 m mächtige Schicht erfasst wird, die sich durch hohe gemessene Widerstände auszeichnet. Dies deutet auf den Sand- und Kiesgrundwasserleiter hin, der von Material mit geringen Widerständen, d. h. hohen elektrischen Leitfähigkeiten, im Liegenden begrenzt wird. Aus den Messungen ist zudem eine laterale Veränderung der Verteilung der elektrischen Widerstände im Bereich von 200 m und 350 m entlang des Transektes erkennbar. In diesem Bereich nehmen die gemessenen Widerstände ab. Auf Grundlage der Geoelektrikmessungen wurden zehn Sondieransatzpunkte entlang der gemessenen Transekte festgelegt.

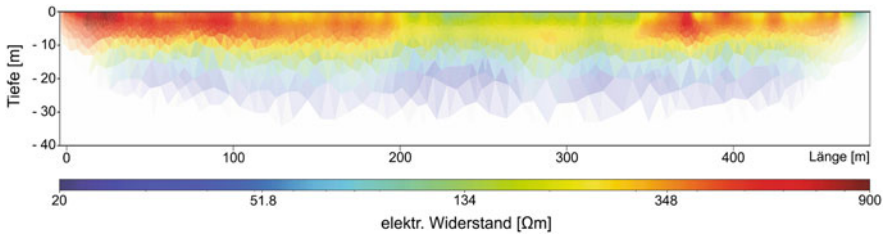


Abb. 3.3 Geoelektrikprofil mit West-Ost-Ausrichtung im Süden der Untersuchungsfläche

An diesen Punkten wurden Untersuchungen mit dem HPT und Bodenprobenahmen zur direkten Erfassung weiterer petrophysikalischer und hydrogeologischer Parameter durchgeführt. Informationen zur Funktionsweise und Quellen zu weiterführenden Informationen zum HPT sind im Erkundungskonzept Köln-Junkersdorf im Abschn. 3.2.1 aufgeführt.

Mittels des HPT konnte sehr effizient die Basis des Grundwasserleiters dezimetergenau erfasst werden – ohne den Stauer zu durchhörern. Dabei dauerte eine Sondierung am Standort etwa 35 min. Die Ergebnisse der verschiedenen Sondierungen sind in Abb. 3.4 dargestellt. Dabei wurden die Profile farblich entsprechend der hydrostratigrafischen Eigenschaften gekennzeichnet.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass insbesondere die grundwassergesättigte Mächtigkeit durch Variationen in der Höhenlage des Grundwasserstauers zwischen 4,3 m und 7,3 m variiert. Ebenfalls variiert die Mächtigkeit der ungesättigten Zone aufgrund der Geländemorphologie zwischen 1,5 m und 3,6 m. Abb. 3.5 gibt eine beispielhafte Darstellung der auf den Raum interpolierten Messwerte.

Die am Standort gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten weisen mit Werten von $1,2 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $3,12 \cdot 10^{-4}$ m/s zunächst auf hydraulisch gut leitfähige Sedimente hin. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse erscheint die grundwassergesättigte Mächtigkeit im obersten Grundwasserleiter insbesondere im Nordwesten der Untersuchungsfläche mit rund 4 m jedoch als nicht vorteilhaft für eine geothermische Quartiersversorgung – insbesondere vor dem Hintergrund zusätzlicher etwaiger saisonaler Schwankungen des Grundwasserspiegels. Wärmeleitfähigkeiten wurden an insgesamt 130 Proben gemessen, die an fünf Ansatzpunkten bis in eine maximale Tiefe von 10,5 m unter GOK entnommen wurden. 23 dieser Proben entstammen dabei aus Tiefen von 0 bis 3,0 m unter GOK, einem für Erdwärmekollektoren relevanten Tiefenbereich. Die Wärmeleitfähigkeit lag dabei im Mittel bei $1,84 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ wobei die Werte zwischen $2,47$ und $1,22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ als erfasste Maximal- bzw. Minimalwerte variieren. Variationen in der Wärmeleitfähigkeit ergeben sich hierbei sowohl durch Materialunterschiede als auch durch Unterschiede im Wassergehalt. Insgesamt liegen die Werte in einem typischen Bereich für feuchte Lockergesteine (siehe u. a. Prinz und Strauß (2018)). Auf Grundlage dieser Werte kann zusätzlich die Machbarkeit für den Einsatz von Erdwärmekollektoren in Abhängigkeit eines bestimmten Nutzungsszenarios geprüft werden.

Insgesamt erwies sich das Erkundungskonzept im Rahmen einer Machbarkeitsstudie als sehr zielführend. Innerhalb von vier Tagen konnten die relevanten Daten

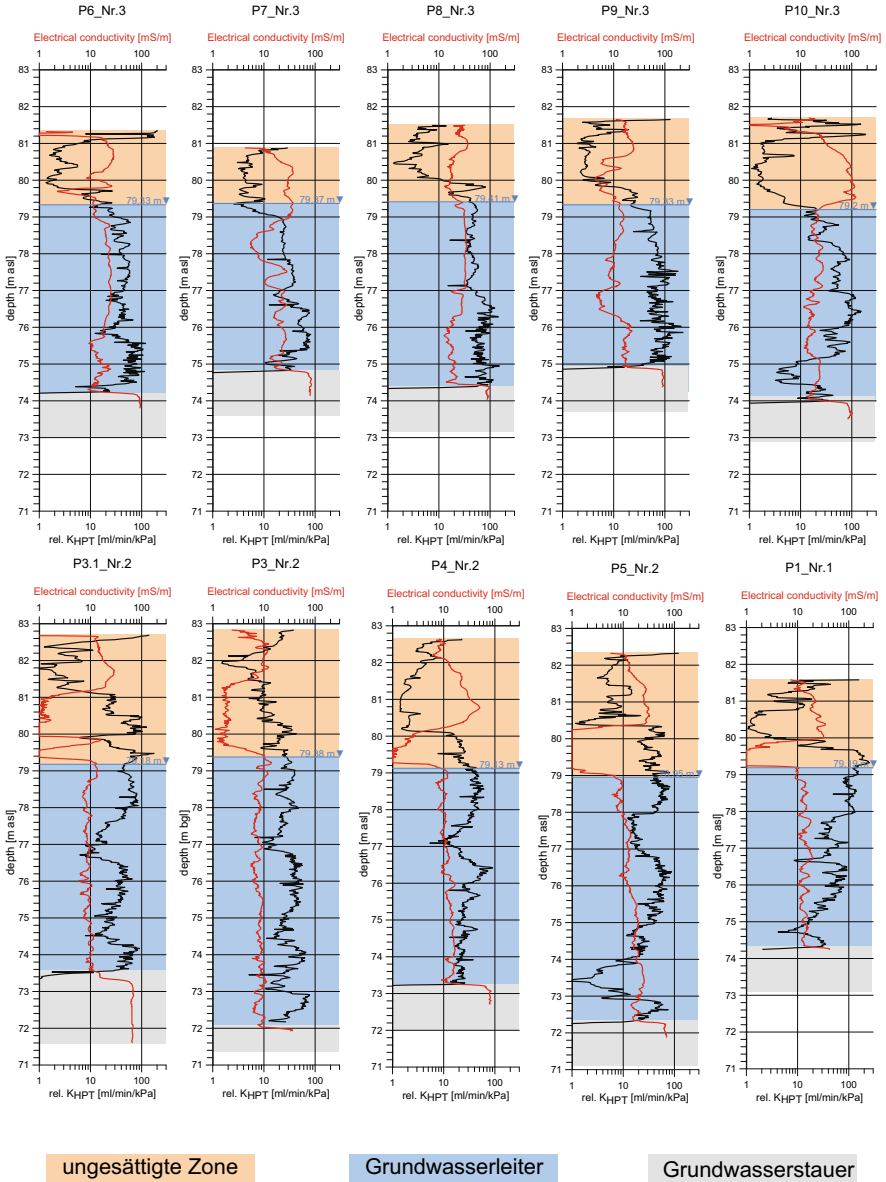


Abb. 3.4 Ergebnisse und Interpretation der Direct Push-Untersuchungen mittels HPT

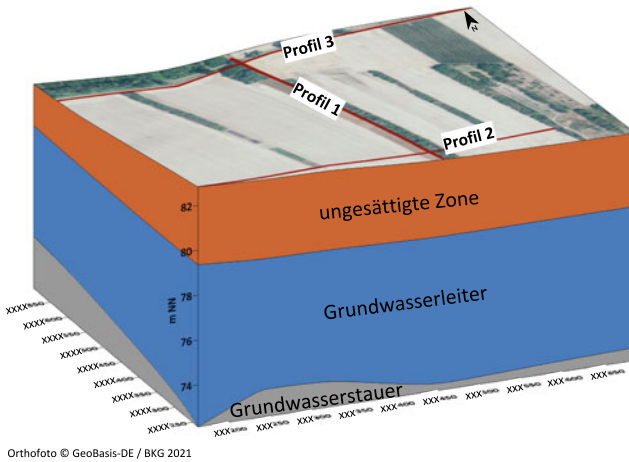


Abb. 3.5 Abgeleitetes konzeptionelles Modell

erhoben und teilweise noch vor Ort ausgewertet werden. Während die Geoelektrikmessungen zunächst für die Festlegung der Sondieransatzpunkte genutzt wurden, konnten diese jedoch keine Detailinformationen zur weiteren Verbesserung des konzeptionellen Modells in diesem Fall liefern. Hier erwiesen sich die vertikal hochauflösenden Direct-Push-Sondierungen unter Einsatz des HPT als sehr vorteilhaft. Als sehr zeitintensiv erwies sich die Messung der Wärmeleitfähigkeit an dem Probenmaterial. Aus Gründen der Qualitätssicherung wurden sechs Einzelmessungen pro Probe durchgeführt. Der benötigte Zeitaufwand belegt daher, wie wichtig es ist, über die Kombination von oberflächengeophysikalischen Messungen und vertikal hochaufgelösten Profilen gezielte Probenahmebereiche zu identifizieren, anstatt Probenmaterial rein auf Grundlage von Probenahmestrategien ohne weiteres Detailwissen am Standort zu generieren.

3.3 Weiterentwicklung von Erkundungsmethoden

Für die Dimensionierung einer geothermischen Anlage werden standortspezifische Angaben über die Untergrundeigenschaften benötigt, um eine Anlage optimal zu kalkulieren. Es besteht zum einen die Möglichkeit, anhand geologischer Karten und bestehenden Bohrungen die relevanten Untergrundeigenschaften abzuschätzen oder es können über eine *In-situ*-Messung am Standort die Untergrundparameter gemessen werden.

Hierbei gibt es mehrere Möglichkeiten, um die Untergrundeigenschaften zu ermitteln, wobei sich der TRT als ein international anerkanntes Standardverfahren zur Bestimmung der geothermischen Untergrundeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Bohrlochwiderstand und Untergrundtemperatur) etabliert hat. Dabei wird eine fertig ausgebaute (und im späteren Sondenfeld nutzbare) EWS mit einem definierten

Wärmeeintrag über einen Zeitraum von 48 bis 72 h thermisch belastet und der Untergrund zu einer Temperaturantwort („response“) angeregt. Diese Reaktion ist charakteristisch für die dort anstehenden Gesteine und lässt die Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Umfeld der Sonde zu. Die theoretischen Grundlagen des TRT wurden in den 1980er-Jahren aus der Thermodynamik abgeleitet und für die Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten in Erdwärmebohrungen angepasst. Seit Mitte der 1990er-Jahre stehen mobile Messeinrichtungen für den Baustelleneinsatz zur Verfügung. Ein TRT-Messgerät besteht im Wesentlichen aus einer Heizeinrichtung, einer Umwälzpumpe sowie einer Datenerfassung und Steuerung. Da der Querschnitt einer EWS gegenüber der Länge zu vernachlässigen ist, kann die Auswertung anhand der Kelvin’schen Linienquelle (siehe [Carslaw und Jaeger \(1959\)](#)) erfolgen. Demnach zeigt der Untergrund bei Eintrag einer konstanten Wärmemenge zu Beginn ein typisches Aufheizerhalten und zu späten Zeiten einen konstanten Temperaturanstieg. Die Auswertung der zeitlichen Temperaturentwicklung ermöglicht die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Umfeld des Bohrloches.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ist bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit der sich die Erwärmung ausbreitet. Die Wärmeleitfähigkeit ist das Vermögen eines Stoffes, Energie in Form von Wärme zu transportieren. Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_s liefert einen integralen Wert der Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Bohrung. Die Berechnung erfolgt nach der Theorie der Kelvin’schen Linienquelle. Der thermische Bohrlochwiderstand R_b beschreibt den Wärmeübergang zwischen dem Fluid in der Sonde und der Bohrlochwand. Die Ermittlung ist ebenfalls aus der Kelvin’schen Linienquellentheorie abzuleiten. Der thermische Bohrlochwiderstand ermöglicht eine qualitative Aussage zur Güte der Anbindung der EWS an das Gebirge. Daraus ergeben sich einerseits Eingangsparameter für Simulationsprogramme zum thermischen Verhalten von EWS und andererseits Hinweise auf die Qualität der Hinterfüllung.

Da mithilfe von geothermischen Testarbeiten die standortspezifischen Untergrundeigenschaften bestimmt werden können, welche einen signifikanten Einfluss auf die Berechnung und Dimensionierung einer geothermischen Anlage besitzen, bedarf es eines Testgeräts, das die hohen Anforderungen an die Messung der vorangegangenen Parameter erfüllt. Im Zuge des Vorhabens wurde deshalb ein Testgerät entwickelt und gebaut, das den Anforderungen der VDI 4640 Blatt 5 entspricht. Mit dem Testgerät können sowohl an Einfach-U- als auch an Doppel-U-Sonden geothermische Testarbeiten durchgeführt werden, da innerhalb des Geräts jeweils zwei separate Vor- bzw. Rücklaufstränge vorhanden sind. Über zwei Wärmemengenzähler im Vorlauf können des Weiteren die Durchflussrate, die eingetragene Wärmemenge sowie die Temperatur der jeweiligen Stränge erfasst werden. Im Rücklauf wird über Temperatursensoren die Rücklauftemperatur gemessen. Durch Strangreguliventile können die einzelnen Stränge hydraulisch abgeglichen werden, sodass beide Sonden gleichmäßig durchströmt und thermisch belastet werden (bei Doppel-U-Sonden). Das Gerät besitzt insgesamt drei Heizstufen (3 kW, 6 kW und 9 kW) sowie einen Durchsatzregler, um in Abhängigkeit der standortspezifischen Sonden- und Standortcharakteristik (Sondentyp, Sondentiefe, Schichtenabfolge, Grundwasser) eine optimale Einstellung für die Testarbeiten zu generieren.

Zur Kontrolle der laufenden Messungen sowie zum Auslesen der aufgezeichneten Daten kann über einen Remote Acces auf das Gerät zugegriffen werden. Dies ermöglicht es zeitnah, bei Störungen erste Informationen über das aufgetretene Problem zu erhalten, sowie, wenn möglich, das Problem zu beheben, sodass die Messung fortgeführt werden kann. Des Weiteren kann geprüft werden, ob, nach der Mindestdauer von 48 h für die Durchführung des TRT, eine vorzeitige Auswertung der Messung möglich ist.

Die Funktionalität sowie die Messergebnisse des neu gebauten Testgeräts wurde an einer Testsonde der geoENERGIE Konzept GmbH ausgiebig geprüft und untersucht. Die Testsonde befindet sich am Firmenstandort in Freiberg und ist eine Doppel-U-Sonde mit einer Tiefe von 100 m. Die Messungen wurden mit alten Messungen (mit Testgeräten der geoENERGIE Konzept GmbH) verglichen und hierbei konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der bisherigen Messungen mit dem neuen Testgerät reproduzierbar bzw. vergleichbar sind. Im Laufe des Projektes wurde das neue Testgerät durch den Projektpartner geoENERGIE Konzept GmbH intensiv geprüft, um zum einen die Einsatzfähigkeit nachzuweisen und zum anderen um bauliche Fehler zu finden, die einen Einfluss auf die Messergebnisse haben. So wurden Komponenten teilweise ausgetauscht bzw. angepasst, um das Gerät für einen zuverlässigen Baustelleneinsatz zu optimieren. In den ersten Messungen konnte verifiziert werden, dass die Temperaturentwicklung innerhalb des Geräts, aufgrund der guten Isolierung der Leitung, einen sehr geringfügigen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im System und somit auf die Messwerte besitzt. Die vorhandene Luftkühlung sowie die Möglichkeit einer Kühlung mit einem Klimagerät können somit als praxistauglich bezeichnet werden. Im Winter ist der Einfluss etwas stärker ausgeprägt als im Sommer. In den bisherigen Messungen hat sich zudem gezeigt, dass eine konstante Stromzufuhr/Spannung wichtig ist, da es sonst zu einem Leistungsabfall bei der Heizpatrone kommt, welche ein kurzfristiges Absinken der Vorlauftemperatur bewirkt. In der Auswertung bewirken diese minimalen Schwankungen kein größeres Problem, jedoch ist ein konstanter Wärmeeintrag in den Untergrund wünschenswert. Aus diesem Grund soll das Gerät dahingehend optimiert werden, dass kurzfristige Spannungsschwankungen abgefedert werden können und eine konstante Leistung gewährleistet werden kann. Diese Spannungsschwankungen sind abhängig vom (Bau-)Stromnetz und weisen auch eine deutliche Variation innerhalb eines Tages auf.

Nach Optimierung des bisherigen Geräts ist dieses im Einklang mit den bisherigen Richtlinien und stellt ein wichtiges Planungsinstrument bei der Dimensionierung von geothermischen Systemen in Quartieren und im Allgemeinen dar. Das Gerät ist des Weiteren eine deutliche Weiterentwicklung der bisherigen Testgeräte des Projektpartners geoENERGIE Konzept GmbH und kann somit als wertvolle Ergänzung im Rahmen eines Erkundungskonzeptes angesehen werden. Die neuen Erkenntnisse werden in den Bau weiterer TRT-Geräte fließen, um eine Verwertung der Projektergebnisse gewährleisten zu können.

3.4 Monitoring

Die Beobachtung der Entwicklung von Boden- und Grundwassertemperaturen im Zusammenhang mit der Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen erlaubt die Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen sowie der ökonomischen Effizienz geothermischer Anlagen. Grundwassertemperaturdaten sind daher ein wichtiger Indikator für eine dauerhaft nachhaltige Nutzung Oberflächennaher Geothermie.

Im Rahmen von EASyQuart wurden technische Aspekte von Monitoringstrategien untersucht und die Repräsentativität gemessener Temperaturdaten bewertet sowie die dabei relevanten Einflussfaktoren identifiziert. Dabei standen die besonderen Herausforderungen im Fokus, welche mit dem Grundwassertemperaturmonitoring auf Quartiersebene einhergehen.

3.4.1 Langzeitmonitoring am Fallbeispiel Köln-Junkersdorf

Für das in Abschn. 3.2.1 vorgestellte Wohnquartier besteht seit 2013 ein intensives Langzeitmonitoring (siehe [Meng et al. \(2019\)](#); [Vienken et al. \(2019\)](#)), das im Rahmen von EASyQuart fortgeführt wurde. Abb. 3.1 zeigt eine Übersicht des Untersuchungsgebiets und die Lokationen der sieben GWM, welche zum Zweck des Grundwassertemperaturmonitorings installiert wurden. Zwei der Messstellen liegen im Anstrombereich (GWM 1 und GWM 2), zwei innerhalb des Wohngebietes (GWM 4 und GWM 6) und drei im Abstrombereich (GWM 7, GWM 8 und GWM 9). Die Tiefe der Messstellen beträgt ca. 30 m mit Ausnahme der GWM 4 mit einer technisch bedingten Installationstiefe von 25,8 m. Die GWM sind über den erschlossenen grundwassergesättigten Bereich vollständig verfiltert. Der Grundwasserspiegel im Untersuchungsgebiet lag zu Beginn des Monitorings zwischen 21 und 23 m unter GOK und variierte über den gesamten Untersuchungszeitraum um ca. 0,7 m. Innerhalb der Messstellen wurden je fünf Temperaturlogger zwischen 22,5 und 29,5 m unter GOK zur quasi-kontinuierlichen Erfassung der Grundwassertemperaturen installiert, Ausnahme bildet wiederum die GWM 4 mit nur vier Loggern in den Tiefen zwischen 22,5 und 25,2 m unter GOK. Abb. 3.6 zeigt die im Laufe des Untersuchungszeitraums gewonnenen und über die Grundwassermächtigkeit gemittelten Temperaturdaten (weitere Informationen zur Datenbearbeitung finden sich unter [Vienken et al. \(2019\)](#)).

Zu Beginn der Untersuchung 2013 lagen die Grundwassertemperaturen in allen Messstellen relativ nah beieinander. Der maximale Temperaturunterschied betrug zu diesem Zeitpunkt 0,4 K. Mit voranschreitender geothermischer Nutzung kam es zu einem zunehmenden Unterschied zwischen den An- und Abstromtemperaturen. Dies wird zunächst durch eine deutliche Verringerung der Abstromtemperaturen in den ersten beiden Jahren des Monitorings, gefolgt von einer Erhöhung der Anstromtemperaturen bei sich stabilisierenden Abstromtemperaturen bedingt. Eine Ausnahme hiervon stellt die Temperaturentwicklung in GWM 9 dar, welche einen Verlauf mit starken saisonalen Schwankungen aufweist. Die Ursache ist nicht eindeutig zu klären, die Messstelle liegt jedoch im direkten Einflussbereich eines der wenigen

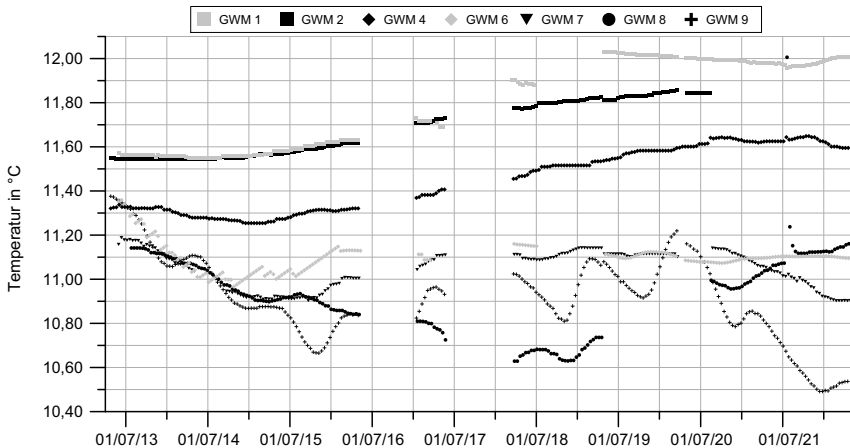


Abb. 3.6 Grundwassertemperaturen am Standort Köln-Junkersdorf von 2013 bis 2022, modifiziert nach [Vienken et al. \(2019\)](#)

offenen geothermischen Systeme im Untersuchungsgebiet. Die (relative) Abnahme der gemessenen Grundwassertemperaturen im Abstrom sind ein deutliches Indiz für die Auswirkungen der intensiven geothermischen Nutzung auf Quartiersebene.

Insbesondere die im Zeitraum von EASyQuart gewonnenen Daten weisen darauf hin, dass die Grundwassertemperaturen im Untersuchungsgebiet neben der thermischen Nutzung auch von anderen Faktoren beeinflusst werden. Zum einen zeigt sich dies durch den bereits erwähnten Anstieg der Grundwassertemperaturen im Anstrombereich; zum anderen zeigen die Temperaturverläufe in den Abstrommessstellen GWM 7, GWM 8 und GWM 9 ab 2017 ein ausgeprägtes nicht vergleichbares individuelles Verhalten.

Die gewonnenen Daten stellen einen wertvollen Referenzdatensatz für die Quantifizierung von Langzeitauswirkungen der intensiven Nutzung Oberflächennaher Geothermie auf Quartiersebene dar. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, wie wichtig die kritische Betrachtung von Monitoringdaten und deren Repräsentativität für die Bewertung tatsächlicher Temperaturveränderungen durch die intensive Nutzung Oberflächennaher Geothermie ist.

3.4.2 Beeinflussungen von Boden- und Grundwassertemperaturen auf Quartiersebene

Wie bereits in Abschn. 1.4 dargestellt, unterliegt das unterirdische Temperaturregime dicht besiedelter Räume einer Vielzahl von Einflüssen, welche in der Regel die Erhöhung der Untergrundtemperaturen im Vergleich zur ländlichen Umgebung hervorrufen ([Menberg et al. 2013](#); [Balke 1974](#)). Für eine zuverlässige Bewertung der Auswirkungen der geothermischen Untergrundnutzung muss diese von anderen

thermischen Einflüssen abgegrenzt werden. Die Herausforderung liegt darin, die verschiedenen Faktoren zu definieren und zu quantifizieren. Im Gegensatz zu urbanen Ballungszentren lassen sich die möglichen thermischen Beeinflussungen von Quartieren wie Einfamilienhausiedlungen auf wenige wesentliche Faktoren eingrenzen (z. B. Überbauung, Oberflächenversiegelung und Versorgungsleitungen). Im Projekt EASyQuart wurden mit der Überbauung und verschiedenen Oberflächenarten zwei dieser Aspekte näher betrachtet.

Einfluss der Überbauung

Zur Ermittlung und Quantifizierung des durch die Siedlungstätigkeit erzeugten Wärmeeintrags in den Untergrund wurde im Rahmen von EASyQuart ein modellbasierter Ansatz entwickelt. Abb. 3.7 zeigt vereinfacht den angewandten Workflow. Im ersten Schritt wurden verschiedene bauphysikalische Softwarelösungen auf ihre Anwendbarkeit hin getestet. Der Wärmeeintrag in den Untergrund wurde dann für verschiedene Gebäudetypen mithilfe des ausgewählten Programms HTFlux simuliert. Es wurden dabei Gebäude ohne Unterkellerung sowie Gebäude mit beheiztem und unbeheiztem Keller mit Dämmstandards verschiedener Baualtersklassen untersucht. Die Parametrisierung der Referenzgebäude sowie der verschiedenen Bauteile und die daraus resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) erfolgte in Anlehnung an die Deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (Loga et al., 2015). Als Temperaturrandbedingung an der Oberfläche wurden die Monatsmittel der Lufttemperaturen in Köln von 1995 bis 2019 des Deutschen Wetterdienstes angesetzt (Deutscher Wetterdienst, 2021). Für die Simulation wurde der Untergrund als homogener Raum mit einer Wärmeleitfähigkeit von $2,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ definiert. Abb. 3.8 zeigt die simulierten Temperaturverteilungen nach 20 Jahren unter einem Gebäude mit mittlerem Dämmstandard mit beheiztem (Abb. 3.8 (a)) und unbeheiztem Keller (Abb. 3.8 (b)). Unterhalb des Gebäudes entsteht eine Wärmeanomalie, welche im Falle des beheizten Kellers wesentlich größer ist als bei dem unbeheizten Keller. Die Ergebnisse der bauphysikalischen Simulation wurden im Anschluss

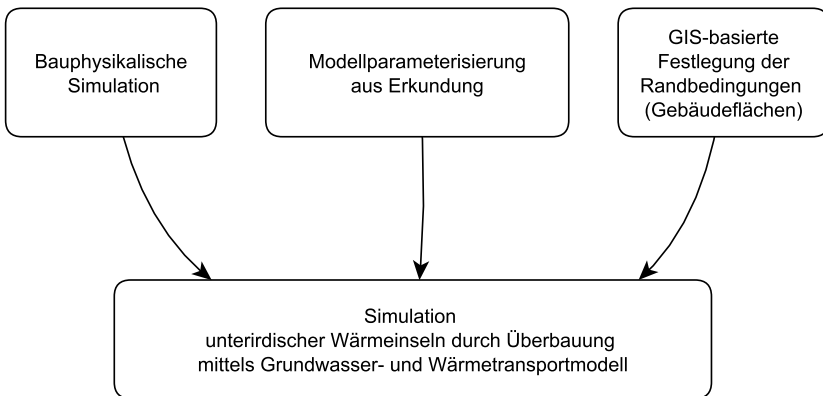


Abb. 3.7 Workflow zur Ermittlung von Wärmeeinträgen aus Gebäuden in den Untergrund

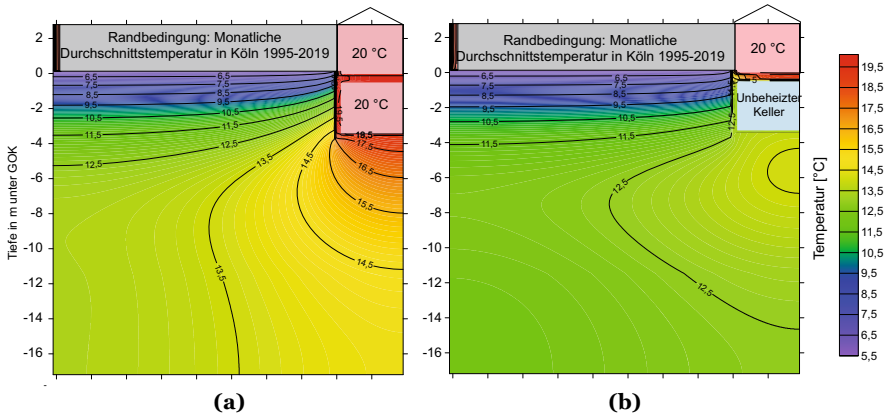


Abb. 3.8 Simulierte Temperaturverteilungen unterhalb von Gebäuden mit mittlerer Dämmung mit beheiztem (links) und unbeheiztem (rechts) Keller nach 20 Jahren Simulationszeit; Simulation mittels HTFlux

in Form von Temperaturverläufen als Randbedingungen unterhalb bebauter Areale in ein Grundwasser- und Wärmeströmungsmodell in Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System (FEFLOW) implementiert, um den Effekt der Überbauung auf die Grundwassertemperaturen zu ermitteln. Grundlage für die Parametrisierung dieses Modells war der Demonstrationsstandort Köln-Junkersdorf, der bereits eingehend in Abschn. 3.2.1 beschrieben wurde. Als repräsentativer Gebäudetyp wurde ein mittlerer Dämmstandard mit beheiztem Keller gewählt. Die geothermische Nutzung des Modellgebiets wurde für diese Betrachtung zunächst nicht mit einbezogen.

Abb. 3.9 zeigt einen Ausschnitt der ermittelten Grundwassertemperaturverteilung in einer Tiefe von 24 m unter GOK für das gewählte Beispielszenario 30 Jahre nach Überbauung. Die Überbauung führt zu einer Grundwassertemperaturerhöhung von

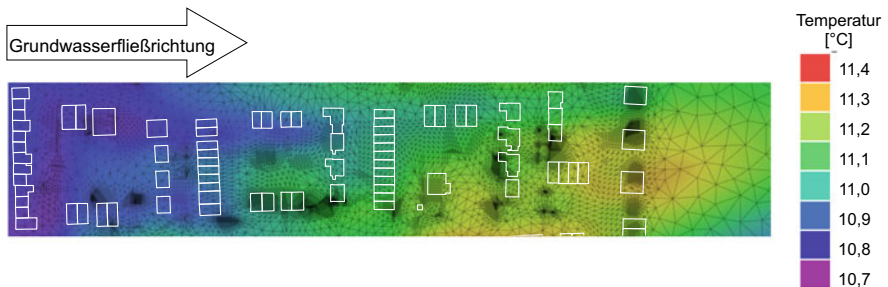


Abb. 3.9 Ausschnitt der simulierten Grundwassertemperaturverteilung unterhalb des Wohngebiets in 24 m Tiefe nach 30 Jahren, weiße Umrandungen markieren überbaute Bereiche; Simulation mittels FEFLOW

über 0,5 K gegenüber dem unbebauten Zustand und erzeugt eine Wärmefahne, welche sich in Grundwasserfließrichtung ausbreitet. Ein solcher zusätzlicher Wärmeeintrag sollte bei der Bewertung von Monitoringdaten hinsichtlich der tatsächlichen Auswirkungen einer geothermischen Untergrundnutzung unbedingt berücksichtigt werden.

Der vorgestellte Workflow ist für eine Vielzahl von Szenarien anwendbar und ermöglicht beispielsweise für Neubaugebiete die Abschätzung von Wärmeeinträgen, die aus der Überbauung resultieren. Für neu errichtete, geothermisch versorgte Quartiere kann somit der thermische Einfluss der Siedlungstätigkeit von Beginn an mit in Betracht gezogen werden.

Effekte verschiedener Oberflächen auf Untergrundtemperaturen

Als weiterer Faktor wurde der thermische Einfluss verschiedener Arten von Oberflächen auf den Untergrund quantitativ untersucht. Abb. 3.10 zeigt eine Luftaufnahme der auf dem Gelände des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) in Leipzig eingerichteten Testfläche mit verschiedenen typischen Oberflächenbedeckungen. Die Teilflächen wurden mit Rasen (Referenz-/Testfläche R), dunklem (Testfläche A) und hellem (Testfläche B) Kies sowie Asphalt (Testfläche C) bedeckt.



Abb. 3.10 Testflächen mit unterschiedlicher Oberflächenbedeckung auf dem UFZ-Gelände. Foto: M. Kreck

Auf jeder Teilfläche wurden in einer Tiefe von 5 cm mittig drei Temperatursensoren eingebaut, um die Entwicklung der oberflächennahen Bodentemperaturen zu erfassen. Für die tiefenorientierte Messung der Bodentemperaturen wurden zudem Bodentemperaturmessstellen mit entsprechender Sensorik in den Tiefen 0,25 m; 0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; 2,5 m und 2,9 m auf jeder Teilfläche installiert. Zusätzlich dient der Versuch zur Definition von Oberflächenrandbedingungen für Grundwassertemperatursimulationen von besiedelten Räumen.

Erwartungsgemäß wurden in einer Tiefe von 5 cm die größten Temperaturunterschiede zwischen den Flächen erfasst. Einen Überblick dazu bietet Tab. 3.1. Zu Beginn des Versuchs wurde der Bewuchs auf allen Flächen entfernt und die Bodentemperaturen vor Aufbringung der Oberflächenbeläge über einen Zeitraum von 14 Tagen aufgezeichnet (Nullmessung). Dabei ergaben sich Temperaturen zwischen 21,5 °C und 22,3 °C, die maximale Temperaturabweichung zwischen den einzelnen Flächen lag somit bei 0,8 K. Mit Installation der verschiedenen Oberflächenbeläge zeigte sich unmittelbar eine Änderung der gemessenen Bodentemperaturen in einer Tiefe von 5 cm. Über die Versuchsdauer von einem Jahr liegt die mittlere Temperatur unterhalb der Asphaltfläche bei 14,0 °C, unterhalb der dunklen Kiesfläche bei 14,4 °C, unterhalb der hellen Kiesfläche bei 11,5 °C und unterhalb der Referenzrasenfläche bei 13,0 °C. Damit ergibt sich eine maximale Temperaturdifferenz von 2,9 K zwischen der dunklen und der hellen Kiesfläche. Verstärkt tritt dieser Effekt im Sommer auf. Dies zeigt der Vergleich der gemessenen Temperaturen im Juli 2022 mit einer maximalen Abweichung von 4,3 K zwischen den Kiesflächen. Interessant dabei ist, dass die Temperaturen unterhalb der hellen Kiesfläche geringer als unter der Rasenfläche sind. Innerhalb des relativ kurzen Untersuchungszeitraums von einem Jahr sind diese Temperaturveränderungen hauptsächlich im oberflächennahen Bereich zu beobachten. Ab einer Tiefe von 2 m unter GOK ist der gemessene Temperaturunterschied nicht mehr eindeutig nachweisbar. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Temperaturveränderungen mit fortschreitender Zeit auch in tieferen Bodenbereichen auftreten. Zur langfristigen empirischen Erfassung des Einflusses

Tab. 3.1 Temperaturentwicklung in 5 cm Tiefe unterhalb verschiedener Oberflächen, Werte sind arithmetische Mittel der drei Sensoren pro Fläche gemittelt über die Zeit

Testfläche	Bodentemperaturen vor Installation der Oberflächenbedeckungen (01.07.-14.07.2021; Nullmessung)	Mittlere Bodentemperatur 07/21-07/22	Bodentemperaturen 1 Jahr nach Installation der Oberflächenbedeckungen (01.07.-14.07.2022)
R- Referenz/Rasen	21,7 °C	13,0 °C	21,7 °C
A- Dunkler Kies	22,3 °C	14,4 °C	24,9 °C
B- Heller Kies	22,1 °C	11,5 °C	20,6 °C
C- Asphalt	21,5 °C	14,0 °C	23,4 °C
Maximale Temperaturdifferenz	0,8 K (zwischen A und C)	2,9 K (zwischen A und B)	4,3 K (zwischen A und B)

von unterschiedlichen Oberflächenarten auf die Untergrundtemperaturen wird die Weiterführung des Versuchs daher angestrebt.

3.4.3 Repräsentativität gemessener Grundwasser- und Bodentemperaturen

Für die zuverlässige Erfassung der induzierten Temperaturänderungen im Untergrund durch die Geothermienutzung ist die Repräsentativität gemessener Temperaturdaten von essenzieller Bedeutung. Obgleich dieser Relevanz gibt es wenige Richtlinien und Leitfäden für das repräsentative Boden- und Grundwassertemperaturmonitoring. Eine der wenigen Richtlinien sind die Empfehlungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser zur Beobachtung und Auswertung von Grundwassertemperaturen (LAWA, 1988). Diese gibt Empfehlungen bezüglich der Anforderungen an Grundwassertemperaturmessstellen und Temperaturmessgeräte. Für speziell errichtete Grundwassertemperaturmessstellen gelten u. a. folgende Empfehlungen: einfach verfiltert mit einer Filterstrecke von maximal 1 m und ein Ausbaudurchmesser von maximal DN50 bzw. 2“. Bei Bestandsmessstellen können Messstellen mit größerem Durchmesser genutzt werden, solange diese nicht durchgehend oder mehrfach verfiltert sind (LAWA, 1988). Hintergrund der Einschränkungen in Bezug auf Ausbaudurchmesser und Länge bzw. Anzahl der Filterstrecken sind mögliche Vertikalströmungen innerhalb der Messstelle, welche die Repräsentativität gemessener Temperaturdaten beeinträchtigen können. Die Relevanz dieser Strömungen wurde u. a. von Diment (1967) und Berthold und Börner (2008) untersucht. Darüber hinaus untersuchten Alexander und MacQuarrie (2005) den Einfluss von Ausbaumaterial und oberirdischer Isolierung von GWM auf die gemessene Grundwassertemperatur. Umfassendere Untersuchungen, inwiefern die Messstellenlokation oder der Ausbau (Durchmesser und Filterlänge) die Messdaten beeinflussen, fehlen bislang.

Auswirkungen des Messstellenausbau – Fallbeispiel Leipzig

Auf dem Testfeld des UFZ in Leipzig wurden 2015 sechs GWM für Vergleichsmessungen in einem Abstand von ca. 1,5 m zueinander errichtet. Die Tiefe der Messstellen liegt bei 15 m unter GOK, der Grundwasserspiegel liegt bei ca. 10 m unter GOK. Wie in Tab. 3.2 zu sehen, unterscheiden sich die Messstellen hinsichtlich des Ausbaudurchmessers und der Länge der Filterstrecken. GWM 2, 4 und 6 entsprechen dabei der LAWA-Richtlinie für Grundwassertemperaturmessstellen hinsichtlich Ausbaudurchmesser und Länge der Filterstrecke, während die Messstellen GWM 1, 3 und 5 eine Filterstrecke von 5 m haben.

In allen Messstellen wurden Temperaturmessketten mit TidBit-Loggern der Marke OnSet (Genauigkeit $\pm 0,21$ K) verbaut, welche seit 2015 Temperaturen in einem vierstündigen Turnus aufzeichnen. Die Logger befinden sich jeweils in den Tiefen 4,7 m; 10 m; 11 m; 12 m; 13 m und 14 m. Im Rahmen von EASyQuart erfolgte eine Fortführung der Messreihe sowie die vergleichende Auswertung der gewonnenen Daten.

Tab. 3.2 Ausbaudetails der GWM 1- GWM 6

Messstelle	Ausbauerdurchmesser	Filterstrecke
GWM 1	2"	5 m (10–15 m unter GOK)
GWM 2	2"	1 m (14–15 m unter GOK)
GWM 3	1,5"	5 m (10–15 m unter GOK)
GWM 4	1,5"	1 m (14–15 m unter GOK)
GWM 5	1,25"	5 m (10–15 m unter GOK)
GWM 6	1,25"	1 m (14–15 m unter GOK)

Abb. 3.11 zeigt die über die Tiefe interpolierten zeitlichen Verläufe der gemessenen Temperaturen im grundwassergesättigten Bereich. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse zeigt Abb. 3.12 die Differenzen zwischen den gemessenen Temperaturen innerhalb GWM 1 und GWM 6 (Abb. 3.12 (a)) sowie GWM 2 und GWM 5 (Abb. 3.12 (b)), den Messstellen mit den größten Ausbaunterschieden. Obgleich sich kleinere Unterschiede in den gemessenen Grundwassertemperaturen aus Abb. 3.11 ergeben, liegen die im Grundwasser gemessenen Temperaturunterschiede innerhalb der kumulierten Fehlerbereiche der verwendeten Logger. Dieser Langzeitversuch zeigt, dass die getesteten Ausbauvarianten keinen relevanten Einfluss auf die gemessenen

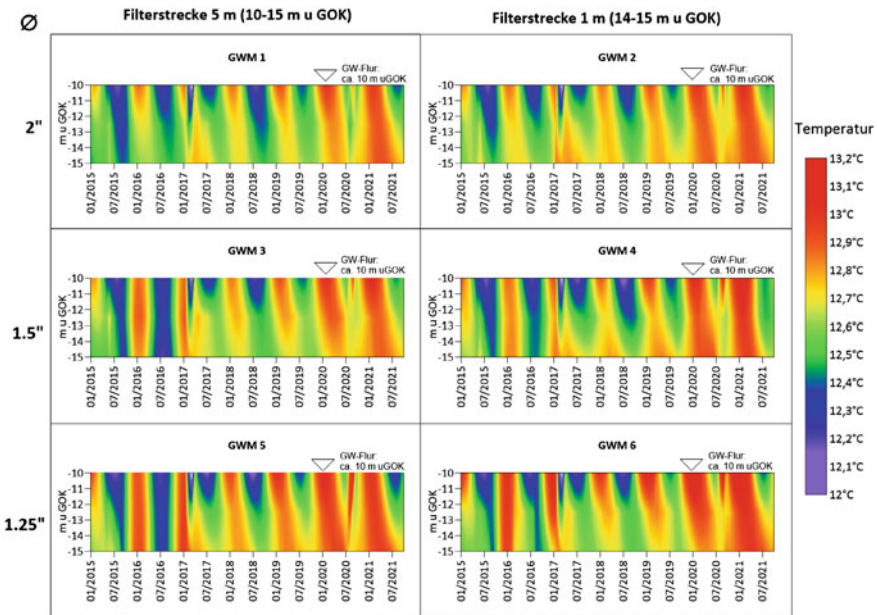


Abb. 3.11 Entwicklung der Temperaturen innerhalb der Messstellen GWM 1 - GWM 6 im grundwassergesättigten Bereich

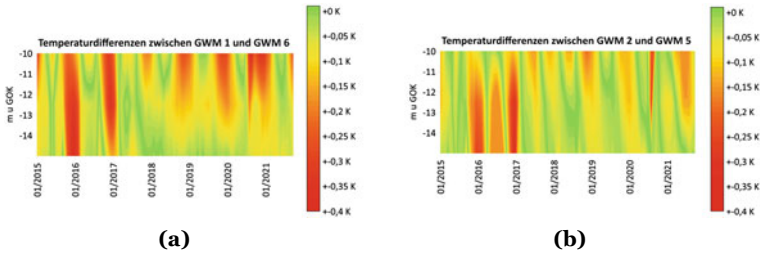


Abb. 3.12 Temperaturdifferenzen zwischen den Messstellen GWM 1 und GWM 6 (a) und GWM 2 und GWM 5 (b)

Temperaturen haben und somit gleichermaßen für die Ermittlung repräsentativer Grundwassertemperaturdaten geeignet sind.

Vergleich von Methoden zur Grundwassertemperaturerfassung am Fallbeispiel Berlin-Gesundbrunnen

Im Rahmen von EASyQuart wurden Auswirkungen der geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrunds auf die Boden- und Grundwassertemperaturen am Standort Berlin-Gesundbrunnen untersucht. Dabei handelt es sich um ein Gebäude mit Wohnungen und gewerblicher Nutzung, welches durch 18 EWS mit einer Tiefe von jeweils 99,9 m geothermisch beheizt und gekühlt wird. Vertikalprofile der Verteilung der Boden- und Grundwassertemperaturen werden seit 2020 in Form von Stichtagsmessungen in einem viermonatigen Turnus in drei Temperaturmessstellen erfasst. Dabei handelt es sich um eine Anstrommessstelle im Norden sowie zwei Abstrommessstellen im Süden und Südwesten der Anlage. Dieses Monitoring wurde seit November 2021 um eine quasi-kontinuierliche Langzeitaufzeichnung der Untergrundtemperaturen in diskreten Tiefen ergänzt. Dazu wurden in den drei Temperaturmessstellen insgesamt 29 Temperaturlogger installiert. Die UTBI-001 Logger der Marke OnSet wurden in Form von Messketten in den Tiefen 15 m; 30 m; 45 m; 60 m; 70 m; 80 m; 85 m; 90 m und ca. 95 m eingebaut und zeichnen dort stündlich die Untergrundtemperaturen auf. Der Fokus der Temperaturmessungen im Bereich von 70–95 m unter GOK ergibt sich aus der Vorerkundung, die auf einen ausgeprägten Grundwasserleiter in dieser Tiefe schließen lässt.

Abb. 3.13 (a-c) zeigt die Entwicklung der Temperaturen in den drei Temperaturmessstellen. Die dargestellten Daten wurden bis November 2021 durch Stichtagsmessungen gewonnen und über die Zeit interpoliert. Ab November 2021 zeigt die Abbildung die über die Tiefe interpolierten Daten der quasi-kontinuierlichen Messungen. Die Ergebnisse des Monitorings weisen die stärksten Temperaturänderungen im Tiefenbereich des Grundwasserleiters zwischen 70 m und 90 m unter GOK auf. Über den Untersuchungszeitraum verringerte sich die Temperatur in diesem Tiefenbereich in der Abstrommessstelle Süd-West um 1 K (Abb. 3.13 (c)). Im Vergleich mit der Anstrommessstelle ergeben sich Temperaturunterschiede von 2 K bzw. 2,5 K im selben Bereich, wie aus Abb. 3.14 (a und b) hervorgeht. Die Ergebnisse belegen die hohe Relevanz der Kenntnis des geologischen Schichtenaufbaus bzw. der

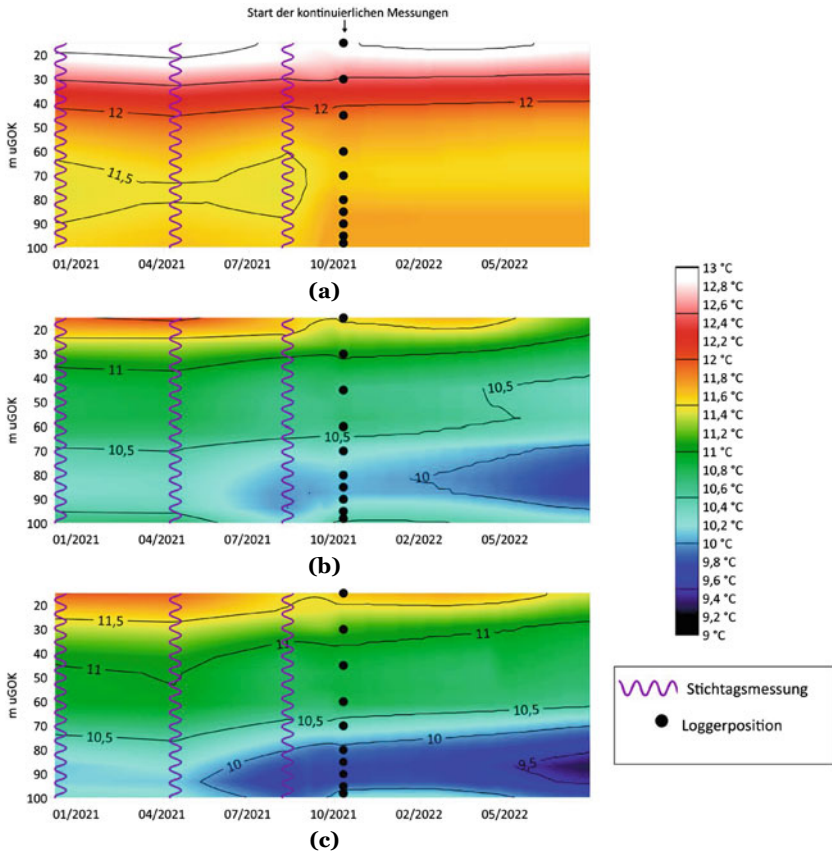


Abb. 3.13 Entwicklung der gemessenen Untergrundtemperaturen am Standort Berlin-Gesundbrunnen in der Anstrommessstelle (a), Abstrommessstelle Süd (b) und Abstrommessstelle Süd-West (c)

Hydrostratigrafie zur Erstellung und Umsetzung effizienter und maßgeschneiderter Monitoringkonzepte, u. a. durch die Identifizierung von Zielhorizonten für das Monitoring. Zudem zeigen insbesondere die Ergebnisse der Abstrommessstellen, dass mit Beginn der quasi-kontinuierlichen Messungen die Auswirkungen der geothermischen Nutzung sowohl zeitlich als auch quantitativ deutlich genauer bestimmt werden.

Die beschriebene quasi-kontinuierliche Erfassung der Temperaturdaten erfolgt parallel zu den Stichtagsmessungen und erlaubt so einen Methodenvergleich. Im April 2022 erfolgten vergleichende Messungen mit verschiedener Messtechnik, um sowohl deren Eignung als auch mögliche Beeinflussungen der Messergebnisse zu untersuchen. Dazu wurden Temperaturprofile in Form von Stichtagsmessungen mit folgenden Geräten aufgenommen:

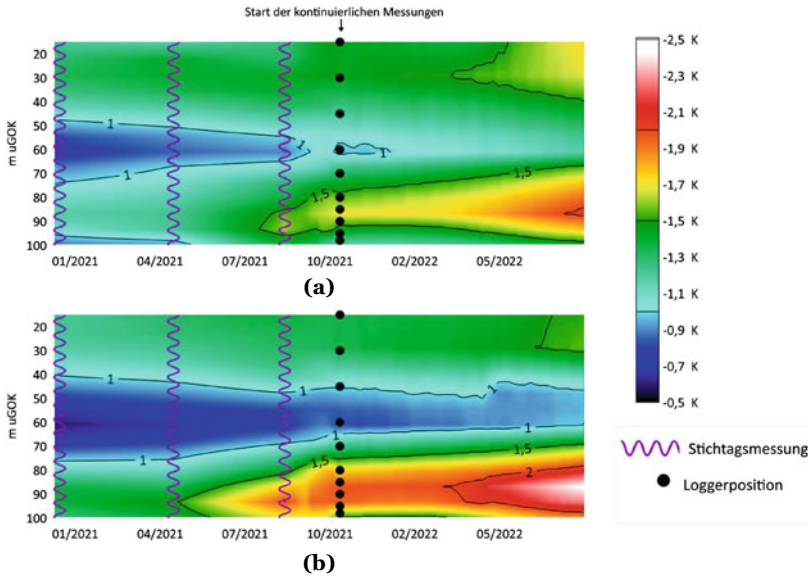


Abb. 3.14 Entwicklung der Temperaturdifferenzen zwischen An- und Abstrom am Standort Berlin-Gesundbrunnen: Anstrom-Abstrom Süd (a), Anstrom-Abstrom Süd-West (b)

- Kabellichtlot mit Temperaturfühler (nur einsetzbar in den oberen 50 m); Genauigkeit 0,1 K; Auflösung von 0,1 K,
- Messketten mit Temperaturdatenloggern des Typs HOBO TidbiT v2 UTBI-001 der Fa. Onset; Genauigkeit $\pm 0,21$ K, Auflösung 0,001 °C,
- MikroLog2-Logger; Genauigkeit $\pm 0,2$ K; Auflösung 0,001 K,
- Diver-Grundwasserdaten-Logger; Genauigkeit $\pm 0,1$ K; Auflösung 0,01 K.

Folgende Einflüsse wurden untersucht:

- Einfluss der Messtechnik auf gemessene Temperaturdaten,
- Störung der Temperaturschichtung innerhalb der Messstellen durch wiederholte Messungen,
- Auswirkungen von Umwelteinflüssen (z. B. Lufttemperatur).

Wie die Ergebnisse zeigen, ergaben sich bei den Stichtagsmessungen (Abb. 3.15 (a-c)) mit den unterschiedlichen Messgeräten keine relevanten Abweichungen voneinander. Somit sind alle getesteten Geräte prinzipiell für die Erfassung von Grundwassertemperaturprofilen geeignet, es bestehen jedoch individuelle Vor- und Nachteile der einzelnen Messgeräte.

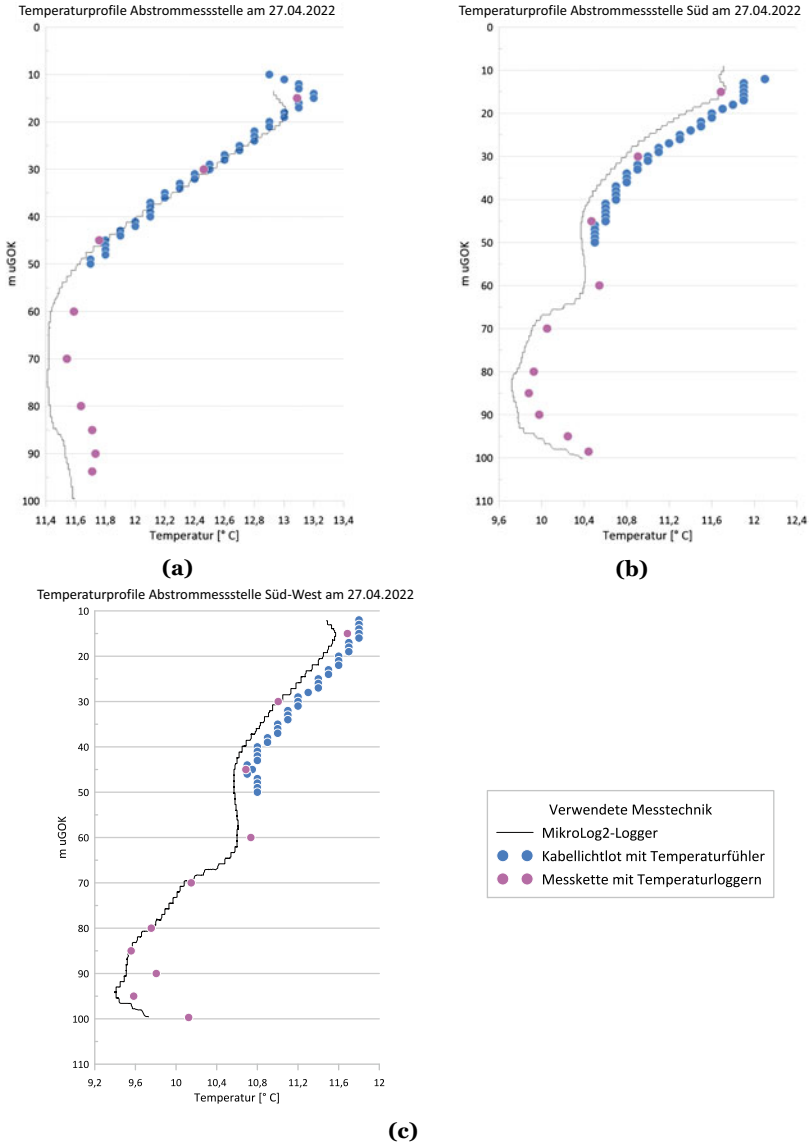
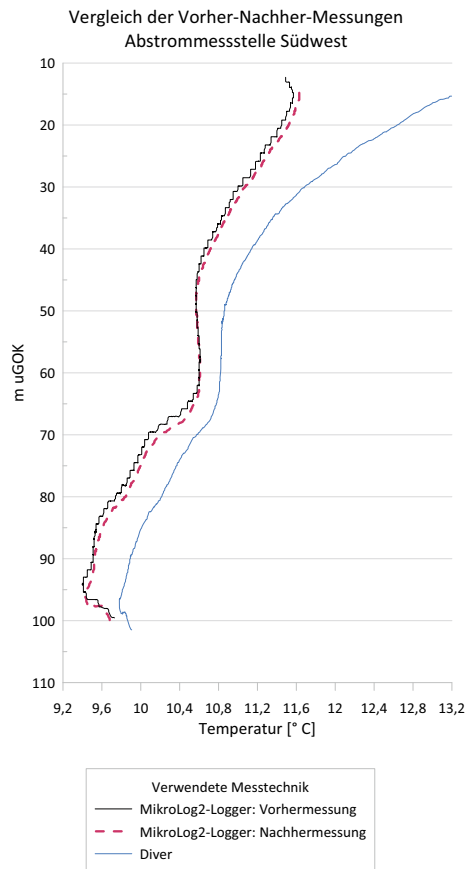


Abb. 3.15 Mit verschiedener Messtechnik aufgenommene Temperaturprofile in der Anstrommessstelle (a), Abstrommessstelle Süd (b) und der Abstrommessstelle Süd-West (c) am Stichtag 27.04.2022

An der südwestlichen Messstelle wurde eine weitere Vergleichsmessung durchgeführt. Dazu wurde zunächst die installierte Messkette ausgebaut und nach ca. einer Stunde ein weiteres Temperaturprofil mit zwei Loggern gleichzeitig aufgenommen (MikroLog2-Logger und Diver-Grundwasserdatenlogger). Der Vergleich dieser Messdaten (siehe Abb. 3.16) zeigt, dass die Temperaturschichtung innerhalb der Messstellen durch den Ausbau der Messketten und die wiederholten Messungen nicht gestört wurde, da die Temperaturprofile der Vorher- und Nachher-Messung mit dem MikroLog2-Logger keine signifikante Abweichung voneinander aufweisen. Der Vergleich mit dem durch den Diver-Grundwasserdatenlogger aufgenommenen Profil zeigt hingegen, dass die gemessenen Temperaturen hier höher liegen; besonders stark ist die Abweichung in den oberen 20 m des Profils. Aber auch in den weiteren Teilen des Temperaturprofils liegen die Abweichungen über dem angegebenen Genauigkeitsbereich der Messgeräte.

Abb. 3.16 Vergleich der Wiederholungsmessung mit der vorherigen Messung in Abstrommessstelle Süd-West



Ein wesentlicher Grund für die Abweichung, insbesondere im oberen Bereich des Profils, ist die bei der Verwendung des Diver-Loggers nicht erfolgte Anpassung des Loggers an die Untergrundtemperatur vor Beginn der Messung. Insgesamt zeigt sich die Relevanz der sachgemäßen Durchführung von Temperaturmessungen und der zuverlässigen Kalibrierung von Temperaturmessgeräten bei Einzelmessungen und insbesondere bei Wiederholungsmessungen.

Literatur

- Alexander MD, MacQuarrie KT (2005) The measurement of groundwater temperature in shallow piezometers and standpipes. *Can Geotech J* 42(5):1377–1390. <https://doi.org/10.1139/t05-061>
- Balke KD (1974) Der thermische Einfluss besiedelter Gebiete auf das Grundwasser, dargestellt am Beispiel der Stadt Köln. Heft, GFW-Wasser/Abwasser, p 3
- Berthold S, Börner F (2008) Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements. *Environ Geol* 54(7):1547–1566. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0936-y>
- Butler JJ (1998) The design, performance, and analysis of slug tests. Lewis, Boca Raton, Fla
- Carlsaw HS, Jaeger JC (1959) Conduction of heat in solids, 2nd edn. Clarendon Press, Oxford
- Deutscher Wetterdienst (2021) Historische monatliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Wind und Bewölkung) für Deutschland. DWD Climate Data Center (CDC) Version v22.3. https://opendata.dwd.de/climate_environment/ https://www.overleaf.com/project/5edad8424808ed000134bc2dt/CDC/observations_germany/climate/monthly/kl/historical/. Zugegriffen: 19. Apr. 2022
- Dietrich P, Leven C (2006) Direct Push–Technologies. In: Kirsch R (Hrsg) *Groundwater Geophysics*, Springer-Verlag, Berlin, S 321–340. https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6_11
- Diment WH (1967) Thermal regime of a large diameter borehole: instability of the water column and comparison of air-and water-filled conditions. *Geophysics* 32(4):720–726. <https://doi.org/10.1190/1.1439885>
- Knödel K, Krummel H, Lange G, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg) (2005) *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, 2. Aufl. Bd. 3 in *Geophysik*, Springer, Berlin
- LAWA (1988) *Grundwasser, Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. 2: Grundwassertemperatur*. Woeste-Druck & Verl, Essen
- Leven C, Weiß H, Vienken T et al (2011) Direct-Push-Technologien – Effiziente Untersuchungsmethoden für die Untergrunderkundung. *Grundwasser* 16(4):221–234. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0175-8>
- Loga T, Stein B, Diefenbach N, Born R, Institut Wohnen, Umwelt (Hrsg) (2015) *Deutsche Wohng Gebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA – “Typology approach for building stock energy assessment”, EPISCOPE – “Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks”, 2. Aufl.* IWU, Darmstadt
- McCall W, Christy TM (2020) The Hydraulic Profiling Tool for Hydrogeologic Investigation of Unconsolidated Formations. *Groundwater Monitoring & Remediation* 40(3):89–103. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12399>

- McCall W, Nielsen DM, Farrington SP et al (2005) Use of Direct-Push Technologies in Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring. In: Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring, 2. Aufl. CRC Press
- McCall W, Christy TM, Christopherson T et al (2009) Application of Direct Push Methods to Investigate Uranium Distribution in an Alluvial Aquifer. *Ground Water Monitoring & Remediation* 29(4):65–76. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2009.01258.x>
- Menberg K, Blum P, Schaffitel A et al (2013) Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island. *Environ Sci Technol* 47(17):9747–9755. <https://doi.org/10.1021/es401546u>
- Meng B, Vienken T, Kolditz O et al (2019) Evaluating the thermal impacts and sustainability of intensive shallow geothermal utilization on a neighborhood scale: Lessons learned from a case study. *Energy Convers Manag* 199(111):913. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111913>
- Prinz H, Strauß R (2018) *Ingenieurgeologie*, 6. Aufl. Springer Spektrum, Berlin
- 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):73. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6331-9>
- Vienken T, Kreck M, Dietrich P (2019) Monitoring the impact of intensive shallow geothermal energy use on groundwater temperatures in a residential neighborhood. *Geotherm Energy* 7(1):8. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0123-x>
- Zlotnik VA, McGuire VL (1998) Multi-level slug tests in highly permeable formations: 1. Modification of the Springer-Gelhar (SG) model. *J Hydrol* 204(1-4):271–282. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00128-5)

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Analyse von Untergrundkomponenten

4

Simon Richter, Katrin Lubashevsky, Jakob Randow,
Steve Henker, H. Konstanze Zschoke und Anke Bucher

Die Gegebenheiten im geologischen Untergrund und vor allem die dort vorhandenen Temperaturbedingungen sind die zentrale Ressource, der sich geothermische Anlagen bedienen. Die große Bedeutung, die den Informationen zu den Gegebenheiten im Untergrund im Planungsprozess solcher Anlagen zukommt, ist daher naheliegend. Eine möglichst genaue Kenntnis der Bedingungen ermöglicht eine bessere und effizientere Auslegung. Um die Kenntnis über Eigenschaften von Untergrundkomponenten und die Nutzung von Informationen aus dem Untergrund für Planungsprozesse zu verbessern, wurden in EASyQuart einige Untersuchungen durchgeführt. Während es im vorhergehenden Kap. 3 um die messtechnische Erhebung von Daten aus dem Untergrund geht, werden die Betrachtungen in diesem Kapitel im Wesentlichen auf Basis von numerischen Simulationen angestellt. Die Analysen zu Untergrundkomponenten umfassen hier drei Ansätze mit jeweils unterschiedlichen Motivationen,

S. Richter (✉) · K. Lubashevsky · J. Randow · A. Bucher
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: simon.richter@htwk-leipzig.de

K. Lubashevsky
E-mail: katrin.lubashevsky@htwk-leipzig.de

J. Randow
E-mail: jakob.randow@htwk-leipzig.de

A. Bucher
E-mail: anke.bucher@htwk-leipzig.de

S. Henker · H. K. Zschoke
geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland
E-mail: thiel@geoenergie-konzept.de

H. K. Zschoke
E-mail: zschoke@geoenergie-konzept.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_4

bei denen jedoch stets die Planung von Geothermieanlagen im Zentrum steht. Die in Abschn. 4.1 vorgestellten Sensitivitätsanalysen liefern grundsätzliche Informationen zur Relevanz der Parameter bezüglich des geologischen Untergrunds und den Spezifikationen der Erdwärmesonde (EWS) für die Planung von Anlagen im oberflächennahen Raum. Im Unterschied dazu geht es sowohl bei den numerischen Unsicherheitsanalysen in Abschn. 4.2 als auch bei den potenziellen Optimierungsstrategien in Abschn. 4.3 um Methodiken, deren Potenzial für konkrete Planungsprozesse betrachtet wird.

4.1 Sensitivitätsstudien

Für die Planung und Dimensionierung von EWS im oberflächennahen geologischen Raum ist eine möglichst genaue Kenntnis der Gegebenheiten am Standort notwendig. Die Performance der Geothermieanlage und ob geltende Regularien tatsächlich eingehalten werden, ist abhängig von dieser Dimensionierung. Informationen über den geologischen Untergrund sind im Vorfeld jedoch in der Regel nur wenig oder in unzureichender Detailliertheit vorhanden. Die Erhebung durch Erkundungsverfahren ist hingegen oftmals aufwendig und kann aus Kosten- und Zeitgründen am Standort nicht umfassend für alle Parameter erfolgen. Daher soll diese Sensitivitätsanalyse mit der Identifizierung der für die Performance einer EWS einflussreichsten Parameter eine Hilfestellung für den Planungsprozess bieten. Auf Parametern, welche einen großen Einfluss zeigen, sollte dementsprechend bei der Erkundung ein besonderes Augenmerk liegen. Außerdem bietet die Ermittlung der relevantesten Parameter die Grundlage für die in Abschn. 4.2 betrachteten Unsicherheitsanalysen. Die Ermittlung der Parametersensitivitäten folgt in dieser Untersuchung dem in Abschn. 4.1.1 vorgestellten Workflow, welcher die Anwendung verschiedener mathematischer Methoden beinhaltet und sich zur Reduzierung des Rechenaufwands maschinellen Lernens bedient. Die für die Analyse durchgeführten Berechnungen basieren im Wesentlichen auf numerischen Simulationen mit der Software OpenGeoSys (OGS), da diese bei entsprechender Modellierung eine realitätsnahe Simulation der Prozesse im Untergrund ermöglichen. Um eine möglichst große Allgemeingültigkeit der Ergebnisse für EWS im oberflächennahen Raum zu erreichen, wurden entsprechende Modellannahmen getroffen und Parameter definiert, welche in Abschn. 4.1.2 näher erläutert werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen werden in den Abschnitten 4.1.3 bis 4.1.4 vorgestellt sowie abschließend in 4.1.5 zusammengefasst und diskutiert.

4.1.1 Workflow und Methodik zur Ermittlung der Parametersensitivitäten

Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, ausgewählte Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf eine Zielgröße gegenüberzustellen. Prinzipiell werden hierfür Werte der zu betrachtenden Parameter innerhalb definierter Wertebereiche variiert. Die Para-

metersensitivität bzw. der Parametereinfluss wird anschließend aus den Ergebnissen im Zusammenhang mit der jeweiligen Konstellation von Parameterwerten (Parametersamples) ermittelt.

Die Durchführung der Analyse erfolgt hier unter Verwendung einer Python-Software, die eine automatisierte Erstellung, Berechnung und Auswertung von Parameterkonstellationen ermöglicht. Im Vergleich zur manuellen Durchführung bietet dies eine erhebliche Aufwandsersparnis. Die Basissoftware wurde von [Buchwald et al. \(2020\)](#) im Rahmen von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen zu Endlagerstätten für radioaktive Abfälle programmiert. Sie basiert auf einem Ansatz, der aus der Öl- und Gasindustrie als Experimental Design (DoE)-based History Matching bekannt ist ([Buchwald et al., 2020](#); [Eide et al., 1994](#)). Im Zentrum der Software steht die Verwendung numerischer Simulationen mit OGS. Dies wird vor allem durch das Open-Source Python-Application Programming Interface (API) `ogs6py` realisiert (siehe auch Anhang A.5). Für die Anwendung auf EWS wurden im Rahmen von EASyQuart einige Anpassungen und Erweiterungen in die Software eingepflegt. Ein wesentlicher Unterschied zu den Untersuchungen von [Buchwald et al. \(2020\)](#) ist, dass auch das Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) abhängig von den Parametersamples automatisiert erstellt wird. Der Grund hierfür ist u. a. der Dual-Kontinuum-Ansatz von OGS, bei dem die EWS physisch in Form eines Strangs von Linienelementen mit der Länge der EWS im FE-Modell repräsentiert wird. Für die Variation der Sondenlänge ist daher auch eine Veränderung des FE-Modells notwendig. Um den Aufwand des manuellen Erstellens und Anpassens von Modellen zu vermeiden, wurde daher das Vernetzungstool `bheEASyMesh`¹ entwickelt und in die Software eingearbeitet. Damit können auch einfache Variationen von Modellbereichen mit unterschiedlichen Materialparametern realisiert werden. Das Vernetzungstool basiert auf dem Open-Source 2D-Vernetzer *GMSH* ([Geuzaine und Remacle, 2009](#)) und den Prinzipien des *BHE-Setup-Tools*, welches von [Shao et al. \(2016\)](#) vorgestellt wird. Für die Vernetzung arbeitet die Software auf Basis eines Grundmodells, welches abhängig von den variablen Parametern für jedes Sample angepasst wird. Neben der Berechnung mit OGS besteht die Möglichkeit, Berechnungen mit analytischen Modellen durchzuführen. Für die Berechnung von EWS wurde hier eine erweiterte Variante der Methode von [Beier \(2014\)](#) zur Berechnung von Einfach-U-Sonden implementiert. Im Vergleich zur ursprünglichen Methode beinhaltet sie die Berechnung eines Bohrlochwiderstands nach der Multipole-Methode ersten Grades, welche von [Claesson und Bennet \(1987\)](#) erstmals beschrieben wurde. Dieser analytische Ansatz bietet im Vergleich zu OGS geringere Rechenzeiten, jedoch auch weniger detaillierte Modellierungsmöglichkeiten und weniger genaue Ergebnisse und wurde im Rahmen dieser Sensitivitätsstudien vor allem im Vorfeld zu Testzwecken verwendet. Durch Vorgabe von Parametern und zugehörigen Wertebereichen ist diese Software letztlich in der Lage, Matrizen von Parametersamples zu berechnen und entsprechend auszuwerten. Die Variation der Parameterwerte bzw. die Festlegung, welche Wertekonstellationen betrachtet werden, erfolgt in der Regel nach mathematischen

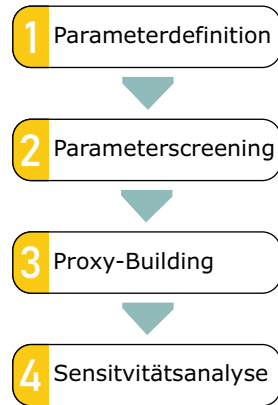
¹ <https://pypi.org/project/bheEASyMesh/>

Methoden, die teilweise auch Verfahren zur Auswertung der Parametersensitivitäten zugehörig sind. Für die Erstellung solcher Sampling-Designs und die Auswertung von Sensitivitätsgrößen bestehen in der Software verschiedene Möglichkeiten. Hierfür wird softwareintern auf die Bibliotheken PyDOE2² und SALib (Herman und Usher, 2017) zurückgegriffen. Für die Sensitivitätsanalyse werden hier lokale und globale Verfahren angewendet. Bei lokalen Sensitivitätsanalysen wird je Berechnung in der Regel nur ein Parameter variiert, während die anderen Parameter auf einem festen Wert bleiben. Interaktionen zwischen Parametern können dabei nicht erfasst werden. Bei globalen Verfahren hingegen werden der gesamte Parameterraum untersucht und auch mehrere Parameter gleichzeitig variiert, was die Erfassung von Interaktionen zwischen Parametern ermöglicht (Campolongo et al., 2011; Pianosi et al., 2016). Eine kurze Erläuterung der im Speziellen hier verwendeten Methoden erfolgt später in diesem Abschnitt. Je nach Anzahl der Parameterkonstellationen, die untersucht werden sollen, kann bei Verwendung von OGS-Simulationen schnell ein erheblicher Zeitaufwand für die Berechnung entstehen. Numerische Simulation bieten einerseits eine hohe Ergebnisgüte, sind jedoch andererseits mit einem großen Rechenaufwand verbunden. Für eine möglichst effiziente Untersuchung ist es daher möglich, durch maschinelles Lernen ein approximiertes Modell (Proxy-Modell) zu erstellen, um eine große Anzahl an Samples in kurzer Zeit zu erzeugen. Dies erfolgt hier mit dem Verfahren der Gauß-Prozess-Regression mithilfe der Bibliothek GPy (GPy, 2014). Dieses Verfahren ist aus der Geowissenschaft auch als Kriging bekannt (Buchwald et al., 2020). Zur Erstellung des Proxy-Modells wird eine Regression mit einer oder mehreren unabhängigen Variablen und einer abhängigen Variable (multiple Regression) durchgeführt. Die Regressionsfunktion ist dabei eine Funktion, die durch Addition mehrerer Gaußfunktionen erhalten wird (Gauß-Prozesse) (Matzka, 2021). Diese Regression wird auf Basis von sogenannten Trainingspunkten durchgeführt. In diesem Kontext wird auch vom Bedingen von Gauß-Prozessen an den Trainingspunkten gesprochen (Stone, 2011). Eine detaillierte Beschreibung der Gauß-Prozess-Regression ist beispielsweise in Lubashevsky (2022) zu finden. Nach Buchwald et al. (2020) bietet die Verwendung von Kriging Vorteile, da durch die genaue Widerspiegelung der Trainingspunkte die Gesamtqualität der Ergebnisse besser ist als bei vergleichbaren Verfahren. Das fertige Proxy-Modell ist in der Lage, mit den Eingangsvariablen, mit denen es zuvor trainiert wurde, innerhalb eines Bruchteils der Rechenzeit einer numerischen Simulation eine Vielzahl an Parametersamples zu verarbeiten und Ergebnisse zu erzeugen.

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse erfolgt nach dem in Abb. 4.1 dargestellten Workflow. Diesen Workflow haben auch Buchwald et al. (2020) in ähnlicher Form verfolgt (Eide et al., 1994). Am Anfang steht die Definition von Parametern. Dies beinhaltet eine Auswahl von Parametern, deren Einfluss untersucht werden soll und die Definition von Wertebereichen, innerhalb derer die Parameterwerte variiert werden. Nähere Erläuterungen zu den Parametern und Wertebereichen sind in Abschn. 4.1.2 zu finden. Ebenso ist es notwendig, eine Ergebnisgröße zu wählen, mittels

² <https://pypi.org/project/pyDOE2/>

Abb. 4.1 Workflow für die Sensitivitätsanalyse



derer die Sensitivität bemessen wird. Da hier der Einfluss auf die Performance der EWS von Interesse ist, wird dies anhand der mittleren Fluidtemperatur zwischen Vor- und Rücklauf des Sondenfluids untersucht. Um Sensitivitäten zu messen, muss die Temperaturkurve auf einen Wert reduziert werden. In Voruntersuchungen wurde die Temperatur zu unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet, mit dem Resultat, dass die Temperatur zum Ende des kompletten Jahresverlaufs T_{365} die größte Aussagekraft hat. Bezüglich der Auslegung von EWS haben Zeitpunkte, zu denen die Sonde nur eine geringe Last erfährt, kaum eine Relevanz. Ebenfalls interessant ist die Betrachtung der Temperatur zum Zeitpunkt der niedrigsten Fluidtemperatur im Jahresverlauf, welcher bereits im zweiten Monat der Simulation eintritt. Da sich gezeigt hat, dass bezüglich der Sensitivität kein wesentlicher Unterschied zwischen dem Zeitpunkt mit der niedrigsten Fluidtemperatur und dem letzten Zeitpunkt des Jahresverlaufs erkennbar ist, wird in den Ergebnisdarstellungen die Temperatur T_{365} zum Ende des Jahresverlaufs betrachtet. Andererseits wird als integrales Maß die Sensitivität der mittleren betragsmäßigen Temperaturänderung bezüglich eines Referenzexperimentes $\bar{\delta}_T$ für den Simulationszeitraum ausgewertet. Diese wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\bar{\delta}_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (T_i^{ref} - T_i^{sim})^2}, \quad (4.1)$$

mit:

- T_i^{ref} Temperaturwert zum Zeitschritt i aus dem Referenzexperiment,
- T_i^{sim} Temperaturwert zum Zeitschritt i aus der aktuellen Berechnung,
- n Gesamtanzahl der Zeitschritte einer Berechnung.

Das Referenzexperiment wurde in dieser Sensitivitätsanalyse in Form einer Berechnung in OGS durchgeführt. Diese Berechnung wurde mit den Parameterminimalwerten der Wertebereiche durchgeführt, um einen möglichst neutralen Referenzwert zu erzeugen.

Im zweiten Schritt werden Parameterscreenings durchgeführt, um wenig einflussreiche Parameter vorab zu identifizieren und auszuschließen. Dies dient vor allem dazu, bei den zeitintensiven numerischen Simulationen in OGS Rechenaufwand einzusparen. Hierfür gibt es sogenannte Screeningverfahren. Im Vergleich zu anderen Methoden der Sensitivitätsanalyse wird dort versucht, mit möglichst wenigen Parametersamples bereits einen Eindruck von den Parametereinflüssen zu erhalten (Campolongo et al., 2007). Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse wurden zwei Screeningverfahren eingesetzt, die unterschiedliche Herangehensweisen verfolgen. Das erste Verfahren ist die One-Variable-at-A-Time (OVAT)-Methode, welche hier, wie bei Buchwald et al. (2020), angewandt wurde. Dabei wird zunächst eine Berechnung durchgeführt, bei der die Parameter auf Referenzwerte gesetzt werden. Mit diesen Referenzwerten sind typische Werte bzw. Werte mit der größten Häufigkeit im Wertebereich gemeint. Ausgehend von dieser Referenzrechnung werden weitere Rechnungen durchgeführt, bei denen jeweils der Wert eines Parameters geändert wird. Dies wird für jeden Parameter einmal mit dem Maximal- und einmal mit dem Minimalwert des Wertebereiches durchgeführt. Als Ergebnis werden in diesem Verfahren die Änderungen der Ergebnisgröße im Vergleich zur Referenzbetrachtung gegenübergestellt. Neben der OVAT-Methode wurde die Morris-Methode für das Parameterscreening in der optimierten Form nach Ruano et al. (2012) angewandt. Im Vergleich zur OVAT-Methode werden hier mehr Konstellationen von Parameterwerten ausgewertet, sodass jeder Parameter mehrfach variiert wird. Zunächst werden hier die Wertebereiche gleichmäßig in eine vom Anwender festgelegte Anzahl von Stufen zerlegt. Wie bei der OVAT-Methode wird pro Auswertung nur ein Parameter geändert. Die Änderung der Zielgröße, die sich durch Änderung eines Parameterwertes um eine der festgelegten Stufen ergibt, wird als elementarer Effekt bezeichnet. Für jeden Parameter werden mehrere solcher elementaren Effekte an unterschiedlichen Stellen in dessen Wertebereich ermittelt bzw. je nach Anwendung auch mehrfach für jede der Stufen im Wertebereich. Ein weiterer Unterschied zur OVAT-Methode ist, dass bei der Ermittlung der unterschiedlichen elementaren Effekte eines Parameters die Werte der anderen Parameter ebenfalls variieren. Diese Vorgehensweise bietet ein differenzierteres Bild über die Parametereinflüsse und ermöglicht des Weiteren Rückschlüsse auf Interaktionen zwischen Parametern. Als Ergebnis wird für jeden Parameter der Mittelwert μ seiner elementaren Effekte betrachtet und deren Standardabweichung σ . Anstatt oder ergänzend zum Mittelwert μ kann der Mittelwert der Beträge der elementaren Effekte μ^* betrachtet werden. Anhand von Unterschieden zwischen μ und μ^* kann ein nicht-monotoner Zusammenhang zwischen dem Parameter und der Zielgröße erkannt werden. Je größer der Betrag von μ bzw. der Wert für μ^* eines Parameters ist, desto größer ist sein Einfluss auf die Zielgröße. Da die Morris-Methode in dieser Untersuchung im Wesentlichen zur Ermittlung eines Rankings der Parametereinflüsse genutzt wird, erfolgt die Betrachtung von μ^* . Ein großer Wert für σ deutet hingegen auf eine Interaktion des Parameters mit einem anderen oder auf einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem Parameter und der Ergebnisgröße hin (Campolongo et al., 2007; Morris, 1991; Ruano et al., 2012).

Für die eigentliche Sensitivitätsanalyse wird eine wesentlich größere Menge von Parametersamples ausgewertet. Da diese Anzahl nur unter einem sehr hohen Zeitauf-

wand mit numerischen Simulationen berechenbar ist, wird hier stattdessen ein Proxy-Modell verwendet. Die Erstellung eines Proxy-Modells erfolgt durch ein Training mit bekannten Ergebnissen zu Parameterkonstellationen (Schritt drei des Workflows Abb. 4.1). Die Trainingssamples werden daher zuvor mit OGS berechnet. Hierfür werden Parameterkonstellationen in Form eines Latin-Hypercube-Sampling (LHS) erstellt. Das Latin-Hypercube-Verfahren wurde von [Mckay et al. \(2000\)](#) entwickelt und bietet im Vergleich zu rein zufallsbasierten Monte-Carlo-Samplings den Vorteil, dass die Auswahl von Parameterwerten nur bedingt zufällig erfolgt. Deshalb wird auch von einem quasi-zufälligen Verfahren oder auch Quasi-Monte-Carlo-Verfahren gesprochen. Durch eine Zerlegung der Parameterwertebereiche in Teilbereiche, innerhalb derer dann zufällig Werte ausgewählt werden, wird hier eine gleichmäßigere Abdeckung des gesamten Wertebereiches sichergestellt und resultiert in einer geringeren Anzahl an benötigten Samples. Abschließend erfolgt im vierten Schritt des Workflows die eigentliche Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes (siehe [Sobol' \(2001\)](#)), wobei das Proxy-Modell zur Auswertung von Parameterkonstellationen genutzt wird. Die Methode der Sobol'-Indizes ist eine varianzbasierte Methode zur quantitativen globalen Sensitivitätsanalyse. Bei den varianzbasierten Methoden wird der Einfluss durch Veränderungen der Eingangsparameter auf die Varianz der Ergebnisgröße betrachtet. Solche Methoden bieten den Vorteil, dass neben der Einbeziehung des gesamten Wertebereichs der Parameter auch statistische Verteilungen berücksichtigt werden können. Die Anwendung von Verteilungsfunktionen ist besonders dann sinnvoll, wenn beispielsweise Extrem- oder Randwerte seltener auftreten und dies in die Analyse mit einbezogen werden soll. Außerdem bieten sie die Möglichkeit der Betrachtung von Interaktionseffekten zwischen mehreren Parametern. Bei den Sobol'-Indizes handelt es sich um reproduzierbare dimensionslose Kennzahlen zur Quantifizierung von Sensitivitäten. Sie repräsentieren den relativen Beitrag der sogenannten partiellen Varianz bezüglich eines oder mehrerer Parameter zur Gesamtvarianz der betrachteten Ergebnisgröße. Folglich liegen deren Werte immer zwischen null und eins. Die partiellen Varianzen können mittels der ANOVA-Zerlegung gewonnen werden, siehe beispielsweise [Saltelli et al. \(2008\)](#). Sei V_i die partielle Varianz bezüglich des i -ten Eingangsparameters und V Gesamtvarianz des Modells, dann ist der Sobol'-Index S_i des i -ten Parameters der Quotient aus beiden Varianzen:

$$S_i = \frac{V_i}{V} . \quad (4.2)$$

Sobol'-Indizes, die sich auf einzelne Parameter beziehen, werden als Indizes erster Ordnung bezeichnet. Daneben können auch Sobol'-Indizes höherer Ordnung betrachtet werden, um Interaktionseffekte zu quantifizieren. Sobol'-Indizes S_{ij} zweiter Ordnung beschreiben die Interaktion zweier Parameter und werden analog zu den Indizes erster Ordnung berechnet:

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V} . \quad (4.3)$$

Zur Berechnung der Sobol'-Indizes schlagen [Saltelli et al. \(2008\)](#) Monte-Carlo-basierte Methoden vor. Dafür müssen Stichproben in Form von Parametersamples generiert werden, welche die festgelegten Verteilungen der einzelnen Parameter

möglichst gut widerspiegeln. [Dick et al. \(2013\)](#) beschreiben typische Beispiele für Punktfolgen, welche für die Erstellung solcher Stichproben verwendet werden können, u. a. die sogenannten Sobol'-Folgen, welche hier genutzt werden. Diese haben die Eigenschaft, dass sie mithilfe einer Skalierung beliebige Verteilungen der Parameterwertebereiche repräsentieren können und eine gute Abdeckung bei einer vergleichsweise geringen Anzahl von Punkten bieten. Bei Sobol'-Folgen handelt es sich ebenfalls um ein Quasi-Monte-Carlo-Verfahren, das den Zufall nur imitiert. Mehr Details zu den Eigenschaften solcher Folgen und zu deren Konstruktionsvorschriften können in [Dick et al. \(2013\)](#) nachgelesen werden.

4.1.2 Parameter- und Modelldefinitionen für die Sensitivitätsanalyse

Die Grundlage der Sensitivitätsstudien stellt die Auswahl der zu untersuchenden Parameter und die Definition ihrer Wertebereiche dar. Da die Untersuchung auf Basis von numerischen Simulationen in OGS stattfindet, ist die Modellierung eines geeigneten FE-Modells zur Auswertung von Parametersamples ebenso ein wichtiger Bestandteil der Vorbereitung und eng verwoben mit der Parameterdefinition. Letztlich bestimmen die Vorbereitung von Parameterwertebereichen und die getroffenen Modellannahmen über die Qualität und die Gültigkeit der Ergebnisse. Falsch oder ungenau definierte Wertebereiche können beispielsweise zu Über- oder Unterbewertungen von Parametereinflüssen in der Gegenüberstellung führen. In diesem Abschnitt werden das Simulationsmodell sowie die Parameter und deren Wertebereiche, welche dieser Sensitivitätsanalyse zugrunde liegen, vorgestellt.

Das Modell besteht aus einer EWS und dem umliegenden geologischen Untergrund. Da es sich bei der Doppel-U-Sonde um den meist verwendeten Sondentyp in Deutschland handelt, wurde dieser in der Sensitivitätsanalyse betrachtet. Um grundlegende Einflüsse der Parameter zu erfassen, wurde im Modell ein vereinfachter homogener geologischer Aufbau verwendet. Mit Ausnahme eines vom Grundwasser durchströmten Bereichs haben alle geologischen Parameter im Modellbereich einen konstanten Wert. Die Auslegung von EWS wird neben geologischen Parametern auch durch eine Reihe anderer Parameter beeinflusst. Da die Sensitivitätsanalyse mit OGS durchgeführt wird, beschränkt sich der Rahmen der für die Untersuchung infrage kommenden Parameter auf die Eingangsparameter der Software bzw. die Möglichkeiten der Modellierung. Auf Grundlage von Erfahrungen der am Projekt beteiligten Fachleute wurden davon bereits erste Parameter ausgeschlossen. Die ausgewählten Parameter sind in [Tab. 4.1](#) aufgeführt.

Im Anschluss an die Auswahl der Parameter wurden Wertebereiche für diese definiert, welche die in Deutschland auftretenden Werte repräsentieren. Im Rahmen des Parametersamplings nach den in [Abschn. 4.1.1](#) vorgestellten Methoden kann je nach Methode jeder Wert innerhalb dieser Wertebereiche für die Berechnung vorgegeben werden. Für die Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes werden den Wertebereichen außerdem statistische Verteilungen zugeordnet. Diese sorgen beispielsweise dafür, dass wenig vorkommende Extremwerte der Wertebereiche auch

Tab. 4.1 Vorauswahl der Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse

Parameter	Symbol
<i>Abmessungen</i>	
Sondenlänge	L_{BHE}
Bohrlochdurchmesser	d_{BHE}
Rohrdurchmesser (außen)	d_{po}
<i>Rohrmaterial</i>	
Wärmeleitfähigkeit	λ_p
<i>Kältemittel</i>	
Dichte	ρ_{rf}
Spezifische Wärmekapazität	c_{rf}
Wärmeleitfähigkeit	λ_{rf}
Dynamische Viskosität	μ_{rf}
<i>Hinterfüllmaterial</i>	
Wärmeleitfähigkeit	λ_{gr}
Spezifische volumetrische Wärmekapazität	c_{vgr}
<i>Geologischer Untergrund</i>	
Effektive Porosität	n_{peff}
Wärmeleitfähigkeit	λ_s
Spezifische volumetrische Wärmekapazität	c_{vs}
Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches	t_{aqf}
Tiefe des vom Grundwasser durchströmten Bereiches*	z_{aqf}
<i>Anfangs- und Randbedingungen</i>	
Durchflussrate des Kältemittels	\dot{V}_{rf}
Jahreswärmeenergiebedarf	Q
Darcy-Geschwindigkeit	v_f
Geothermischer Gradient	ΔT_{geo}
Variation der Modelltemperatur**	T_{geo}

* Tiefe gemessen von der Geländeoberkante (GOK) bis zur Oberkante des vom Grundwasser durchströmten Bereiches.

** Parameter bezieht sich auf die in Abb. 4.4 dargestellte Kurve.

in der Sensitivitätsanalyse weniger stark repräsentiert sind und so die Parameterinflüsse nicht verfälschen. Zur Ermittlung der Wertebereiche wurden verschiedene Quellen herangezogen. Schwieriger stellte sich die Ermittlung von Verteilungen dar. Wertebereiche mit zugehöriger Verteilung für die Sondenlänge und die Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes konnten einer Datensammlung von mehr als 600 Thermal-Response-Test (TRT) entnommen werden. Die Datensammlung wurde von der Firma geoENERGIE Konzept GmbH für den Zweck dieser Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die darin enthaltenen Ergebnisse stammen aus Messungen

in ganz Deutschland. Für alle weiteren Wertebereiche konnten Verteilungen nur angenommen werden. Die Verteilungen werden im Laufe dieses Abschnitts in Tab. 4.2 vorgestellt.

Wertebereiche für den Rohrdurchmesser d_{po} und die Wandstärke t_p der Sondenrohre wurden auf Basis von Herstellerangaben definiert. Dort zeigt sich, dass Rohrdurchmesser in der Regel immer mit einer festen Wandstärke erhältlich sind. Daher wurde die Wandstärke nicht als separater Parameter betrachtet, sondern als abhängiger Parameter des Rohrdurchmessers definiert. Bei Rohrdurchmessern von 32 mm liegt die Wandstärke in der Regel bei 2,9 mm und bei Rohrdurchmessern von 40 mm bei 3,7 mm. Um die mit dem Rohrdurchmesser steigende Wandstärke zu berücksichtigen, wurde für die Sensitivitätsanalyse folgende Beziehung festgelegt:

$$t_p = \frac{1}{10} \cdot d_{po} - \frac{3}{10000} \text{ m}. \quad (4.4)$$

Ergebnisse für die Sensitivität des Parameters Rohrdurchmesser beziehen sich daher auf die gleichzeitige Änderung von Rohrdurchmesser und -wandstärke. Für die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials der Sonden konnten ebenfalls Werte aus Herstellerangaben entnommen werden. Für die spezifische volumetrische Wärmekapazität wurden vom durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Forschungsprojekt OPTIMOG³ Werte zur Verfügung gestellt. Als Kältemittel in den EWS kommt für gewöhnlich Wasser mit einem Frostschutzzusatz, meist Ethylenglykol, zum Einsatz (Stober und Bucher, 2014). Die Grenzen der Wertebereiche für die Parameter des Kältemittels wurden entsprechend der gängigen Kältemittel und für isotherme Bedingungen und den Werten für reines Wasser bei 4 °C gewählt (Rosinski und Zapp (2007) nach Stober und Bucher (2014); Kretzschmar et al. (2011)). Durch die Wertebereiche der Parameter d_{po} , \dot{V}_{rf} und μ_{rf} ist die Strömung im Sondenrohr nicht immer turbulent, sondern kann auch im laminaren Bereich liegen. Der Wertebereich für die Durchflussrate des Kältemittels \dot{V}_{rf} wurde anhand von Herstellerangaben für Wärmepumpen mit einem Leistungsbereich für Einfamilienhäuser ausgewählt.

Die thermische Last wird als Jahresbedarf an Wärmeenergie berücksichtigt. Dieser Energiebedarf orientiert sich ebenfalls an Werten für Einfamilienhäuser. Als Grundlage für die Ermittlung des Wertebereiches dienen hier Erfahrungswerte aus der Praxis der Firma geoENERGIE Konzept GmbH. Auf Basis dieser Erfahrungswerte wurde eine Heizlast von 6 kW bis 12 kW bei Volllast angenommen. Für die Berechnung mit OGS wird die Verdampferleistung als thermische Last verwendet, welche dem mit Geothermie gewonnenen Teil entspricht. Mittels der Leistungszahl der Wärmepumpe COP kann aus der Heizlast \dot{Q}_{WPV} die Wärmepumpenverdampferleistung bei Volllast \dot{Q}_{VV} berechnet werden (VDI 4640, 2020):

$$\dot{Q}_{VV} = \dot{Q}_{WPV} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right). \quad (4.5)$$

³ OPTIMOG – Entwicklung von Verfahren zur Optimierung der Hinterfüll- und Sondenmaterialien für die oberflächennahe Geothermie

Für den gesamten Wertebereich wurde ein COP -Wert von $COP = 4,5$ angenommen. Nach [VDI 4640 \(2020\)](#) wurde ein Wertebereich von 1200h bis 2400h Jahresvolllaststunden angenommen. Der Wertebereich entspricht demnach einem Wärmeenergieverbrauch \dot{Q}_{WPV} von 7,2MWh bis 28,8MWh pro Jahr. Der Jahresbedarf an Wärmeenergie, welcher hierfür mittels Geothermie Q_{geo} dem Untergrund entzogen wird, kann mit Gl. (4.5) bestimmt werden:

$$Q_{geo} = Q_{WP} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right). \quad (4.6)$$

Um den über das Jahr schwankenden Bedarf an Wärmeenergie zu berücksichtigen, wird die thermische Last in der Simulation in Form einer Kurve definiert, die den Jahreszyklus repräsentiert. Dieser Jahreszyklus wurde anhand von Gradtagszahlen (GTZ) erstellt, welche vom [Institut Wohnen und Umwelt GmbH \(2021\)](#) (IWU) für verschiedene Orte veröffentlicht werden. Dabei handelt es sich um ein Maß zur Ermittlung des Heizbedarfs. Die Gradtagszahl eines Monats ist die Summe der Differenz zwischen dem Tagesmittel der Außentemperatur T_{am} und der Innentemperatur T_i für alle N Tage, an denen die Heizgrenztemperatur unterschritten wird:

$$GTZ = \sum_{i=0}^N (T_i - T_{am}). \quad (4.7)$$

Das IWU bezieht zur Berechnung der Gradtagszahlen die Tagesmitteltemperaturen von Deutscher Wetterdienst (DWD) ([Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2021](#)). Die hier verwendeten Gradtagszahlen beziehen sich auf eine Innentemperatur von $T_i = 20^\circ\text{C}$ und eine Heizgrenztemperatur von $T_{Gr} = 12^\circ\text{C}$. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wurden die Gradtagszahlen für die sechs in [Abb. 4.2](#) dargestellten Standorte in Deutschland gemittelt. Anhand der gemittelten Gradtagszahlen wurde der prozentuale monatliche Wärmeenergiebedarf $\delta_Q(\text{Monat})$ berechnet. Mittels der prozentualen Werte kann aus dem Jahresbedarf an Wärmeenergie aus Geothermie der monatliche Energiebedarf bestimmt werden. Aus der Dauer des jeweiligen Monats $\Delta t(\text{Monat})$ und dem monatlichen Energiebedarf lässt sich anschließend die benötigte Verdampferleistung des jeweiligen Monats $\dot{Q}_V(\text{Monat})$ bestimmen:

$$\dot{Q}_V(\text{Monat}) = \frac{\delta_Q(\text{Monat}) \cdot Q_{geo}}{\Delta t(\text{Monat})}. \quad (4.8)$$

In der Simulation wird eine monatlich konstante Entzugsleistung angewendet. Die Änderung von einem Monat zum nächsten erfolgt jedoch kontinuierlich über einen Zeitraum von drei Tagen. [Abb. 4.3](#) zeigt die Kurven der Entzugs-/Verdampferleistung für die Grenzen des Wertebereiches und den Referenzwert.

Die Temperaturbedingungen im Modell werden durch den geothermischen Gradienten ΔT_{geo} und den Parameter T_{geo} , welcher unterschiedliche klimatische Bedingungen berücksichtigt, definiert. Im Modell werden die Temperaturbedingungen durch eine Oberflächentemperatur und eine Untergrundtemperatur eingebracht. Die Oberflächentemperatur wird als zeitabhängige Randbedingung in den Finite-Elemente-Methode (FEM)-Simulationen verwendet. Hierfür wurde der in [Abb. 4.4](#)

Abb. 4.2 Referenzstandorte für Klimabedingungen bei der Auswahl von Wertebereichen für die Sensitivitätsanalyse

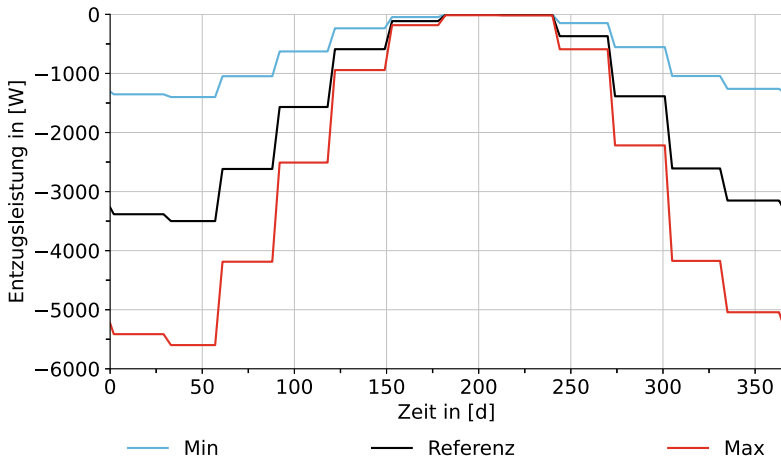
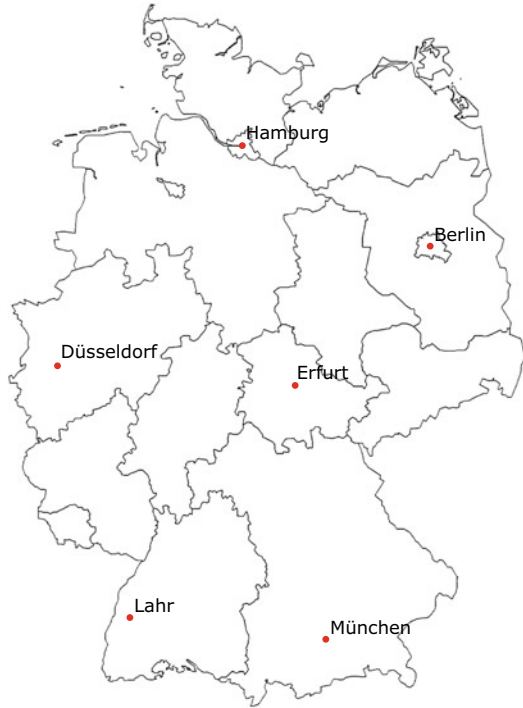


Abb. 4.3 Jahresverlauf und Wertebereich der Entzugsleistung (Verdampferleistung) in der Sensitivitätsanalyse

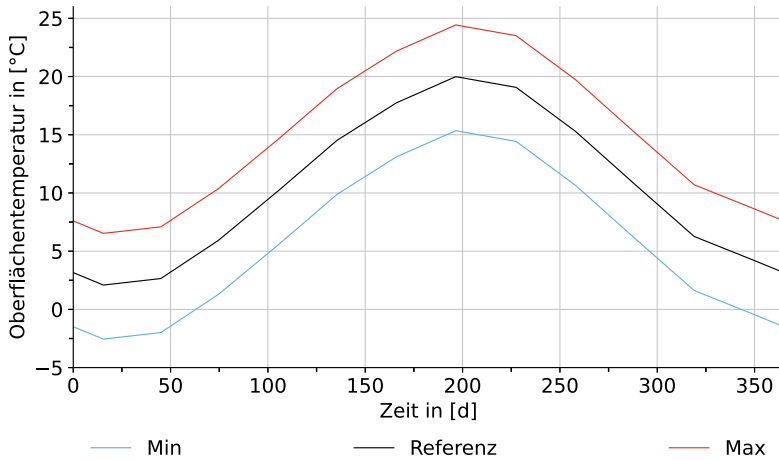
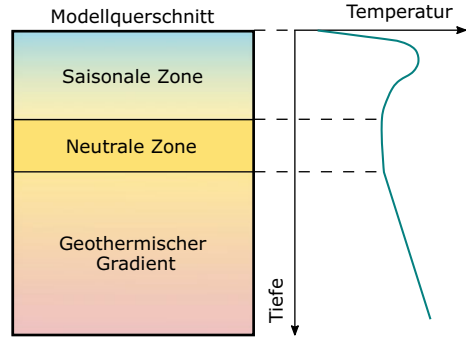


Abb. 4.4 Jahresverlauf und Wertebereich der Oberflächentemperatur

dargestellte Jahreszyklus genutzt. Die Referenzkurve wurde auf Basis von Monatsmitteltemperaturen des DWD gebildet, welche aus Tagesmitteltemperaturen bestimmt wurden. Dabei wurden die Temperaturdaten für die in Abb. 4.2 dargestellten Standorte und für die Jahre 2014 bis 2018 gemittelt. Zur Variation der Oberflächentemperatur im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird die Referenzkurve um den Parameter T_{geo} angehoben oder abgesenkt. Der Wertebereich für T_{geo} wurde ebenfalls auf Basis von Wetterdaten festgelegt. Die Untergrenze des Wertebereiches ist die Differenz zwischen den Jahresmittelwerten der Tagesmitteltemperaturen und der Tagesminimaltemperaturen für die Jahre 2014 bis 2018 für die bereits genannten Standorte. Die Obergrenze bestimmt sich entsprechend aus der Differenz der Mittelwerte aus den Tagesmitteltemperaturen und den Tagesmaximaltemperaturen (DWD Climate Center (CDC), 2018). Die Untergrundtemperatur im FE-Modell wird zu Beginn der Simulation durch eine Anfangsbedingung initial definiert. Ausgehend davon werden Temperaturänderungen im Verlauf der Simulation berechnet. Das tiefenabhängige Temperaturprofil für diese Anfangsbedingung entspricht der Form in Abb. 4.5. Nach Erfahrungen aus der Praxis können die Lage und Existenz der neutralen Zone stark variieren. Laut einer Veröffentlichung vom Verband Beratender Ingenieure VBI (2012) liegt die neutrale Zone in Deutschland gewöhnlich zwischen 15 m und 30 m unter der Geländeoberkante (GOK). Diese Werte wurden im Simulationsmodell umgesetzt. Unterhalb der neutralen Zone wird die Temperatur ausgehend von der Temperatur in der neutralen Zone über den geothermischen Gradienten ΔT_{geo} definiert. Der Temperaturverlauf in der saisonalen Zone wurde simulativ ermittelt. Hierfür wurde ein Modell ohne EWS mit einer homogenen Geologie erstellt, die den Referenzwerten der in Tab. 4.2 definierten Wertebereiche für die Parameter entspricht. Im Modell wurde die Randbedingung für die Oberflächentemperatur wie beschrieben angewandt. Für das Temperaturprofil wurde im Vergleich zur Abb. 4.5 zu Beginn der Simulation vereinfacht ein linearer Verlauf zwischen Oberflächentem-

Abb. 4.5 Schematische Darstellung einer Temperaturanfangsbedingung zum Jahresbeginn im FE-Modell mit saisonaler Zone, neutraler Zone und geothermischem Gradienten



peratur und neutraler Zone als Anfangsbedingung vorgegeben. Mit diesem Modell wurde in OGS 100 Jahre konduktiver Wärmetransport simuliert. Im 100. Jahr ergaben sich in dieser Simulation die in Abb. 4.6 dargestellten Temperaturverläufe mit einer saisonalen Zone, die sich aufgrund des Wärmetransports ausgebildet hat. Zur Definition der saisonalen Zone in der Anfangsbedingung des Modells für die Sensitivitätsanalyse wurde der Teil des Temperaturprofils am 1. Januar des 100. Jahres der Simulation („Start“ in Abb. 4.6) als Anfangsbedingung für den Bereich zwischen 0 m und 15 m unter der GOK verwendet. Zusammen mit den zuvor genannten Bedingungen für die Temperatur in der neutralen Zone und darunter ergibt sich das in Abb. 4.7 dargestellte Temperaturprofil (schwarze Kurve). Dieses Temperaturprofil wird analog zur Oberflächentemperatur durch den Parameter T_{geo} parallel verschoben, wie in Abb. 4.7 durch die rote und blaue Kurve dargestellt. Die Temperatur in der neutralen Zone des Temperaturprofils entspricht im Modell dem Jahresmittelwert der Oberflächentemperatur. Für die Referenzkurve der Oberflächentemperatur beträgt sie $10,73\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Wie eingangs erwähnt, gibt es im Modell je nach Parameterkonstellation eine Grundwasserströmung. Diese durchströmt das Modell in horizontaler Richtung. Der Einfluss der Strömung wurde durch drei Parameter untersucht. Zwei dieser Parameter charakterisieren die Lage der vom Grundwasser durchströmten Schicht im Modell. Diese sind in Abb. 4.8 schematisch dargestellt. Die Tiefe von GOK bis zur Oberkante des vom Grundwasser durchströmten Bereiches wird durch den Parameter z_{aqf} beschrieben. Der Parameter t_{aqf} beschreibt die vertikale Ausdehnung (Mächtigkeit) der vom Grundwasser durchströmten Schicht. Die Parameter z_{aqf} und t_{aqf} werden unabhängig voneinander variiert. Aus simulationstechnischen Gründen kann die Grundwasserströmung erst unterhalb der saisonalen Zone des Temperaturprofils beginnen, um diese nicht zu stören. Der Wertebereich für z_{aqf} ist daher so definiert, dass die minimale Tiefe 15 m unter der GOK ist und die maximale der aktuellen Sondenlänge entspricht. Für t_{aqf} beginnt der Wertebereich bei 0 m und erreicht maximal die aktuelle Sondenlänge reduziert um 15 m. Da im Rahmen des Parametersamplings immer mehrere Parameter gleichzeitig variiert werden, ändert sich, parallel zur Lage und Dimension des vom Grundwasser durchströmten Bereiches, auch die Sondenlänge. Interessant sind für die Untersuchung jedoch vor allem Strömungen im Bereich

Tab. 4.2 Wertebereiche und statistische Verteilung der Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse inklusive Referenzwerte, welche die Werte mit der größten Häufigkeit in der zugeordneten Verteilung kennzeichnen

Parameter	Einheit	Wertebereich			Verteilung
		Min	Referenz	Max	
<i>Abmessungen</i>					
L_{BHE}	m	70	100	150	Normal
d_{BHE}	m	0,12	0,152	0,2	Normal
d_{po}	m	0,025	0,032	0,04	Normal
<i>Rohrmaterial</i>					
λ_p	$W m^{-1} K^{-1}$	0,4	0,4	2	Normal
<i>Kältemittel</i>					
ρ_{rf}	$kg m^{-3}$	960	1052	1195	Normal
c_{rf}	$J kg^{-1} K^{-1}$	3050	3795	4250	Normal
λ_{rf}	$W m^{-1} K^{-1}$	0,44	0,48	0,57	Normal
μ_{rf}	$kg m^{-1} s^{-1}$	0,0016	0,0052	0,0108	Normal
<i>Hinterfüllmaterial</i>					
λ_{gr}	$W m^{-1} K^{-1}$	0,6	2	4	Normal
c_{vgr}	$kJ m^{-3} K^{-1}$	1610	1910	2210	Normal
<i>Geologischer Untergrund</i>					
n_{peff}	–	0	0,125	0,25	Gleich
λ_s	$W m^{-1} K^{-1}$	1	2,5	5	Normal
c_{vs}	$kJ m^{-3} K^{-1}$	500	1700	3800	Normal
t_{aqf}	–*	0	0,25	1	Gleich
z_{aqf}	–*	0	0,25	1	Gleich
<i>Anfangs- und Randbedingungen</i>					
\dot{V}_{rf}	$m^3 s^{-1}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	Gleich
Q	MWh	7,2	18	28,8	Normal
v_f	$m s^{-1}$	0	$4,75 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$	Normal
ΔT_{geo}	$K m^{-1}$	0	0,032	0,045	Normal
T_{geo}^{**}	K	-4,64	0	4,44	Normal

* Relativer Wert bezogen auf die um 15 m reduzierte Länge der EWS L_{BHE}^* .

** Parameter bezieht sich auf die Änderung der in Abb. 4.4 dargestellten Kurve.

der Sonde, weshalb die Parameter auf die um 15 m reduzierte Sondenlänge L_{BHE}^* bezogen werden. Da die Parameter unabhängig voneinander untersucht werden sollen, sind Parameterkonstellationen, bei denen ein Teil des vom Grundwasser durchströmten Bereiches unterhalb der Sonde liegt, modellbedingt nicht auszuschließen. Exemplarisch wird dies in Abb. 4.8 ersichtlich. Eine Betrachtung der Abhängigkeit zwischen den beiden Parametern erfolgt daher im Rahmen des Parameterscreenings in Abschn. 4.1.3. Der dritte Parameter ist die Darcy-Geschwindigkeit v_f nach dem Darcy-Gesetz, welche als flächenbezogener Durchfluss ein Maß für die Strömungs-

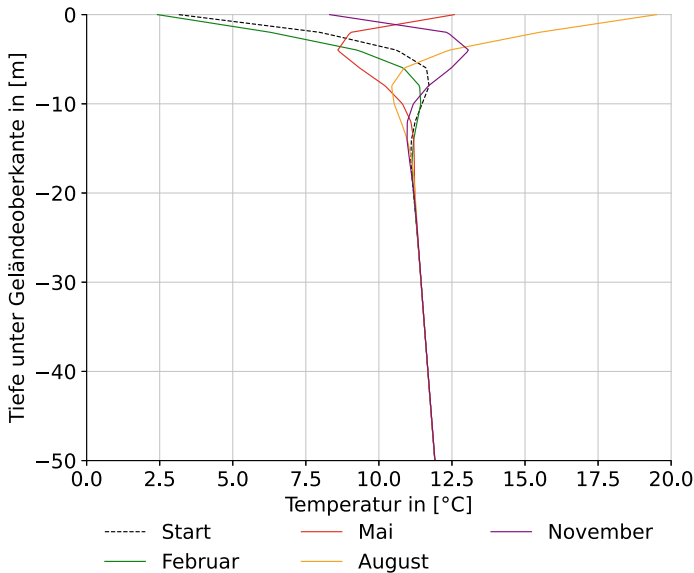


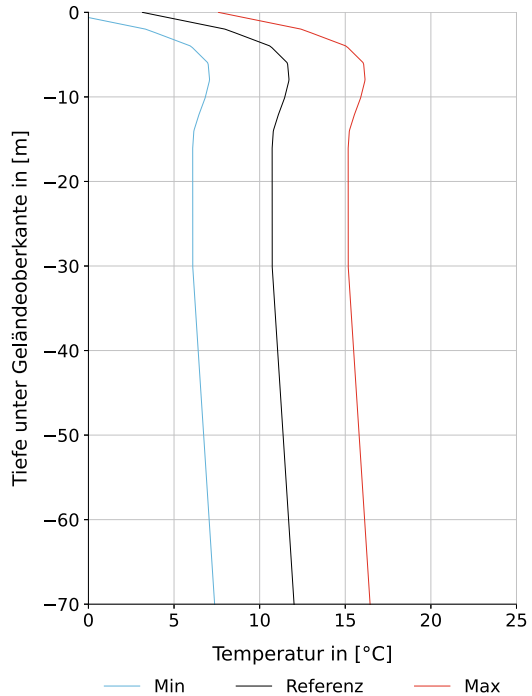
Abb. 4.6 Temperaturprofil im Jahresverlauf nach 100 Jahren Simulation

geschwindigkeit des Grundwassers im porösen Medium ist. Sie ist außerdem unter dem Begriff Filtergeschwindigkeit bekannt und berechnet sich aus dem Produkt von Durchlässigkeitsbeiwert k_f und dem Grundwassergradienten i (Hölting und Colde-
wey, 2013):

$$v_f = k_f \cdot i . \quad (4.9)$$

Für die Sensitivitätsanalyse wurde für den Grundwassergradienten ein Wertebereich von $i = 0 \frac{\text{m}}{\text{m}}$ bis $i = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{m}}$ angenommen in Anlehnung an eine Untersuchung von Casasso und Sethi (2014), die ebenfalls Parameterstudien zu EWS durchführten. Der Wertebereich für die Darcy-Geschwindigkeit wurde mittels Durchlässigkeitsbeiwerten nach Hölting und Colde-
wey (2013) ermittelt. Ein weiterer Parameter, der in Simulationen herangezogen wird, um den Stofftransport im Grundwasserleiter zu beschreiben, ist die Dispersion. Sie wird in OGS durch eine longitudinale Dispersivität α_L und eine transversale Dispersivität α_T definiert. Die Dispersion fasst Vermischungen auf Basis verschiedener Prozesse wie z. B. Diffusion und Heterogenität des Grundwasserleiters zusammen. Daher kann sie nicht auf einen einzelnen physikalischen Zusammenhang zurückgeführt werden. Trotz jahrelanger Forschung zu dem Thema herrschen in der Literatur unterschiedliche Meinungen zur Behandlung des Parameters (Gillbricht und Radmann, 2017). Um einen Eindruck vom Einfluss des Parameters in der Simulation zu bekommen, wurde dieser im Rahmen eines Benchmarks untersucht. Die Ergebnisse hierzu sind im Abschn. 6.3 zu finden. Im Benchmark zeigte sich, dass unter den dort angenommenen Bedingungen eine Änderung um $\Delta\alpha_L = 5 \text{ m}$ einen Einfluss von mehreren Kelvin auf die Rücklauf-
temperatur einer EWS nach einem Jahr Simulationszeit zeigt. Angemessene Werte für

Abb. 4.7 Wertebereich des Temperaturprofils für die Anfangsbedingung der Untergrundtemperatur der Simulationsmodelle in der Sensitivitätsanalyse



die Dispersivitäten können jedoch nach [Gillbricht und Radmann \(2017\)](#) nur auf Basis von bekannten Werten eines ähnlich aufgebauten Grundwasserleiters angesetzt werden. Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Definition von Werten wurde der Einfluss der Dispersion für diese Untersuchung nicht betrachtet und die Dispersivitäten konstant gehalten. Da in numerischen Simulationen bei kleinen Werten für die Dispersivitätsparameter der physikalischen Dispersion Stabilitätsprobleme aufgrund numerischer Dispersion auftreten können, wurden die Parameter α_L und α_T nicht gleich null gesetzt und Werte auf Basis der häufig angenommenen Beziehung

$$\alpha_T = 0,1 \cdot \alpha_L, \tag{4.10}$$

mit $\alpha_L = 5$ m und $\alpha_T = 0,5$ m festgelegt ([Gillbricht und Radmann, 2017](#); [Himmel und Schäfer, 2010](#)).

Alle weiteren Wertebereiche wurden mithilfe von Literatur bestimmt ([Höltling und Coldewey, 2013](#); [Sanner et al., 2005](#); [Stober und Bucher, 2014](#); [VDI 4640, 2020](#)). Eine Gesamtübersicht der Wertebereiche findet sich in Tab. 4.2. Dort werden neben den Grenzen der Wertebereiche auch Referenzwerte angegeben. Dabei handelt es sich einerseits um die Referenzwerte, welche die Basis für das unter Abschn. 4.1.1 vorgestellte OVAT-Verfahren bilden. Andererseits stellen diese für die festgelegten Verteilungsfunktionen den Wert mit der größten Häufigkeit dar.

Wie in Abschn. 4.1.1 bereits erwähnt, basieren die FE-Modelle auf einem Grundmodell. Alle Modelle haben einen quaderförmigen Aufbau mit einer größeren Ausprägung der Grundfläche in Richtung der Grundwasserströmung. Das Untergrund-

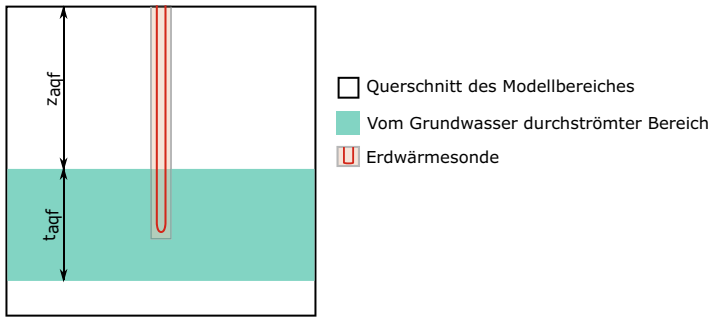


Abb. 4.8 Schematische Darstellung der Lage- und Dimensionsparameter für den vom Grundwasser durchströmten Bereich an einem vertikalen Schnitt durch das Simulationsmodell

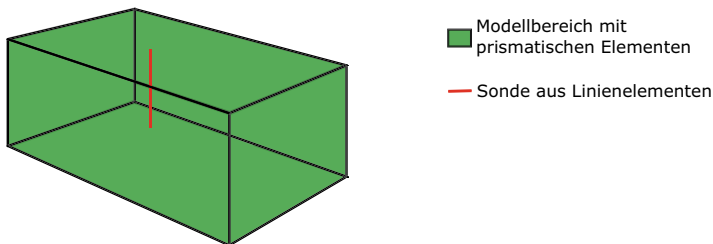


Abb. 4.9 Schematischer Modellaufbau eines FE-Modells nach dem Dual-Kontinuum-Ansatz

modell ist mit prismaförmigen Elementen diskretisiert, während die Doppel-U-Sonde, wie schematisch in Abb. 4.9 dargestellt, durch einen Strang aus Linienelementen repräsentiert wird.

Randbedingungen werden im OGS-Modell durch zusätzliche 2D-Oberflächennetze für die Einströmfläche, die Oberfläche und die Unterseite definiert. Über die Randbedingung an der Einströmfläche des Grundwassers wird die Temperatur, mit der das Grundwasser ins Modell strömt, definiert. Diese entspricht beim Eintritt ins Modell dem Temperaturprofil, welches die Anfangsbedingung für die Untergrundtemperatur im Modell definiert. An der Unterseite des Modells wurde eine Neumann-Randbedingung gesetzt, welche die terrestrische Wärmestromdichte \dot{Q}_s definiert. Diese wird abhängig vom geothermischen Gradienten ΔT_{geo} und der Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes λ_s des aktuellen Parametersatzes nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\dot{Q}_s = \Delta T_{geo} \cdot \lambda_s . \quad (4.11)$$

Da im Rahmen der Sensitivitätsanalyse eine große Anzahl an Varianten des Modells simuliert werden muss, wurde das Modell möglichst effizient gestaltet. Hierfür wurden Voruntersuchungen zur Modell- und Elementgröße, zur Zeitschrittweite sowie zu Solvertoleranzen durchgeführt. Dabei war es das Ziel, möglichst genaue Ergebnisse bei einem möglichst geringen Zeitaufwand zu erhalten. Der erste Schritt diente dazu, die Außenabmessungen des Grundmodells festzulegen. Um diese zu definie-

ren, wurden Simulationen mit möglichst ungünstigen Wertekonstellationen innerhalb der Wertebereiche durchgeführt, um so abzuschätzen, wie groß die Ausbreitung von Temperaturänderungen um die Sonde werden kann. Hierfür wurden Temperaturänderungen größer 10^{-4} K gegenüber der Anfangstemperatur berücksichtigt. In den Untersuchungen ergaben sich diese bis 56 m unterhalb der EWS. Die Modellausdehnung in Tiefenrichtung bestimmt sich abhängig von der Sondenlänge L_{BHE} im Parametersatz und wurde mit einer Zugabe von 70 m ausgehend von der Sondenspitze versehen. Das obere Ende der Sonde liegt bei allen Modellen 0,5 m unter GOK. Senkrecht und entgegengesetzt zur Strömungsrichtung des Grundwassers ergab sich im Modell eine maximale Ausbreitung der Temperaturänderung von 66,5 m ausgehend von der Sondenposition. Daher wurden die Modellgrenzen in diesen Richtungen mit jeweils 80 m Abstand zur Sondenposition festgelegt. Eine Ausnahme stellt hier die Temperaturfahne in Richtung der Grundwasserströmung dar. Hier ergeben sich wesentlich größere Temperatureausbreitungen im Bereich $\Delta T \geq 10^{-4}$ K. Aufgrund des Wertebereiches der Darcy-Geschwindigkeit v_f sind dort Ausbreitungen der Temperaturfahne über einige Hundert Meter möglich. Das Modell so zu definieren, dass auch die Temperatureausbreitung in diesen Fällen innerhalb der Modellgrenzen bleibt, würde einen erheblichen zeitlichen Rechenaufwand bedeuten. Daher wurde exemplarisch betrachtet, wie sich die Ausbreitung einer Temperaturfahne über die Modellgrenzen hinaus in der numerischen Simulation mit vergleichbaren Modellen auswirkt. Abb. 4.10 zeigt Ergebnisse für die Untergrundtemperatur aus drei Simulationen, bei denen ein Modell sukzessive in zwei Schritten verkleinert wurde. Dabei wurde das Netz aus Elementen nur verändert, indem Elemente gelöscht wurden. Der Abstand zwischen Sondenposition und Modellrand in Strömungsrichtung beträgt anfangs 85 m und wird zuerst auf 35 m und anschließend auf 25 m reduziert. Für die erste Kürzung ist an der Temperaturkurve keine Abweichung vom ursprünglichen Verlauf zu erkennen. Die Temperaturkurve aus der Simulation mit der zweiten Kürzung zeigt eine Abweichung, die erst bei unter 10 m Entfernung zum neuen Modellrand erkennbar wird. An isothermen Linien im Modellquerschnitt (Abb. 4.11) zeigt sich bei Verkürzung des Modells eine Aufweitung dieser Linien. Die Isothermen aus den Berechnungen mit den verkürzten Modellen kommen unter den Linien der Ausgangssimulation nur zum Vorschein, wenn deren Verlauf abweicht. Die äußerste Isotherme zeigt eine Temperaturänderung von $\Delta T = 10^{-4}$ K zur Ausgangstemperatur des Untergrundes an. Jede weitere Isotherme liegt 0,1 K unter der jeweils vorherigen Isothermen. Je näher die Isothermen am Modellrand liegen, desto größer ist deren Abweichung zum ungekürzten Modell. Für die erste Kürzung betrifft dies nur die äußerste Isotherme (rote Linien im Bild). Bei der zweiten Kürzung sind hingegen mehrere Isothermen von der Kürzung beeinflusst. Mit den Ergebnissen dieser Betrachtung wurde die Modellgrenze in Strömungsrichtung des Grundwassers mit einer Entfernung von 150 m zur Sondenposition festgelegt. Da sich Einflüsse nur in unmittelbarer Umgebung der Modellgrenze zeigten, sollen Auswertungen nur in entsprechender Entfernung zum Rand des Modells in Richtung der Grundwasserströmung erfolgen. Insgesamt ergaben sich so Abmessungen von $160 \text{ m} \times 230 \text{ m}$ für die Grundfläche des Modells und eine adaptive Modelltiefe, die

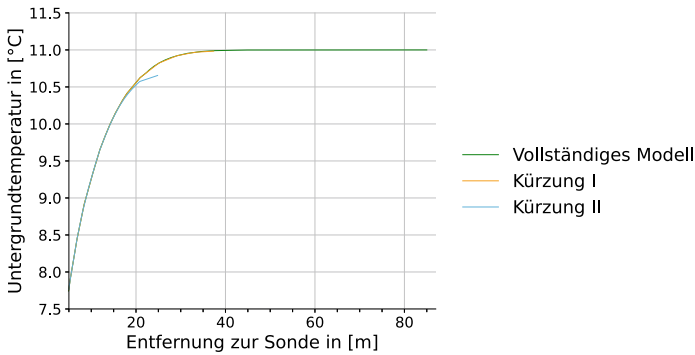


Abb. 4.10 Ausbreitung Untergrundtemperatur in Strömungsrichtung des Grundwassers abhängig von der Entfernung zur Sonde und der Verringerung des Abstands zwischen Sonde und Modellrand in Strömungsrichtung durch Kürzung des Modells

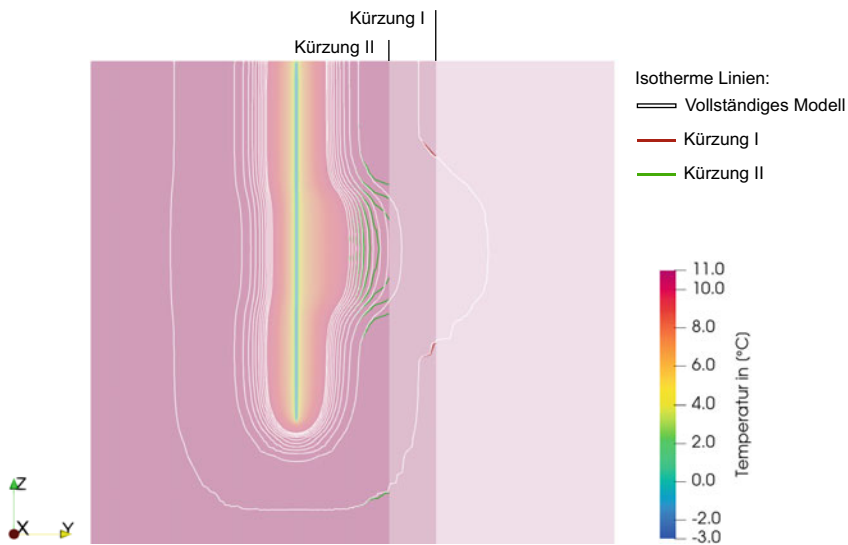


Abb. 4.11 Isotherme Linien der Untergrundtemperatur am vertikalen Modellquerschnitt bei Verkürzung des Modells in den Bereich der Temperaturfahne einer Erdwärmesonde nach einem Jahr Simulation

sich aus L_{BHE} des aktuellen Parametersatzes, einer Zugabe von 0,5 m oberhalb und 70 m unterhalb der Sonde ergibt.

Je größer die Anzahl der Elemente, mit denen der gewählte Modellbereich diskretisiert wird, desto größer ist die benötigte Rechendauer. Neben den Modellabmessungen kann die Anzahl der benötigten Elemente durch deren Größe beeinflusst werden. Die Elementgröße beeinflusst jedoch nicht nur die Rechendauer, sondern auch die Ergebnisgüte. Für das Modell der Sensitivitätsanalyse wurden die Kantenlängen der

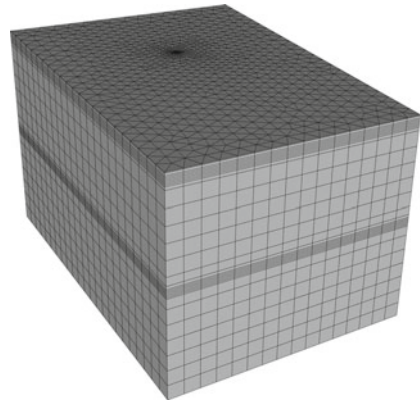
prismatischen Elemente ausgehend von einer feinen Vernetzung vergrößert und der Einfluss auf die mittlere Fluidtemperatur in der Sonde betrachtet. Ziel dieser Untersuchung ist es, Einbußen in der Genauigkeit des Ergebnisses aufgrund eines zu groben Elementnetzes bei einem vertretbaren Rechenaufwand auf ein Minimum zu beschränken. Prinzipiell wurde der Bereich um die Sonde in horizontaler Richtung feiner diskretisiert, während sich die größten Elementkantenlängen am Außenrand befinden. Als Ergebnis der Untersuchung wurde die größte Elementkantenlänge mit 30 m gewählt. Die Sonde ist umgeben von einem quadratischen Bereich ($16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$) mit einem Mindestabstand von 8 m zur Sonde, in dem die maximale Kantenlänge 2 m beträgt. Die Linienelemente, welche die Sonde repräsentieren, sind über sechs Knoten angebunden. Zur bestmöglichen Repräsentation des realen Bohrlochradius im FE-Modell kann der ideale Knotenabstand Δx_b für die Knoten um die Sonde nach [Diersch et al. \(2011\)](#) mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$\Delta x_b = r_b \cdot 6.13 = \frac{d_{BHE} \cdot 6.13}{2} . \quad (4.12)$$

Diese Beziehung findet auch in den Modellen der Sensitivitätsanalyse Anwendung. Bei der Betrachtung der Elementkantenlänge in vertikaler Richtung zeigte vor allem die Elementkantenlänge an den Übergängen zwischen Bereichen mit und ohne Grundwasserströmung einen Einfluss auf die Ergebnisgröße. Während hier eine feinere Vernetzung mit 1 m Kantenlänge gewählt wurde, erwies sich im restlichen Modell eine gröbere Vernetzung mit 7,5 m Kantenlänge als ausreichend für gleichbleibende Ergebnisse. Neben den Übergängen zwischen Bereichen mit und ohne Grundwasserströmung wurde außerdem der Bereich um den Sondenfuß am unteren Ende der Sonde mit einer feineren Vernetzung in vertikaler Richtung versehen. Exemplarisch ist in [Abb. 4.12](#) ein FE-Modell dargestellt.

In der Untersuchung der Zeitschrittweite für die transiente Berechnung wurden Zeitschrittweiten zwischen $\Delta t = 6000 \text{ s} = 100 \text{ min}$ und $\Delta t = 432.000 \text{ s} = 5 \text{ d}$ betrachtet. Je kleiner die Zeitschrittweite, desto mehr Zeitschritte müssen für eine Simulation berechnet werden. Andererseits sind bei größeren Zeitschrittweiten in der Regel mehr Iterationen im Lösungsprozess der einzelnen Zeitschritte notwendig, um die Konvergenzbedingungen für die Lösung zu erfüllen. Für das Modell der Sensitivitätsanalyse zeigte sich eine Zeitschrittweite von $\Delta t = 86.400 \text{ s} = 1 \text{ d}$ als ausreichend. Kleinere Werte zeigten keine Veränderung in den Ergebnissen für die mittlere Fluidtemperatur in der Sonde. Abschließend wurden für die Erstellung des Grundmodells die Solvertoleranzen in OGS hinsichtlich der Performance betrachtet. OGS arbeitet mit linearen und nichtlinearen Solvern. Der lineare Solver dient dazu, aus den Temperaturen des vorherigen Zeitschrittes die Temperaturen des aktuellen Zeitschrittes zu berechnen. Die Grundbeziehungen für Simulationen mit EWS in OGS sind jedoch nichtlinear, denn gemeinsam mit den Temperaturänderungen ändern sich auch Wärmeflüsse im Modell. Daher wird ein nichtlinearer Solver benötigt, der bei OGS mit Picard-Iterationen arbeitet ([Shao et al., 2016](#)). Für beide Solver wird eine relative Toleranz angegeben. Diese dient als Konvergenzkriterie für die Berechnungsiterationen. Je größer diese Toleranz angegeben wird, desto ungenauer wird das Ergebnis und desto weniger Iterationen sind in der Berechnung pro Zeitschritt

Abb. 4.12 Exemplarische Darstellung des Finite-Elemente-Netzes eines Modells der Sensitivitätsanalyse



notwendig. Die Toleranz im linearen Solver zeigt wenig Einfluss auf die Rechen-
dauer und kann daher sehr klein gewählt werden. Die Untersuchung der Toleranz im
nichtlinearen Solver zeigt jedoch Einfluss auf Ergebnisgüte und Rechen-
dauer. Werte wurden hier zwischen $\delta = 1 \cdot 10^{-7}$ und $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ betrachtet. Abweichungen in
der Ergebnisgüte zeigten sich bei Werten $\delta > 1 \cdot 10^{-5}$, weshalb die Toleranz mit
 $\delta = 1 \cdot 10^{-5}$ festgelegt wurde.

4.1.3 Ergebnisse des Parameterscreenings

Einen ersten Eindruck über die Parametersensitivitäten liefert das Parameterscree-
ning zu Beginn der Sensitivitätsanalyse. Dieses wurde, wie unter Abschn. 4.1.1 be-
schrieben, mit den Verfahren Morris-Methode und OVAT durchgeführt. Ziel ist es,
mit diesem Ranking Parameter mit geringem Einfluss für die rechentechnisch auf-
wendigere Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes auszuschließen.

Die im Folgenden vorgestellte Betrachtung von Ergebnissen erfolgt stets für die
mittlere Fluidtemperatur T_{365} zum Ende des Jahresverlaufs und die mittlere be-
tragsmäßige Temperaturänderung bezüglich eines Referenzexperimentes $\bar{\delta}_T$, wie in
Abschn. 4.1.1 erläutert. In beiden Verfahren werden, bedingt durch die Methoden
und Möglichkeiten der verwendeten Softwarelösungen, keine Verteilungsfunk-
tionen für die Parameter berücksichtigt. Die Parameter wurden daher für dieses erste
Ranking als gleichverteilt betrachtet. Aufgrund der in EASyQuart vorhandenen Re-
chenkapazitäten konnten diese Voruntersuchungen mit numerischen Simulationen
in OGS durchgeführt werden. Das OVAT-Verfahren basiert auf 41 numerischen Be-
rechnungen, wovon zwei Berechnungen pro Parameter anfallen und eine Simulation
mit Referenzwerten. In Abb. 4.13 sind die Ergebnisse aus diesen Berechnungen in
sogenannten Tornadoplots dargestellt. Die Balken kennzeichnen die Änderung von
 $\bar{\delta}_T$ bzw. T_{365} im Vergleich zur Berechnung mit den Referenzwerten der Parameter
(siehe auch Tab. 4.2). Der blaue Balken stellt das Ergebnis bei Berechnung mit dem
Minimalwert des Parameterwertebereiches dar und der rote Balken das Ergebnis bei

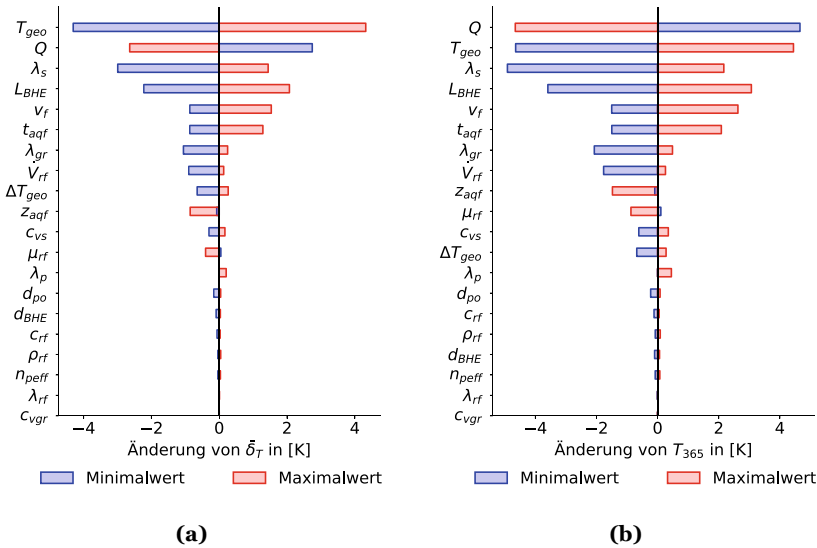


Abb. 4.13 Ergebnisse des Parameterscreenings mit der OVAT-Methode **(a)** anhand der Änderung der mittleren betragsmäßigen Abweichung der mittleren Fluidtemperatur $\bar{\delta}_T$ bezüglich der Berechnung mit Referenzwerten und **(b)** für die Änderung der mittleren Fluidtemperatur zum Ende des Jahresverlaufes T_{365} bezüglich der Berechnung mit Referenzwerten

Verwendung des Maximalwertes. Die Ergebnisse sind der Größe nach absteigend angeordnet, wodurch sich die „Tornado“-Form ergibt. Beim von oben gesehen ersten Eintrag im Diagramm ist der Unterschied des Ergebnisses zwischen der Berechnung mit dem Parameterminimalwert und dem Parametermaximalwert am größten. Folglich hat nach dieser Methode der Parameter ganz unten im Diagramm den geringsten Einfluss auf die Ergebnisgröße. Die Rangfolge der Parameter hinsichtlich ihrer Sensitivitäten lässt sich daher an den Diagrammen gut ablesen. Ein signifikanter Bruch zwischen Parametern mit großem und Parametern mit geringem Einfluss lässt sich jedoch nicht erkennen. Vielmehr ist die Abnahme der Sensitivität fließend. Als Kriterium zur Unterscheidung signifikanter und insignifikanter Parameter wurde daher die Änderung der Ergebnisgröße betrachtet, die sich zwischen der Berechnung mit dem Maximalwert und der Berechnung mit dem Minimalwert des jeweiligen Parameters ergibt. Als Grenzwert wurde für die Auswahl eine Änderung von mindestens 0,5 K angesetzt.

In der Morris-Methode wurden 20 elementare Effekte pro Parameter berechnet in einem vierstufigen Design. Insgesamt ergeben sich hier bei 20 Parametern 420 Berechnungen in OGS. Die Ergebnisse aus diesem Verfahren sind in Abb. 4.14 dargestellt. Für die weiteren Untersuchungen sind Parameter relevant, die mit einem großen Wert für μ^* im Vergleich zu anderen Parametern einen bedeutenden Einfluss zeigen. Andererseits sind auch Parameter interessant, die trotz eines geringen μ^* -Wertes einen vergleichsweise großen Wert für σ haben, da sie gegebenenfalls durch Interaktionen mit anderen Parametern die Zielgröße unerkannt beeinflussen. Vor al-

lem in Abb. 4.14b fällt auf, dass lediglich T_{geo} trotz eines großen Einflusses einen geringen Wert für σ hat im Vergleich zu den restlichen Parametern. Dies spricht für einen linearen Einfluss des Parameters auf die Zielgröße und für wenig bis keine Interaktionen mit anderen Parametereinflüssen. Parameter mit kleinem Einfluss bzw. einem geringen Wert für μ^* zeigen in den Ergebnisdarstellungen keine auffälligen Werte für σ .

Aufgrund der Herangehensweise bietet die Morris-Methode ein differenzierteres Bild über die Sensitivitäten der Parameter als das OVAT-Verfahren. Neben wenigen Ausnahmen gibt es jedoch auch hier eher eine kontinuierliche Abnahme der Sensitivitäten der Parameter. Daher wurden zunächst die zehn am wenigsten einflussreichen Parameter als insignifikant betrachtet. In Tab. 4.3 ist die Rangfolge der Parameter hinsichtlich ihres Einflusses für beide Screeningverfahren dargestellt. Parameter, die als insignifikant betrachtet werden, sind dort farblich gekennzeichnet. Bis auf wenige Ausnahmen unterscheidet sich die Gruppe der insignifikanten Parameter zwischen den Verfahren und der betrachteten Ergebnisgröße nicht. Für die weiteren Untersuchungen werden daher alle Parameter betrachtet, die in einem der vier Fällen in Tab. 4.3 im signifikanten Bereich liegen. Somit konnte zunächst eine Auswahl von 12 Parametern für die Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes festgelegt werden.

Tab. 4.3 Signifikante und insignifikante Parameter aus dem Screening mit der OVAT-Methode und der Morris-Methode.

	OVAT		Morris-Methode	
	$\bar{\delta}_T$	T_{365}	$\bar{\delta}_T$	T_{365}
Signifikant	T_{geo}	Q	T_{geo}	Q
	Q	T_{geo}	Q	λ_s
	λ_s	λ_s	λ_s	T_{geo}
	L_{BHE}	L_{BHE}	L_{BHE}	L_{BHE}
	v_f	v_f	z_{aqf}	z_{aqf}
	t_{aqf}	t_{aqf}	v_f	v_f
	λ_{gr}	λ_{gr}	λ_{gr}	λ_{gr}
	\dot{V}_{rf}	\dot{V}_{rf}	\dot{V}_{rf}	t_{aqf}
	ΔT_{geo}	z_{aqf}	ΔT_{geo}	\dot{V}_{rf}
	z_{aqf}	μ_{rf}	t_{aqf}	c_{vs}
Insignifikant	c_{vs}	c_{vs}	c_{vs}	ΔT_{geo}
	μ_{rf}	ΔT_{geo}	d_{BHE}	d_{BHE}
	λ_p	λ_p	d_{po}	d_{po}
	d_{po}	d_{po}	c_{rf}	n_{peff}
	d_{BHE}	c_{rf}	n_{peff}	c_{rf}
	c_{rf}	ρ_{rf}	λ_p	ρ_{rf}
	ρ_{rf}	d_{BHE}	ρ_{rf}	λ_p
	n_{peff}	n_{peff}	μ_{rf}	μ_{rf}
	λ_{rf}	λ_{rf}	λ_{rf}	λ_{rf}
	c_{vgr}	c_{vgr}	c_{vgr}	c_{vgr}

Bereits bei der Definition der Parameter war klar, dass modellbedingt durch entsprechende Werte von z_{aqf} nicht auszuschließen ist, dass Teile der durch t_{aqf} repräsentierten Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches unter der Sonde liegen. In den Ergebnissen der Morris-Methode zeigt sich der Parameter z_{aqf} für die Tiefe, in der der vom Grundwasser durchströmte Bereich beginnt, einflussreicher als die Mächtigkeit t_{aqf} . Hier kann daher die Vermutung angestellt werden, dass der Einfluss von z_{aqf} vor allem durch eine Reduzierung des Anteils von t_{aqf} , welcher im Bereich der Sonde liegt, bedingt wird. Um die gegenseitige Beeinflussung von z_{aqf} und t_{aqf} näher zu ergründen, wurde zunächst eine separate Untersuchung mit OGS-Simulationen durchgeführt. Dabei wurden lediglich unterschiedliche Konstellationen dieser beiden Parameter betrachtet, während alle anderen Parameter auf die in Tab. 4.2 als Referenzwerte gekennzeichneten Werte gesetzt wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind anhand der mittleren Fluidtemperatur T_{365} in Abb. 4.15 dargestellt. Die gestrichelten Teile der Kurven kennzeichnen den Kurvenabschnitt, in dem die Summe von $z_{aqf} + t_{aqf} > 1 L_{BHE}^*$ ist und somit Teile des vom Grundwasser durchströmten Bereiches unterhalb der Sonde liegen (siehe auch Abb. 4.8). Eine Vergrößerung von einem der beiden Parameter z_{aqf} oder t_{aqf} hat dort nur eine Vergrößerung der Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches unterhalb der Sonde zur Folge, während der effektiv vom Grundwasser umströmte Anteil der Sonde gleich bleibt. An dem nahezu horizontalen Verlauf dieser Kurvenabschnitte lässt sich erkennen, dass hier keine Veränderung im Einfluss auf die Sonde entsteht. Beim Vergleich der Kurve für $z_{aqf} = 0 L_{BHE}^*$ mit der Kurve für $z_{aqf} = 1 L_{BHE}^*$ wird in diesem Zusammenhang ersichtlich, dass der hauptsächliche Einfluss auf T_{365} von z_{aqf} durch die Reduzierung des effektiven Anteils von

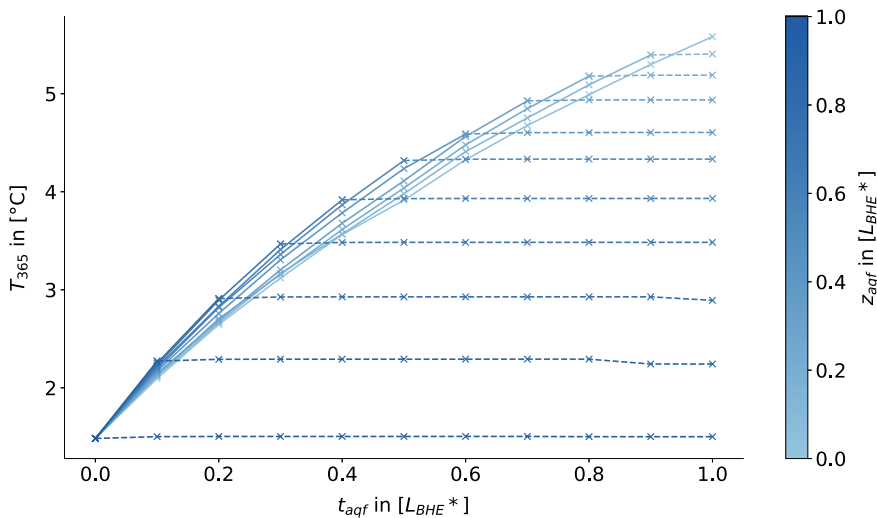


Abb. 4.15 Einfluss des Parameters t_{aqf} auf die mittlere Fluidtemperatur T_{365} nach einem Jahr Sondenbetrieb für unterschiedliche Werte von z_{aqf}

t_{aqf} im Bereich der Sonde entsteht. Mit diesem Modellansatz sind letztlich sowohl die Einflüsse des effektiven Anteils von t_{aqf} und des Parameters z_{aqf} nicht eindeutig voneinander zu trennen als auch der Einfluss von t_{aqf} nur bedingt auf die EWS bezogen. Daher wurde der Parameter z_{aqf} ebenfalls für weitere Untersuchungen ausgeschlossen. In den folgenden Untersuchungen wird daher lediglich die Mächtigkeit t_{aqf} des vom Grundwasser durchströmten Bereiches variiert, während dieser Bereich immer in einer Tiefe von -15 m im Modell beginnt und sich maximal bis zur Sondenspitze bei $t_{aqf} = 1 L_{BHE}^*$ ausdehnt. Folglich beschreibt dieser Parameter nun den Anteil der Sonde, der in diesem Bereich vom Grundwasser umströmt wird. Insgesamt bleiben so elf Parameter für die weiteren Untersuchungen.

4.1.4 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes

Mit der reduzierten Anzahl an Parametern wird die Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes durchgeführt. Wie beschrieben, erfolgt die Berechnung der Parametersamples hier mit einem Proxy-Modell. Dieses wird, wie in Abschn. 4.1.1 beschrieben, mit Ergebnissen aus OGS-Berechnungen trainiert. Um die Anzahl der notwendigen Trainingsamples für ein ausreichend genaues Proxy-Modell abzuschätzen, wurde das analytische Verfahren nach [Beier \(2014\)](#) verwendet (siehe auch Abschn. 4.1.1). Letztendlich hat sich jedoch herausgestellt, dass mit einem Proxy-Modell zur Approximation von OGS-Ergebnissen, im Vergleich zur Verwendung des analytischen Modells und bei gleicher Anzahl von Trainingsamples, geringere Genauigkeiten erzielt werden. Die Trainingsamples wurden auf Basis eines LHS mit gleichverteilten Parameterwertebereichen erzeugt, um eine gleichmäßige Abdeckung der Wertebereiche zu erreichen. Für das Training wurden 2000 Variationen von Parameterwertekonstellationen mit OGS berechnet. Um die Güte der Approximation durch das Proxy-Modell anschließend zu überprüfen, wurden darüber hinaus 208 OGS-Modelle mit Parametersamples aus einer Sobol'-Folge, welche nicht Teil des Proxytrainings waren, berechnet. Diese Parametersamples wurden anschließend ebenfalls mit dem Proxy-Modell ausgewertet, um die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus OGS zu vergleichen. Dafür wurden das Bestimmtheitsmaß R^2 und die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme RMSE verwendet. Wie in Abschn. 4.1.1 beschrieben, kann ein Proxy-Modell immer nur für eine Ergebnisgröße trainiert werden. Für die Betrachtung unterschiedlicher Ergebnisgrößen, wie hier, können jedoch unterschiedliche Proxy-Modelle auf Basis der gleichen transienten dreidimensionalen Ergebnisse aus OGS trainiert werden. Die Überprüfung der Proxy-Modelle erfolgte für die Ergebnisgröße $\bar{\delta}_T$ und T_{365} . Indem auch Proxy-Modelle erstellt wurden, die nur mit einem Teil der 2000 Samples aus OGS trainiert wurden, konnte in diesem Zusammenhang auch die Konvergenz der Qualität des Proxy-Modells abhängig von der Anzahl der Trainingsamples überprüft werden. Die Ergebnisse hieraus sind in [Abb. 4.16](#) dargestellt. Vor allem anhand der Kurven für das Bestimmtheitsmaß wird die Konvergenz bei zunehmender Anzahl von Trainingsamples ersichtlich. Bei der Anzahl von 2000 Trainingsamples liegt das Bestimmtheitsmaß unabhängig von der

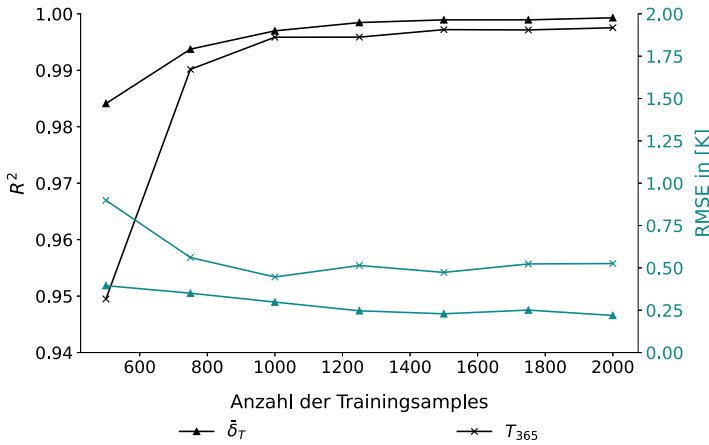


Abb. 4.16 Qualität des Proxy-Modells im Vergleich zu OGS-Ergebnissen anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme RMSE für die Ergebnisparameter $\bar{\delta}_T$ und T_{365} abhängig von der Anzahl der Trainingsamples

Ergebnisgröße (auch für die hier nicht dargestellten Ergebnisparameter) bei über 99,7 %.

Die Berechnung der Sobol'-Indizes erfolgt hier auf Basis von Parametervariationen, die mithilfe einer Sobol'-Folge erzeugt wurden. Für die Ermittlung von Sobol'-Indizes erster und zweiter Ordnung bestimmt sich bei Nutzung der Sobol'-Folge die Gesamtanzahl n der Parametersamples nach folgender Beziehung (Saltelli, 2002):

$$n = N(2j + 2). \tag{4.13}$$

Hierbei ist j die Anzahl der Parameter und N die Anzahl der Stichproben, wobei N nach Owen (2021) eine Potenz zur Basis zwei sein soll. Aufgrund der geringen Rechendauer mit dem Proxy-Modell konnten in einer Konvergenzbetrachtung Sobol'-Indizes auf Basis unterschiedlicher Anzahlen von Parametersamples betrachtet werden. Die Auswertung erfolgte hier für $N = 2^6$ bis $N = 2^{14}$. Abb. 4.17 zeigt die Sobol'-Indizes der hier berücksichtigten elf Parameter in Abhängigkeit von der Anzahl der berechneten Samples. Die dargestellten Verläufe der Sobol'-Indizes zeigen, dass eine Erhöhung auf über $N = 2^{14}$ Samples nicht notwendig ist. Daher basieren die im Folgenden dargestellten Ergebnisse auf einer Sobol'-Folge für $N = 2^{14}$.

Abb. 4.18 zeigt die Ergebnisse für die Sobol'-Indizes erster Ordnung. Für die Sobol'-Indizes ist des Weiteren das 95 %-Konfidenzintervall dargestellt. Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass der Parameter für die Modelltemperatur T_{geo} den größten Einfluss auf das Ergebnis hat. Deren großer Einfluss auf die Fluidtemperatur in der Sonde liegt nahe, da sie die Ressource ist, der sich die Geothermie bedient. Im Vergleich der Auswertung mit $\bar{\delta}_T$ in Abb. 4.18a und der Auswertung mit T_{365} in Abb. 4.18b wird ersichtlich, dass sich T_{geo} bei der Auswertung mit $\bar{\delta}_T$ stärker von den anderen Parametern der Betrachtung abhebt. Wie zuvor beschrieben, handelt es sich bei $\bar{\delta}_T$ um ein integrales Maß, welches den Einfluss der Parameter im Jahresverlauf zusammenfasst. Die Unterschiede in den beiden Diagrammen

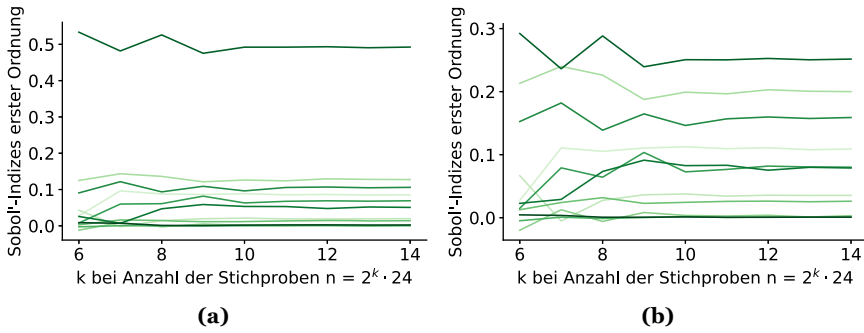


Abb. 4.17 Konvergenz der Sobol'-Indizes für (a) die Auswertung der mittleren betragsmäßigen Abweichung der mittleren Fluidtemperatur $\bar{\delta}_T$ und (b) bei Auswertung der mittleren Fluidtemperatur zum Ende des Jahresverlaufes T_{365} . Jede Kurve zeigt den Sobol'-Index eines Parameters abhängig von der Anzahl der Stichproben nach Gl. (4.13)

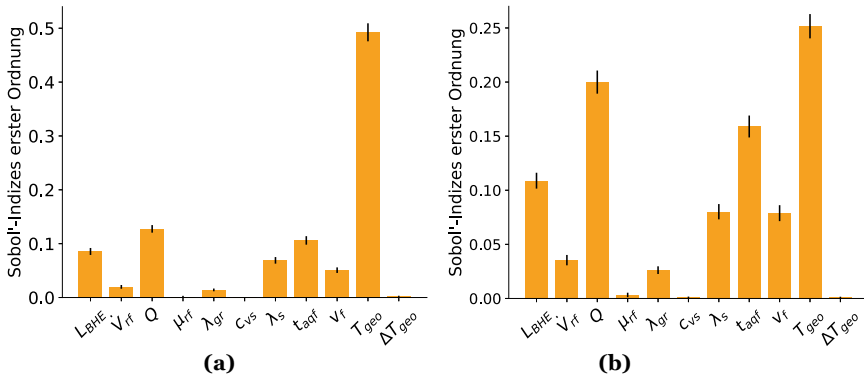


Abb. 4.18 Sobol'-Indizes erster Ordnung (a) für die Auswertung der mittleren betragsmäßigen Abweichung der mittleren Fluidtemperatur $\bar{\delta}_T$ und (b) bei Auswertung der mittleren Fluidtemperatur zum Ende des Jahresverlaufes T_{365}

sprechen daher für einen sich ändernden Einfluss der Parameter im Jahresverlauf. Aufschluss bietet hier Abb. 4.19, welche neben T_{365} die Ergebnisse für die Sobol'-Indizes bezüglich der Fluidtemperatur an weiteren Zeitpunkten im Jahresverlauf des Sondenbetriebs zeigt. Hier wird ersichtlich, dass mit abnehmendem Sondenbetrieb bzw. abnehmender Entzugsleistung (siehe auch Abb. 4.3) der Einfluss von T_{geo} zunimmt. Dies erklärt, warum sich dieser Parameter bei der Betrachtung von $\bar{\delta}_T$ in Abb. 4.18a mit einem mehrfach höheren Sobol'-Index von den anderen Parametern abhebt. Ein Einfluss der saisonalen Temperaturen, welche durch Oberflächentemperaturen und saisonale Zone Bestandteil von T_{geo} sind, lässt sich in Abb. 4.19 nicht isoliert auswerten. Da der größere Einfluss von T_{geo} bei Betrachtung von $\bar{\delta}_T$ seine Ursache in Zeiträumen hat, die durch geringeren Sondenbetrieb gekennzeichnet sind, ist dieses Ergebnis hinsichtlich der Auslegung einer Sonde weniger aussagekräftig. Bei Vernachlässigung des Parameters T_{geo} in Abb. 4.18a zeigen die restlichen Para-

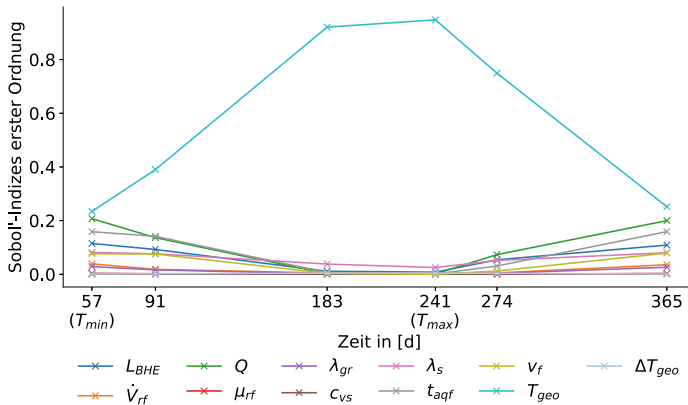


Abb. 4.19 Sobol'-Indizes zur mittleren Fluidtemperatur an Zeitpunkten im vierteljährlichen Abstand sowie zur minimalen mittleren Fluidtemperatur T_{min} und maximalen mittleren Fluidtemperatur T_{max} im Jahresverlauf des Sondenbetriebs

meter relativ zueinander gesehen vergleichbare Einflüsse zu Abb. 4.18b. Im Modell bestimmt sich der Sondenbetrieb bzw. die Sondenlast durch den Parameter Q für den Jahreswärmeenergiebedarf. Dieser zeigt in den Ergebnissen den zweitgrößten Einfluss. Anschließend folgt in der Rangfolge der Sobol'-Indizes der Parameter t_{aqf} , welcher für den vom Grundwasser umströmten Anteil der Sonde steht. Die Darcy-Geschwindigkeit v_f zeigt hingegen mit einem Sobol'-Index von 0,0788 für T_{365} und 0,0508 für δ_T einen jeweils weniger als halb so großen Einfluss wie t_{aqf} . Die Sondenlänge ist eine zentrale Stellgröße für die Performance einer Geothermieanlage. Wie zu erwarten, ist daher auch der Parameter L_{BHE} einer der einflussreichsten in den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse. Mit einem Sobol'-Index von 0,1089 für T_{365} und 0,0855 für δ_T ist der Parameter auf Platz vier der Auswertung. Bei Einbeziehung der Konfidenzintervalle zeigen die Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes λ_s und die Darcy-Geschwindigkeit v_f einen gleichrangigen Einfluss für die Betrachtung von T_{365} . In Abb. 4.18a liegt der Einfluss von λ_s über dem von v_f . Aufschluss gibt auch hier der Blick auf Abb. 4.19. Im Vergleich zu v_f fällt hier in den Sommermonaten bei geringem Sondenbetrieb der Einfluss von λ_s weniger ab. Das hintere Mittelfeld der hier betrachteten Parameter bilden die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials λ_{gr} und die Durchflussrate \dot{V}_{rf} . Den geringsten Einfluss zeigen in dieser Betrachtung die spezifische volumetrische Wärmekapazität des geologischen Untergrundes c_{vs} , die Viskosität des Sondenfluids μ_{rf} und der geothermische Gradient ΔT_{geo} .

Interaktionen zwischen den Parametern bzw. deren Einflüsse auf die Zielgröße lassen sich anhand der Sobol'-Indizes zweiter Ordnung erkennen. Diese sind in Abb. 4.20 dargestellt. Beide Grafiken in Abb. 4.20 zeigen vergleichbare Muster, welche in Darstellung 4.20b für T_{365} stärker ausgeprägt sind. Der größte Einfluss durch Zusammenwirken von Parametern lässt sich für λ_s und t_{aqf} erkennen. Daneben heben sich auch die Sobol'-Indizes zweiter Ordnung für die Wärmeleitfähigkeit λ_s in

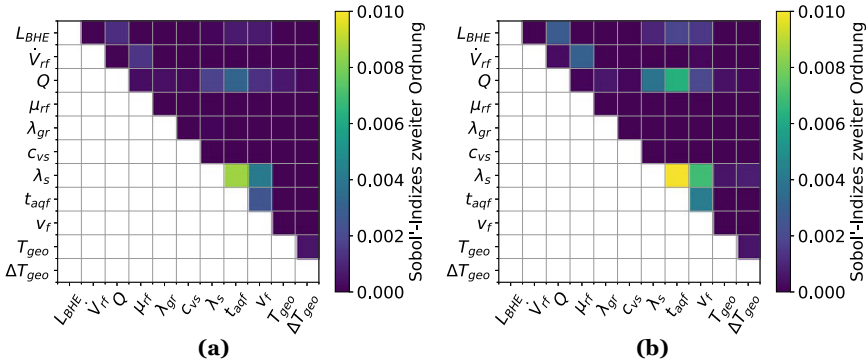
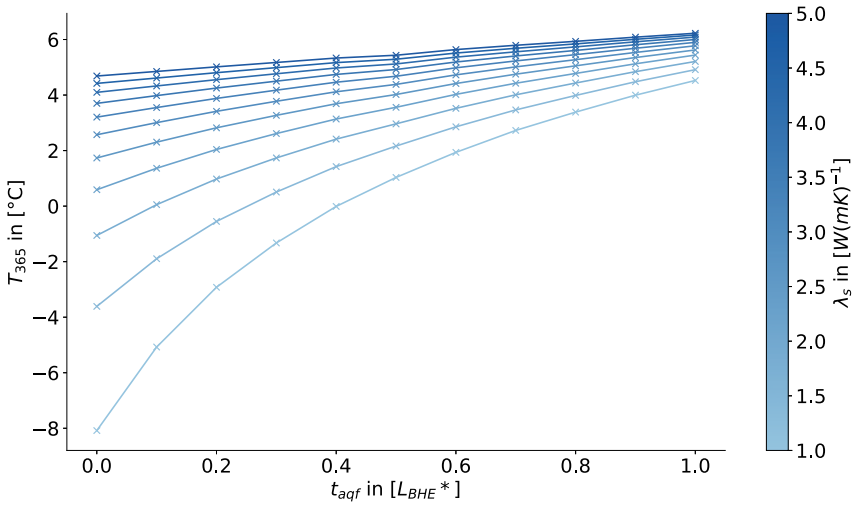


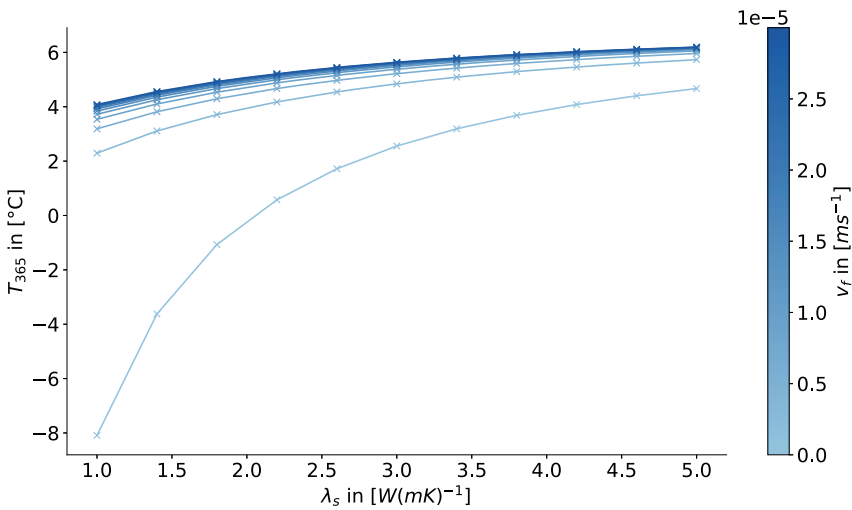
Abb. 4.20 Sobol'-Indizes zweiter Ordnung der Parameter der Sensitivitätsanalyse zur Darstellung der Parameterinteraktionen (a) für die Auswertung der mittleren betragsmäßigen Abweichung der mittleren Fluidtemperatur δ_T und (b) bei Auswertung der mittleren Fluidtemperatur zum Ende des Jahresverlaufes T_{365}

Verbindung mit der Darcy-Geschwindigkeit v_f sowie der Jahreswärmeenergiebedarf Q in Verbindung mit dem Parameter t_{aqf} hervor.

Für die beiden Parameterkombinationen mit λ_s wurde das Zusammenwirken näher untersucht. Wie bereits für die in Abb. 4.15 dargestellten Ergebnisse, wurden in diesen Untersuchungen Parametervariationen mit OGS-Modellen berechnet. Während die beiden Parameter der jeweiligen Parameterkombination variiert werden, sind dabei alle anderen Parameter auf den in Tab. 4.2 als Referenzwert gekennzeichneten Wert eingestellt. Ausgewertet wurde hier wie zuvor die mittlere Fluidtemperatur nach einem Jahr Simulation T_{365} . Abb. 4.21 zeigt die Ergebnisse für die beiden Parameterkombinationen, welche in Abb. 4.20 die größten Sobol'-Indizes aufweisen. Für die Parameterkombination λ_s und t_{aqf} sind Ergebnisse in Abb. 4.21a dargestellt. In der Grafik wird ersichtlich, dass die Kurven für größere Werte von λ_s einen flacheren Verlauf haben und für größere Werte von t_{aqf} der Abstand zwischen den Kurven kleiner wird. Diese Eigenschaften veranschaulichen einen abnehmenden Einfluss der Parameter t_{aqf} und λ_s bei zunehmenden Werten des jeweils anderen Parameters. Bei beiden Parametern handelt es sich um Größen, die das Ausmaß von Wärmetransportprozessen im Untergrund charakterisieren. Mit steigenden Werten des einen Parameters wird der Einfluss des anderen daher kompensiert. In Abb. 4.21b sind Ergebnisse zur Interaktion zwischen λ_s und v_f dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die größte Temperaturänderung durch Variation von λ_s bei $v_f = 0 \text{ ms}^{-1}$. Für größere Werte von v_f werden die Kurven flacher, ähnlich wie es auch in Abb. 4.21a im Zusammenhang mit t_{aqf} zu sehen ist. Ebenso zeigt sich, dass für größere Werte von λ_s die Kurven für unterschiedliche Werte von v_f näher beisammen liegen. Da v_f letztlich ebenfalls den Wärmetransport durch Grundwasserströmung mit charakterisiert, sind die beobachteten Zusammenhänge genauso zu begründen, wie dies zuvor für Abb. 4.21a erfolgte.



(a) Detailbetrachtung der Zusammenhänge zwischen den Parametern t_{aqf} und λ_s für den Einfluss auf die Ergebnisgröße T_{365} .



(b) Detailbetrachtung der Zusammenhänge zwischen den Parametern λ_s und v_f für den Einfluss auf die Ergebnisgröße T_{365} .

Abb. 4.21 Detailbetrachtung der Zusammenhänge zwischen den Parameterkombinationen mit den größten Sobol'-Indizes zweiter Ordnung

Die Grundwasserströmung wird in den Modellen durch die Parameter t_{aqf} und v_f charakterisiert. Anhand der Sobol'-Indizes erster Ordnung in Abb. 4.18 wurde ersichtlich, dass die Darcy-Geschwindigkeit v_f in der Untersuchung nur etwas weniger als die Hälfte des Einflusses im Vergleich zum vom Grundwasser umströmten Anteil der Sonde t_{aqf} hat. Bei den Sobol'-Indizes zweiter Ordnung (Abb. 4.20) zeigt sich für die Kombination der beiden Parameter ein kleinerer Sobol'-Index als für die zuvor näher betrachteten Parameterkombinationen. Dennoch hebt sich der Sobol'-Index für t_{aqf} und v_f vom Großteil der anderen Parameter ab. Der Zusammenhang dieser beiden Parameter wurde ebenfalls näher betrachtet und ist in Abb. 4.22 dargestellt. Wie es durch die Modellierung zu erwarten ist, zeigt sich ein Einfluss durch die Grundwasserströmung nur dann, wenn beide Parameter einen Wert größer 0 haben. Für die Erstellung der Grafik wurden die Parameterwerte der beiden Parameter zunächst so variiert, dass die Werte gleichmäßig über den Wertebereich verteilt sind. Dadurch ergibt sich für den Parameter v_f nach dem kleinsten Wert $v_f = 0 \text{ ms}^{-1}$ als nächst größerer Wert $v_f = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. Anhand der Kurven zeigt sich ein verhältnismäßig großer Einfluss auf die Temperatur bei Änderung der Darcy-Geschwindigkeit von $v_f = 0 \text{ ms}^{-1}$ zu $v_f = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. Die Kurven für größere Werte von v_f liegen hingegen vergleichsweise nah beieinander. Da entsprechend der Definition des Wertebereichs und der zugehörigen Verteilung in Abschn. 4.1.2 ein Großteil der Werte für v_f jedoch kleiner als $3 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ ist, wurden für v_f auch kleinere Werte berechnet. Diese sind in Abb. 4.22 als rot gestrichelte Linien eingezeichnet. Im Unterschied zu den durchgezogenen blauen Linien ist die Änderung des Wertes für v_f zwischen den einzelnen Kurven nicht gleichmäßig. Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass ab einem entsprechenden Wert der Darcy-Geschwindigkeit der wesentliche Einfluss auf die Temperatur durch Veränderung des Anteils der Sonde, welcher vom Grundwasser umströmt wird, verursacht wird.

Die hier berechneten Modelle für die Sensitivitätsanalyse enthalten eine einzelne EWS, welche in der Regel nur bei Einfamilienhäusern oder kleineren Gebäuden zum Einsatz kommen. Oftmals benötigen größere Gebäude und vor allem Geothermieanlagen im Quartiersbereich mehrere Sonden bzw. ganze Sondenfelder. Bei der Auslegung solcher Anlagen gilt es zu berücksichtigen, wie sich Sonden gegenseitig beeinflussen und negative Einflüsse unter benachbarten Sonden zu vermeiden. Die VDI 4640 (2020) schlägt bei der Auslegung von Geothermieanlagen bis 30 kW einen Mindestabstand von 6 m zwischen benachbarten Sonden vor. Für den Abstand zu Sonden auf benachbarten Grundstücken soll ein Mindestabstand von 10 m eingehalten werden. Um Sensitivitäten der hier betrachteten Parameter auch bezüglich benachbarter EWS zu untersuchen, wurden Auswertungen für die Untergrundtemperaturen an Punkten neben der Sonde betrachtet. Diese Punkte sind in Abb. 4.23 dargestellt. Während die Punkte P_{90} , P_{180} , P_{270} und P_{360} alle einen Abstand von 6 m zur Sonde haben, liegen die Punkte P_{0-50} und P_{0-100} im Abstand von 50 m und 100 m zur Sonde. An allen Punkten wurde die Untergrundtemperatur T_s in einer Tiefe von $-35,5 \text{ m}$ aus den mit OGS berechneten 3D-Modellen ausgewertet. Mittels dieser Ergebnisse wurde in der zuvor beschriebenen Vorgehensweise ein Proxy-Modell für jeden Punkt trainiert und Sobol'-Indizes für die Parameter berechnet. Die Ermittlung erfolgte hier vergleichbar zu den vorherigen Auswertungen für die mittlere betrag-

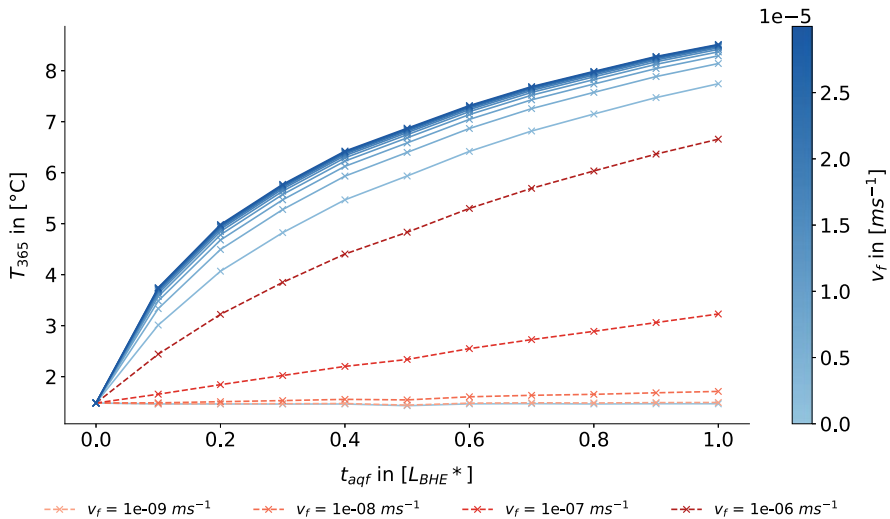


Abb. 4.22 Detailbetrachtung der Zusammenhänge zwischen den Parametern t_{aqf} und v_f für den Einfluss auf die Ergebnisgröße T_{365} . Die blauen Linien kennzeichnen 11 Werte von v_f , welche gleichmäßig über den Wertebereich verteilt sind. Die rot gestrichelte Linien kennzeichnen darüber hinaus berechnete Werte von v_f , wie in der Legende angegeben

mäßige Abweichung der Untergrundtemperatur zu einem Referenzexperiment $\bar{\delta}_{T_s}$, welche entsprechend Gl. (4.1) berechnet wird und für die Untergrundtemperatur zum Zeitpunkt nach einem Jahr T_s^{365} . Durch den weitgehend homogenen Modellaufbau und die symmetrische Lage bezüglich der Strömungsrichtung des Grundwassers sind die Ergebnisse für die Punkte P_{90} und P_{270} identisch. Daher erfolgt lediglich eine Betrachtung der Ergebnisse für Punkt P_{90} . In einer ersten Auswertung hat sich herausgestellt, dass der Einfluss von T_{geo} an den Auswertepunkten so groß ist, dass anhand der Sobol'-Indizes keine differenzierte Betrachtung der Einflüsse der restlichen Parameter möglich ist, da alle übrigen Sobol'-Indizes nahe null sind. Da der Parameter T_{geo} im Modell letztlich die Anfangsbedingung für die später hier ausgewertete Temperatur T_s ist, ist der direkte Einfluss offensichtlich. Für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurde daher der Parameter T_{geo} nicht variiert, um die Einflüsse der anderen Parameter gegenüberstellen zu können. Die Auswertung an den Punkten P_{0-50} und P_{0-100} ließ keinen eindeutigen Rückschluss von Temperaturveränderungen aufgrund der EWS zu und brachte daher keine zusätzlichen Erkenntnisse über Einflüsse auf weiter entfernt liegende Punkte. In Abb. 4.24 sind die Sobol'-Indizes dargestellt, welche an den übrigen Auswertepunkten der Abb. 4.23 ermittelt wurden. Die größten Einflüsse zeigen sich hier vor allem durch die Grundwasserparameter t_{aqf} und v_f . An den Punkten P_{360} in Strömungsrichtung und P_{180} entgegen der Strömungsrichtung zeigt die Darcy-Geschwindigkeit den größten Einfluss im Vergleich der Parameter. Am Punkt P_{90} , welcher bezüglich der Strömungsrichtung des Grundwassers seitlich der Sonde liegt, ist hingegen t_{aqf} der einflussreichste Parameter. Ähnlich wie in der Auswertung für die Fluidtemperatur in der Sonde (Abb. 4.18),

Abb. 4.23 Schematische Darstellung der Lage der Auswertepunkte im FE-Modell der Sensitivitätsanalysen (Draufsicht, nicht maßstäbl.). Die Punkte P_{90} , P_{180} , P_{270} und P_{360} haben einen Abstand von 6 m zur Sonde. P_{0-50} hat einen Abstand von 50 m und P_{0-100} einen Abstand 100 m zur Sonde

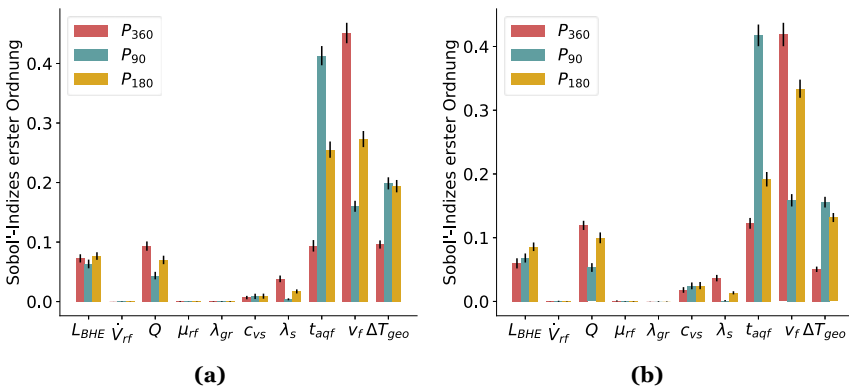
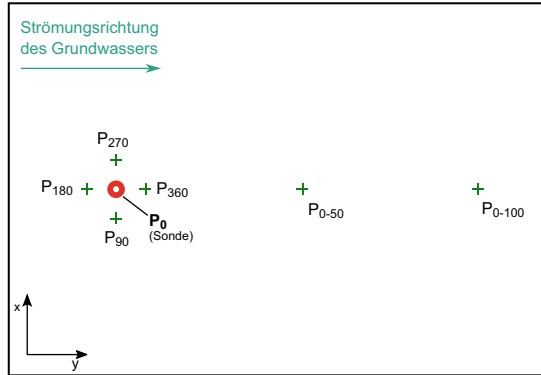


Abb. 4.24 Sobol'-Indizes erster Ordnung der Parameter der Sensitivitätsanalyse an benachbarten Punkten zur EWS (a) für die Auswertung der mittleren betragsmäßigen Abweichung der Untergrundtemperatur $\bar{\delta}_{T_s}$ und (b) bei Auswertung der Untergrundtemperatur zum Ende des Jahresverlaufes T_s^{365}

zeigt t_{aqf} hier einen mehr als doppelt so großen Sobol'-Index wie v_f . Im Unterschied zur Betrachtung der Einflüsse auf die Fluidtemperatur in der Sonde, zeigt sich hier der geothermische Gradient ΔT_{geo} einflussreicher gegenüber den anderen Parametern. Genauso hat auch die spezifische Wärmekapazität c_{vs} einen größeren Einfluss. In der Betrachtung von T_s zum Ende des Jahresverlaufes in Abb. 4.24b liegt der Sobol'-Index von c_{vs} an P_{90} seitlich der Sonde und P_{180} entgegen der Strömungsrichtung vor dem der Wärmeleitfähigkeit λ_s . Wenig einflussreich zeigen sich in den Ergebnissen die Parameter \dot{V}_{rf} , μ_{rf} und λ_{gr} .

Der Einfluss von t_{aqf} ist zum einen zu begründen durch den positiven Einfluss eines größeren vom Grundwasser umströmten Anteils der Sonde, wie bereits an den zuvor vorgestellten Ergebnissen zu sehen ist. Andererseits zeigt sich der große Einfluss in dieser Untersuchung auch aufgrund der Position der Auswertepunkte. Die absolute Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches bestimmt sich im Modell aus dem Wert von t_{aqf} und dem Wert von L_{BHE} . Da die Auswertepunkte

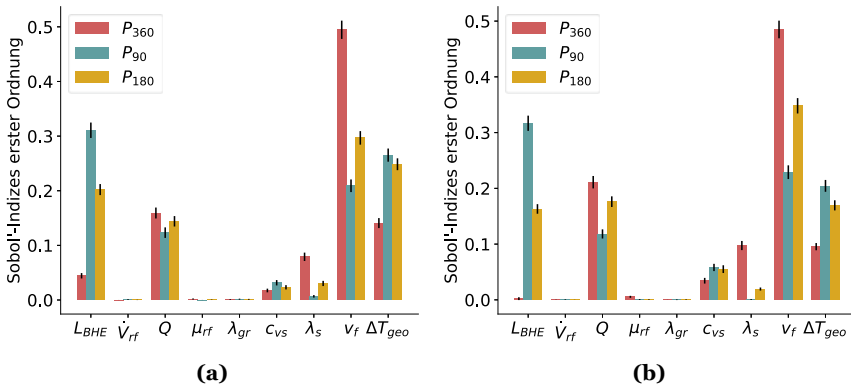


Abb. 4.25 Sobol'-Indizes erster Ordnung der Parameter der Sensitivitätsanalyse an benachbarten Punkten zur EWS bei $t_{aqf} = 0,25 L_{BHE}^*$ (a) für die Auswertung der mittleren betragsmäßigen Abweichung der Untergrundtemperatur $\bar{\delta}_{T_s}$ und (b) bei Auswertung der Untergrundtemperatur zum Ende des Jahresverlaufes T_s^{365}

hier alle in einer Tiefe von 35,5 m unter der GOK liegen, erreicht die Grundwasserströmung die Auswertepunkte bei entsprechenden Werten für t_{aqf} und L_{BHE} . Abb. 4.25 zeigt ebenfalls die Untersuchung des Einflusses auf die Untergrundtemperatur, mit dem Unterschied, dass der Parameter t_{aqf} konstant auf $0,25 L_{BHE}^*$ gesetzt wurde, sodass immer eine Grundwasserströmung an den Messpunkten vorhanden ist. Beim Vergleich mit der vorherigen Auswertung in Abb. 4.24 zeigen sich vor allem Änderungen bezüglich des Parameters L_{BHE} . Die Sobol'-Indizes der restlichen Parameter haben sich relativ zueinander nicht wesentlich verändert. Interessant ist bei dem Parameter L_{BHE} , dass dieser am Punkt P_{360} für die Auswertung von T_s^{365} kaum noch einen Einfluss zeigt und auch bei $\bar{\delta}_{T_s}$ der Sobol'-Index im Verhältnis geringer ist. Dies spricht dafür, dass der zuvor ermittelte Einfluss sich aufgrund des Zusammenhangs mit dem Parameter t_{aqf} ergab. Andererseits besteht auch hier noch ein Zusammenhang zwischen L_{BHE} und t_{aqf} , da sich $t_{aqf} = 0,25 L_{BHE}^*$ als relativer Wert mit $L_{BHE}^* = L_{BHE} - 15$ m auf die jeweilige Sondenlänge bezieht. Außerdem fällt auf, dass für den Punkt P_{90} der Parameter L_{BHE} in dieser Auswertung den größten Sobol'-Index hat.

4.1.5 Zusammenfassung und Diskussion

Die Sensitivitätsanalyse liefert eine Untersuchung der Relevanz von 20 Parametern für die Dimensionierung von EWS in der oberflächennahen Geothermie. Eine sorgfältige Auswahl von Wertebereichen für die Parameter, welche die Region Deutschland repräsentieren, bildet die Basis der Untersuchung. Für möglichst realitätsnahe Ergebnisse zum Vergleich der Parametereinflüsse, wurden diese auf Grundlage numerischer Simulationen in OGS generiert. Bei dem betrachteten Simulationszeitraum von einem Jahr konnten jahreszeitliche Einflüsse der Parameter vollständig

abgebildet werden. Ergebnis der Dimensionierung einer EWS ist die Performance dieser im Betrieb der Geothermieanlage. Für die Analysen wird der Einfluss auf die Performance anhand der Änderung der mittleren Fluidtemperatur bemessen. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Werte betrachtet. Zum einen die Temperatur am Ende des Jahresverlaufes T_{365} und zum anderen als integrales Maß die mittlere betragsmäßige Temperaturänderung bezüglich einer Berechnung mit Referenzwerten $\bar{\delta}_T$. Die Auswertung mit $\bar{\delta}_T$ schien zunächst naheliegend, da die Effekte der Parameter über den Jahresverlauf nicht gleich sind und so der Einfluss integral über das Jahr erfasst werden kann. Bei der Betrachtung der Parametersensitivitäten über den gesamten Jahreszeitraum zeigte sich ein starker Einfluss durch die Sommermonate, welche in dieser Untersuchung durch geringen Sondenbetrieb gekennzeichnet sind. Anhand von Zeiten geringer Sondenauslastung lässt sich jedoch schwer eine Aussage über die Performance treffen. Diese haben in der gemittelten Betrachtung eine Verzerrung der Ergebnisse zur Folge. Mit dem Ziel in der Sensitivitätsanalyse, die Relevanz der Parameter im Auslegungsprozess zu betrachten, ist daher die Verwendung von T_{365} aussagekräftiger.

In einer ersten Gegenüberstellung wurden für ein Parameterscreening 461 OGS-Modelle mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen berechnet und mit zwei Verfahren Sensitivitäten ausgewertet. Mittels der Ergebnisse konnten neun weniger relevante Parameter für die eigentliche Sensitivitätsanalyse ausgeschlossen und der Rechenaufwand damit verringert werden. Für die Auswertung von Parameterkonstellationen in der Sensitivitätsanalyse nach Sobol' wurden Proxy-Modelle verwendet. Diese wurden auf Basis von 2000 OGS-Berechnungen mit dem Verfahren der Gauß-Prozess-Regression erstellt und verkürzten die benötigte Rechenzeit enorm. Die berechneten Sobol'-Indizes basieren auf der Auswertung von 393.216 Parametervariationen. Diese können mit dem Proxy-Modell innerhalb weniger Minuten ermittelt werden. Bei den erwähnten 2000 OGS-Berechnungen lag die mittlere Rechendauer bei der verwendeten Hardware bei 4,2 h pro Modell. Ausgehend von diesem Wert müssten für die gleiche Anzahl an Parametervariationen in numerischen Simulationen in OGS knapp 190 Modelle parallel berechnet werden, um die Simulationen innerhalb eines Jahres abschließen zu können. Andererseits geht durch die Verwendung des Proxy-Modells auch ein gewisses Maß an Genauigkeit verloren, wie zu Beginn des Abschn. 4.1.4 dargestellt.

Im Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigte sich der größte Einfluss auf die Performance der Sonde durch den Parameter T_{geo} . Dieser repräsentiert die Temperaturbedingungen im geologischen Modell, welche im Wesentlichen auf die ungestörte Untergrundtemperatur zurückzuführen sind. In der Praxis ist die Wahl am Standort einer zu planenden Geothermieanlage bezüglich unterschiedlicher Temperaturbedingungen sehr begrenzt bzw. in der Regel nicht vorhanden. Eine Konsequenz des Ergebnisses sollte jedoch sein, dass der Ermittlung der Temperaturbedingungen am Standort ein besonderes Augenmerk zukommt. Dies kann neben der sorgfältigen Erkundung von ungestörten Untergrundtemperaturen zusätzlich durch eine detaillierte Modellierung in der Auslegung realisiert werden, die gegebenenfalls am Standort ausgeprägte saisonale Einflüsse berücksichtigt. Ein weiterer Aspekt der Temperaturbedingungen im Untergrund ist der geothermische Gradient ΔT_{geo} . Dieser zeigte im

Vergleich der Parameter jedoch einen nachrangigen Einfluss auf die mittlere Fluidtemperatur in der EWS. Dies ist vermutlich im Wesentlichen durch die geringe Tiefe der hier betrachteten oberflächennahen Anlagen zu begründen.

Neben T_{geo} hatte in der Untersuchung der Jahresbedarf an Wärmeenergie Q den zweitgrößten Einfluss auf den Betrieb der Sonde. Deshalb sollten auch vonseiten der Haustechnik bei der Planung möglichst genaue Bedarfe ermittelt und gegebenenfalls entsprechende Sicherheiten eingeplant werden. Einen wichtigen Punkt in diesem Zusammenhang stellen für zukünftige Betrachtungen auch Kühlbedarfe dar. Gerade aufgrund der mittlerweile unverkennbaren klimatischen Veränderungen steigt auch die Relevanz hierfür. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Nutzung von geothermischen Anlagen zur Kühlung nicht berücksichtigt. Prinzipiell ist bis zu einem bestimmten Maß von einem positiven Einfluss durch die Kühlung auszugehen, da sie einen regenerierenden Effekt auf die Temperaturressourcen im Untergrund in der Umgebung der EWS hat. Sind Energiebedarfe für Kühlung und Heizung vorhanden, ist daher in einer Sensitivitätsanalyse von einer kompensierenden Wirkung hinsichtlich des Parametereinflusses durch die gegensätzlichen Bedarfe und daher in Summe von einem geringeren Einfluss des Parameters Q auszugehen. Denkbar wäre bei der Berücksichtigung von Kühlung auch eine Veränderung der Bedeutung von Parametern, die den Wärmetransport und die Wärmespeicherung im geologischen Untergrund charakterisieren. Insgesamt kann durch die Berücksichtigung von Kühlbedarfen auch die integrale Betrachtung der Parametereinflüsse über Größen wie $\bar{\delta}_T$ interessanter sein als für die bisherige Untersuchung.

Der Parameter t_{aqf} für die Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches bzw. des Anteils der Sonde, welcher vom Grundwasser umströmt wird, zeigte den drittgrößten Einfluss auf die Performance der Sonde. Die Darcy-Geschwindigkeit des Grundwassers v_f hatte im Vergleich hingegen nur einen Einfluss, der etwas unter der Hälfte des Sobol'-Index von t_{aqf} lag. Für die Dimensionierung sollte daher hinsichtlich der Performance der EWS der Ermittlung der Bereiche, in denen eine Grundwasserströmung an der Sonde auftritt, ein besonderes Interesse gelten. Weniger entscheidend war hier die Darcy-Geschwindigkeit der Grundwasserströmung. In einer isolierten Betrachtung konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass bereits Darcy-Geschwindigkeiten im unteren Bereich des betrachteten Wertebereichs ausreichen, um einen positiven Einfluss auf die EWS zu erlangen. Eine Erhöhung der Darcy-Geschwindigkeit hatte ab einem gewissen Wert keine wesentliche Verbesserung des positiven Einflusses mehr zur Folge. Wie zu erwarten, zeigte die Betrachtung der Parametereinflüsse auf die Untergrundtemperatur im Umfeld der Sonde ein anderes Bild. Im Vergleich zu anderen Parametern ist v_f hier vor allem in Strömungsrichtung sehr dominant. Insbesondere für größere Geothermieanlagen, wie beispielsweise für Quartiere, ist es im Rahmen der Auslegung oftmals notwendig, die Ausbreitung von Temperaturfahnen zu berücksichtigen, um beispielsweise benachbarte Sonden nicht zu beeinflussen oder Grenzen für Temperaturveränderungen im Umfeld der Sonde aufgrund geltender Regularien einzuhalten. Ist dies der Fall, hat die Ermittlung von Strömungsrichtung und Darcy-Geschwindigkeit ebenfalls eine große Bedeutung im Auslegungsprozess.

In der Betrachtung der Performance ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit λ_s vergleichbar mit v_f . Eine isolierte Gegenüberstellung dieser beiden Parameter sowie der Parameter λ_s und t_{aqf} zeigte, dass bei Vorliegen eines großen Wertes für den einen Parameter der Einfluss des anderen geringer ist. Dies ist damit zu begründen, dass alle drei Parameter eine Form des Wärmetransportes im Untergrund charakterisieren und daher in gewisser Weise ähnliche Effekte bezüglich der Performance der EWS zur Folge haben. Wenig einflussreich zeigten sich im Vergleich der elf Parameter vor allem c_{vs} für die spezifische volumetrische Wärmekapazität, die Viskosität des Sondenfluids μ_{rf} und der geothermische Gradient ΔT_{geo} .

Trotz der Beschränkung auf eine EWS in dieser Untersuchung ermöglichte die Betrachtung der Parametereinflüsse auf die Untergrundtemperatur in der Umgebung Rückschlüsse auf die Relevanz der Parameter hinsichtlich der Beeinflussung von benachbarten Sonden. Hierbei wurde der Parameter T_{geo} selbst vernachlässigt, da er aufgrund des direkten Einflusses keine differenzierte Auswertung der anderen Parametereinflüsse ermöglichte. In der Regel wird versucht, Sonden in einem Sondenfeld so anzuordnen, dass benachbarte Sonden senkrecht zur Strömungsrichtung liegen. In dieser Richtung zeigten sich, je nachdem, ob der Parameter t_{aqf} berücksichtigt wurde oder nicht, der Parameter t_{aqf} und die Sondenlänge L_{BHE} am einflussreichsten. Lässt sich die Positionierung von benachbarten Sonden in Richtung der Grundwasserströmung nicht vermeiden, so hat in der Untersuchung die Darcy-Geschwindigkeit v_f den größten Einfluss gezeigt.

Bei Ergebnissen einer Sensitivitätsanalyse ist zu beachten, dass sie nur im Rahmen der getroffenen Modellannahmen und nur für die definierten Wertebereiche gültig sind. Die Bedingungen der Untersuchung wurden so gewählt, dass eine möglichst große Allgemeingültigkeit erreicht werden kann. Im Ergebnis konnten basierend darauf Parametersensitivitäten bezüglich der Performance von EWS herausgearbeitet werden, die hilfreiche Informationen für die Auslegung von EWS im oberflächennahen Raum in der Praxis liefern. Nicht zu vergessen ist bei Betrachtung der vorgestellten Ergebnisse, dass es sich bei den elf Parametern in der Betrachtung mit Sobol'-Indizes bereits um die einflussreichsten Parameter handelt. Letztlich haben all diese Parameter eine Relevanz für die Dimensionierung einer EWS. Die Ergebnisse sollen keine Aufforderung sein, alle im Rahmen der Sensitivitätsanalyse als wenig einflussreich dargestellten Parameter zu vernachlässigen. So sollten beispielsweise auch Parameter wie die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials λ_{gr} , die im Vergleich eher im hinteren Mittelfeld der Sobol'-Indizes liegt, nicht außer Acht gelassen werden. Die Wahl thermisch verbesserter Hinterfüllmaterialien mit höheren Wärmeleitfähigkeiten ist definitiv zu empfehlen und eine sorgfältige Ausführung der Hinterfüllung unter keinen Umständen zu unterschätzen. Mit der Simulationsdauer konnte auch die Änderung der Parametereinflüsse in einem Jahreszyklus erfasst werden. Ein interessantes Ergebnis in weiterführenden Forschungen könnte die Betrachtung der Veränderung der Parametersensitivitäten über die gesamte Betriebsdauer einer EWS sein.

4.2 Numerische Unsicherheitsanalysen

In einem Benchmark zur Simulation mit OGS wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Simulation von TRT betrachtet (siehe Abschn. 6.1). Neben der im Mittelpunkt stehenden simulativen Betrachtung wurde dort auch die Auswertung der TRT, wie sie in der [VDI 4640 \(2020\)](#) beschrieben ist, untersucht. Diese wird genutzt, um über die Tiefe gemittelte Wärmeleitfähigkeiten aus TRT zu bestimmen. Neben dem Verlust an Information durch die Mittelung über die Tiefe zeigte sich eine Sensibilität der Auswertung gegenüber vom Anwender zu wählender Randbedingungen. Solche gemittelten Wärmeleitfähigkeiten werden häufig für die Dimensionierung von EWS verwendet. Die Abhängigkeit numerischer Ergebnisse von teilweise aus der Erfahrung vorzugebenden Randbedingungen stellt eine Unsicherheit in der Auslegung von EWS dar. Doch dabei handelt es sich nur um ein Beispiel für eine Quelle von Unsicherheiten. Neben dieser lassen sich einige weitere Ursachen finden, die Unsicherheiten für die Auslegung von Geothermieanlagen darstellen können. Dies äußert sich im Wesentlichen so, dass Parameterwerte nicht exakt bestimmt werden können, sondern in einem gewissen Intervall, dem Unsicherheitsbereich, liegen. Eine Berücksichtigung dieser Unschärfen im Planungsprozess kann durch eine Unsicherheitsanalyse erfolgen.

Unsicherheitsanalysen, auch Unsicherheitsquantifizierung genannt, dienen dazu, die Summe der Unsicherheiten durch die Eingangsgrößen auf eine Ergebnisgröße zu betrachten. Letztlich ist die Unsicherheitsanalyse verwandt mit der Sensitivitätsanalyse und beruht auf einer ähnlichen Vorgehensweise. Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchung ist es, beispielhaft darzustellen, wie eine Unsicherheitsanalyse im Auslegungsprozess einer Geothermieanlage aussehen kann und exemplarisch zu erarbeiten, welche Unsicherheiten sich bei der Dimensionierung einer solchen Anlage ergeben können. Diese basiert auf numerischen Simulationen in OGS, wie die in Abschn. 4.1 vorgestellte Sensitivitätsanalyse. Näheres zur angewendeten Methodik wird in Abschn. 4.2.1 erläutert. Im Gegensatz zur Sensitivitätsanalyse bezieht sich die Unsicherheitsanalyse immer auf die Betrachtung eines konkreten Standortes. Da es sich um eine exemplarische Betrachtung handelt, die gleichzeitig auch methodischer Natur sein soll, wurde hier ein fiktiver Standort verwendet. Dieser wird in Abschn. 4.2.2 näher beschrieben. Die Unsicherheitsanalyse baut auf den Ergebnissen der zuvor vorgestellten Sensitivitätsanalyse auf und betrachtet die Unsicherheit der Parameter, die den größten Einfluss auf die Performance der EWS gezeigt haben. Welche Unsicherheitsbereiche für diese Parameter definiert wurden und wie diese ermittelt wurden, ist in Abschn. 4.2.3 erläutert. Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse werden in Abschn. 4.2.4 dargestellt sowie abschließend in Abschn. 4.2.5 zusammengefasst und diskutiert.

4.2.1 Methodik in der Unsicherheitsanalyse

Für die Durchführung einer Unsicherheitsanalyse gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Verbreitet ist die Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen, wie

sie beispielsweise [Watanabe et al. \(2010\)](#) in einer Unsicherheitsanalyse zu tiefen geothermischen Reservoirs verwenden. Die in diesem Abschnitt vorgestellte Untersuchung basiert ebenfalls auf Monte-Carlo-Simulationen und verfolgt einen Ansatz, der Ähnlichkeiten mit der unter Abschn. 4.1.1 vorgestellten Vorgehensweise bei den Sensitivitätsanalysen hat. Wie in der Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Variationen von Parameterwerten mit numerischen Simulationen in OGS berechnet, wobei die vorgestellte Python-Software genutzt wurde. Jede Variation der Parameterwerte entspricht hier einer möglichen Konstellation, die sich aufgrund der Unsicherheit der Eingangsparameter ergeben kann. Die Wertebereiche, innerhalb derer sich die Parameter für die Unsicherheitsanalyse bewegen, sind die Unsicherheitsbereiche, welche in Abschn. 4.2.3 definiert werden.

Um eine möglichst große Anzahl an Parametervariationen in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen auswerten zu können, wurden auch hier Proxy-Modelle mittels maschinellem Lernens durch das Verfahren der Gauß-Prozess-Regression erstellt. Das Training erfolgte mit Ergebnissen aus Simulationen in OGS, wie in der Sensitivitätsanalyse. Die Parameterkonstellationen wurden dafür mit einem LHS festgelegt. Mit dem Proxy-Modell kann eine Vielzahl an Parameterkonstellationen in kurzer Zeit ausgewertet und anhand der Ergebnisse die Unsicherheit bewertet werden.

Die Betrachtung der Unsicherheit erfolgt letztlich im Wesentlichen anhand der statistischen Verteilung der Ergebnisse. Wie in der Einleitung beschrieben, ist eine Unsicherheitsbetrachtung für EWS im oberflächennahen Raum vor allem dahingehend interessant, wie gut die Sonde dimensioniert ist. Dies wird, analog zur Sensitivitätsanalyse, anhand der Temperatur des Sondenfluids bemessen. Bei der Auswertung der Unsicherheitsanalyse ist ein interessanter Aspekt, ob unter Berücksichtigung der Unsicherheiten vorgeschriebene Grenzwerte noch eingehalten werden. Einzuhalten- de Grenzwerte beziehen sich für die Dimensionierung von EWS oft auf Temperaturuntergrenzen. Im Betrieb einer EWS fällt die Temperatur im Sondenfluid sowie im Untergrund innerhalb der ersten Jahre stärker ab und sinkt dann nur noch wenig bzw. erreicht eine Art statischen Zustand, der sich außer durch den Jahresverlauf des Sondenbetriebs nur wenig ändert. Für die Unsicherheitsanalyse ist daher die Betrachtung der Temperatur am Ende der Betriebsdauer am interessantesten. Nach [VDI 4640 \(2020\)](#) ist im Regelfall von einer Betriebsdauer von 50 Jahren auszugehen. Aufgrund der langen Berechnungsdauer für numerische Simulationen über einen Zeitraum dieser Größenordnung wurden für diese Betrachtung nur die ersten fünf Jahre simuliert, um die größten Änderungen der Temperatur zu berücksichtigen und gleichzeitig den Rechenaufwand zu beschränken. Ausgewertet wird die Unsicherheit dann anhand der Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde zum Zeitpunkt der niedrigsten Fluidtemperatur im fünften Jahr der Simulation T_{in}^{min} . Aufgrund der sich jährlich wiederholenden Heizkurve entspricht dies der niedrigsten Fluidtemperatur, die im Simulationszeitraum auftritt. Diese wird im OGS-Modell unabhängig von der Variation der Parameterwerte immer zum gleichen Zeitpunkt erreicht.

Die Auswertung der Unsicherheitsanalyse erfolgt hier auf zweierlei Wegen. Einerseits erfolgt eine Darstellung der Temperaturwerte in einer kumulativen Verteilungsfunktion, welche sich durch die Variation der Parameterwerte ergibt. Anhand dieser kann beispielsweise abgelesen werden, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist,

dass die minimale Fluidtemperatur über oder unter einem bestimmten Wert liegt. Andererseits erfolgt auch hier eine Auswertung mittels Sobol'-Indizes. Anhand der Sobol'-Indizes kann in der Unsicherheitsanalyse ermittelt werden, welche Parameter in welchem Maß die Unsicherheit der Ergebnisgröße verursachen und so können Unsicherheitsquellen abhängig von ihrem Einfluss auf die Ergebnisgröße unterschieden werden.

4.2.2 Modellierung eines fiktiven Standorts

Wie bereits erwähnt, wird in dieser Unsicherheitsanalyse ein fiktiver Standort untersucht. Das Simulationsmodell entspricht vom Aufbau dem unter Abschn. 4.1.2 beschriebenen Modell, welches in der Sensitivitätsanalyse verwendet wurde. Das Modell hat einen vereinfachten geologischen Aufbau, bei dem Materialparameter des Untergrundes im Modellgebiet konstant sind, mit Ausnahme der Grundwasserströmung. Für den fiktiven Standort wurde von einem durch Sandstein dominierten Untergrund ausgegangen. Die Temperaturbedingungen an der Oberfläche und im Untergrund sowie Grundwasserströmungen wurden an Bedingungen im Stadtgebiet Leipzig angelehnt. Basis der Untersuchung ist die Dimensionierung einer Sonde für diesen Standort mit der Software Earth Energy Designer (EED). Dabei wurde die Sonde für einen Jahresbedarf an Wärmeenergie von 11 MWh ausgelegt. Der Jahresbedarf an Wärmeenergie wurde sowohl in EED als auch in OGS über einen Jahresverlauf, mit Werten, die sich nur zum Monatswechsel ändern, berücksichtigt. Der Jahresverlauf entspricht dem, der für die Sensitivitätsanalyse in Abschn. 4.1.2 definiert und entsprechend auf den Bedarf von 11 MWh skaliert wurde. Abb. 4.26 zeigt den Verlauf der mittleren Fluidtemperatur für 50 Jahre Sondenbetrieb für diese Auslegung aus EED. Für die Betrachtung in EED wurden für den Standort eine mittlere Oberflächentemperatur von $8,8^{\circ}\text{C}$, eine mittlere Untergrundtemperatur von $10,6^{\circ}\text{C}$ und eine terrestrische Wärmestromdichte von $0,06\text{ Wm}^{-2}$ vorgegeben. In den Berechnungen mit OGS wurde die Oberflächentemperatur durch die in Abb. 4.27 dargestellte zeitlich veränderliche Temperatur definiert. Dabei handelt es sich um den Jahresverlauf, welcher in der Sensitivitätsanalyse verwendet und auf einen Jahresmittelwert von $8,8^{\circ}\text{C}$ skaliert wurde. Wie im Simulationsmodell zur Sensitivitätsanalyse wird die ungestörte Untergrundtemperatur als Anfangsbedingung über ein Temperaturprofil mit saisonaler Zone definiert. Dieses basiert auf den Werten der Oberflächentemperatur und einem geothermischen Gradienten, welcher sich aus Wärmeleitfähigkeit und terrestrischer Wärmestromdichte nach Gl. (4.11) ergibt. Aufgrund der niedrigen Oberflächentemperatur in Kombination mit der Anwendung des Temperaturprofils liegt die mittlere Untergrundtemperatur in der Modellierung in OGS etwas unter dem Wert der Berechnung mit EED. Für das OGS-Modell ergibt sich im Modellbereich eine mittlere Untergrundtemperatur von $9,9^{\circ}\text{C}$ und im Bereich der ersten 100 m unter GOK eine mittlere Temperatur von $9,3^{\circ}\text{C}$.

Ein weiterer Unterschied zwischen der Berechnung mit EED und der Simulation in OGS liegt in der Berücksichtigung von Grundwasserströmungen. Dies ist nur in OGS möglich. Im OGS-Modell wurde ein vom Grundwasser durchströmter Be-

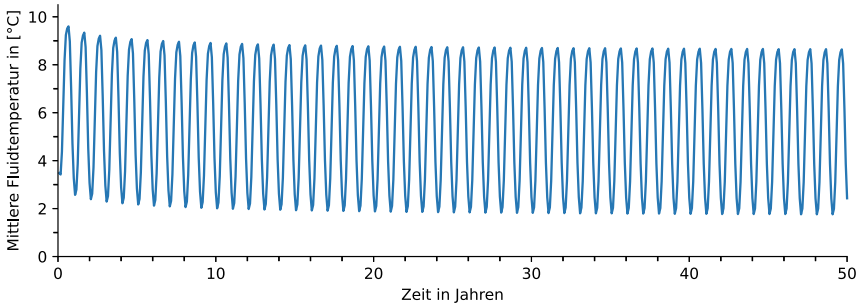


Abb. 4.26 Mittlere Fluidtemperatur in der EWS am fiktiven Standort der Unsicherheitsanalyse aus der Berechnung mit EED

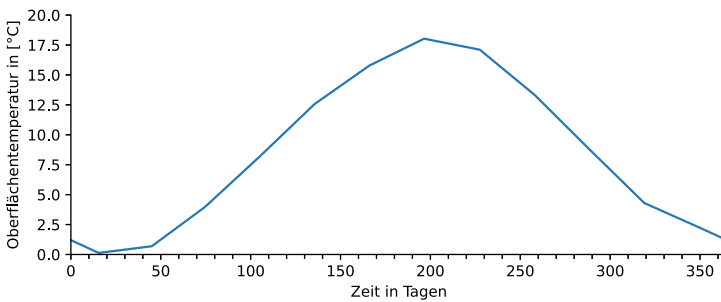


Abb. 4.27 Referenzverlauf der Oberflächentemperatur im OGS-Modell für die Unsicherheitsanalyse

reich mit einer Mächtigkeit von 30 m angenommen. Die Lage wurde auf Basis von Grundwassergleichen der Region Leipzig mit einem Grundwasserstand von 17,5 m unter GOK angenommen (Stadt Leipzig Amt für Umweltschutz, 2017b). Abb. 4.28 zeigt einen Vergleich der mittleren Fluidtemperaturen in den ersten fünf Jahren aus der Berechnung mit EED und OGS. Bei den dargestellten Temperaturen aus EED handelt es sich um monatliche Werte. Die Werte aus OGS sind hingegen täglich aufgelöst. Neben den Fluidtemperaturen ist der Auswertzeitpunkt für die Fluidtemperatur T_{in}^{min} in der Grafik gekennzeichnet. Weitere Kennwerte der Modelle können Tab. 4.4 im folgenden Abschnitt entnommen werden.

4.2.3 Definition von Unsicherheitsbereichen

Für die Unsicherheitsanalyse wurden zwölf Parameter untersucht. Dabei handelt es sich um die elf Parameter, welche sich in der Sensitivitätsanalyse als relevant für die Performance der EWS erwiesen haben. Zusätzlich erfolgt hier auch die Betrachtung des Parameters z_{aqf} für die Tiefe, in der die vom Grundwasser durchströmte Schicht liegt. Aufgrund des kleineren Wertebereiches für z_{aqf} und t_{aqf} entstehen hier kei-

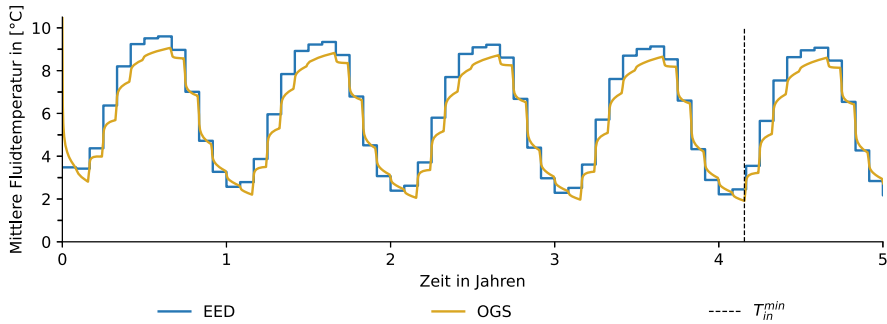


Abb. 4.28 Mittlere Fluidtemperatur in der EWS aus der Berechnung mit EED und OGS bei Verwendung der in der Sondendimensionierung angenommenen Parameterwerte

Tab. 4.4 Unsicherheitsbereiche und Referenzwerte für die Unsicherheitsanalyse.

Parameter	Einheit		Wertebereich		
			Min	Referenz	Max
L_{BHE}	m		99	100	101
λ_{gr}	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$		1,76	2	2,2
μ_{rf}	$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$		0,00293	0,00514	0,00884
\dot{V}_{rf}	m^3s^{-1}		$7,03 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$7,77 \cdot 10^{-4}$
Q	kWh	Szen. 1:	9669	11000	11682
		Szen. 2:	7333	11000	14667
λ_s	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$		1,9	2,5	4,6
c_{vs}	$\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$		$1,8 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$
t_{aqf}	-*		0,2	0,25	0,3
z_{aqf}	-*		0,025	0,05	0,06
v_f	m s^{-1}		$1,7 \cdot 10^{-11}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
ΔT_{geo}	K m^{-1}		0,019	0,024	0,029
T_{geo}	K^{**}		-0,5	0	0,5

* Relativer Wert bezogen auf die um 15m reduzierte Länge der EWS L_{BHE} *

** Parameter bezieht sich auf die Änderung der in Abb. 4.27 dargestellten Kurve

ne Konflikte in der Modellierung, wie diese in der Sensitivitätsanalyse aufgetreten sind (siehe auch Abschn. 4.1.3). Für alle Parameter wurde ein Unsicherheitsbereich ermittelt. Dabei handelt es sich um den Wertebereich, in dem der wahre Parameterwert liegt, welcher jedoch nicht oder nur mit größerem Aufwand genauer bestimmt werden kann. Die Bereiche sind in Tab. 4.4 dargestellt. Die Parameterbezeichnungen entsprechen den für die Sensitivitätsanalyse in Abschn. 4.1.2 Tab. 4.1 vorgestellten. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, wurde die EWS am betrachteten Standort zuvor in EED dimensioniert. Die in der Dimensionierung angewendeten Werte sind in der Tab. 4.4 als Referenzwerte gekennzeichnet.

Bei dem Unsicherheitsbereich für die Sondenlänge L_{BHE} handelt es sich um eine Annahme, die als Messabweichung betrachtet werden kann. Da das Ablängen in der Regel vom Hersteller der Sondenrohre übernommen wird, ist hier nur von geringen Messungenauigkeiten auszugehen.

Beim Hinterfüllmaterial wurde von der Verwendung von thermisch verbesserten Materialien ausgegangen. Deren Wärmeleitfähigkeit wird mit $\lambda_{gr} = 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bis $\lambda_{gr} = 2,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ angegeben (Stober und Bucher, 2014). Der untere Wert für λ_{gr} repräsentiert den Fall einer fehlerhaften Hinterfüllung der Sonde. Fehler in der Hinterfüllung können einerseits durch eine unsaubere Ausführung bei der Installation entstehen. Stober und Bucher (2014) schreiben beispielsweise von Fehlern durch Verwendung eines zu großen Wassergehaltes beim Anmischen der Suspension zugunsten einer besseren Pumpbarkeit. Andererseits können sich durch Gegebenheiten im Untergrund Fehler ergeben, beispielsweise durch Verlust der Hinterfüllung oder auch durch Frost im Bereich der Hinterfüllung. Die genannten Fehler wirken sich durch einen schlechteren Wärmeübergang im Bereich der Hinterfüllung aus. In der Modellierung der Unsicherheit wurde daher davon ausgegangen, dass bis zu 15 % des Hinterfüllraumes der Sonde nicht mit Hinterfüllmaterial gefüllt sind bzw. kein direkter Kontakt zwischen Gestein und Hinterfüllmaterial besteht. Dabei wurde davon ausgegangen, dass 10 % des fehlerhaften Bereiches mit Grundwasser gefüllt sind und 5 % mit Luft oder luftähnlichen Gasgemischen. Mit einer einfachen Interpolation der Wärmeleitfähigkeit über die Mengenanteile wurde der Fehler in Form einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit λ_{gr} abgeschätzt.

Der Wertebereich, welcher für die Viskosität μ_{rf} angesetzt wurde, basiert auf Herstellerangaben für ein handelsübliches Sondenfluid aus einem Wasser-Glykol-Gemisch (27 %). Die Unsicherheit bezieht sich hierbei auf Viskositätswerte, die sich aufgrund der veränderlichen Fluidtemperatur im Sondenbetrieb ergeben können. Als unterer Grenzwert wurde hier eine Temperatur von -5°C gewählt. Diese Temperatur ist nach VDI 4640 (2020) die untere Grenztemperatur, die bei Spitzenlast kurzzeitig erreicht werden darf. Die obere Grenze wurde bei 20°C angesetzt. Die Durchflussrate \dot{V}_{rf} wurde für die Untersuchung mit einer angenommenen Unsicherheit von $\pm 5\%$ belegt. Schwankungen sind hier beispielsweise aufgrund der zuvor erwähnten temperaturabhängigen Viskositätsänderung des Sondenfluids vorstellbar oder auch bei Verwendung einer modulierenden Wärmepumpe.

Bezüglich des Jahresbedarfs an Wärmeenergie Q wurden zwei Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario, im Folgenden als *Szenario 1* bezeichnet, wurde eine Unsicherheit des Bedarfs aufgrund von klimatischen Schwankungen betrachtet. Hierbei erfolgt eine Betrachtung der Heiztage für die Jahre 2011 bis 2021 für Leipzig, welche vom IWU herausgegeben werden. Im langjährigen Mittel (2002 bis 2021) lag die Anzahl der Heiztage bei 252,7 Tagen. Für die Modellierung der Unsicherheit wurde die maximale und die minimale prozentuale Abweichung der Heiztage von der mittleren Anzahl der Heiztage betrachtet und auf den Jahreswärmeenergiebedarf umgelegt. Die Schwankung lag hierbei bei $-12,1\%$ und $+6,2\%$. Im zweiten Szenario, im Folgenden als *Szenario 2* bezeichnet, wurde eine größere Unsicherheit angenommen, die sich durch einen Nutzungswechsel der Anlage, wie beispielsweise neue Bewohner bei Wohngebäuden, begründen könnte. Dabei wurde von einer

möglichen Änderung von $\pm 33,33\%$ ausgegangen. Diese ist angelehnt an die Angabe von 1200 bis 2400 Jahresvolllaststunden in der [VDI 4640 \(2020\)](#), welche dort als Anhaltspunkt für die Auslegung von Geothermieanlagen bis 30 kW Heizleistung genannt werden.

Auch die Unsicherheitsbereiche für die Wärmeleitfähigkeit λ_s und die spezifische volumetrische Wärmekapazität c_{vs} im geologischen Untergrund basieren auf Angaben in der [VDI 4640 \(2020\)](#). Dort werden die Kennwerte bereits als Wertebereiche angegeben. Liegt also in der Planungsphase einer Geothermieanlage lediglich Kenntnis darüber vor, welche Gesteinstypen am Standort vorkommen, so bleibt dennoch die Verantwortung bei der planenden Person, einen Wert aus den in der Literatur angegebenen Wertebereichen auszuwählen. Daher wurden die dort angegebenen Wertebereiche als Unsicherheitsbereich angenommen.

Die genaue Lage im Untergrund und die Mächtigkeit der vom Grundwasser durchströmten Bereiche kann auf Basis von Grundwassergleichenkarten und dem geologischen Schichtaufbau ermittelt werden. Bei den Grundwassergleichen handelt es sich um Werte, die zwischen Messstellen interpoliert werden. Die Mächtigkeit des Grundwasserkörpers kann anhand der Lage des nächsten darunter liegenden Grundwassernichtleiters oder -hemmers abgeschätzt werden, welcher die Grundwasser-sole bildet und ist nicht, wie hier idealisiert modelliert, konstant im Modellgebiet ([Höiting und Coldewey, 2013](#)). Die Mächtigkeit kann daher nur bedingt für den gesamten Betrachtungsraum genau ermittelt werden. Neben der Unsicherheit aufgrund der Interpolation zwischen Grundwassermessstellen können sich Grundwasserstände über die Jahre auch ändern und so die Lage und Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches verändern. Diese Quellen für Unsicherheiten werden hier mit einem Unsicherheitsbereich von ± 5 m berücksichtigt. Die Unsicherheit für den Parameter z_{aqf} , der die Tiefenlage des vom Grundwasser durchströmten Bereiches im Modell definiert, wurde hingegen auf Basis von Daten zur Veränderung von Grundwasserständen im Zeitraum von 1991 bis 2017 in der Region Leipzig abgeschätzt ([Stadt Leipzig Amt für Umweltschutz, 2017a](#)). Neben der Lage und Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches, wird auf Basis der Grundwassergleichen ebenfalls ermittelt, in welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit Grundwasser am Standort strömt. Für die Simulation in OGS wird die Geschwindigkeit des Grundwassers mit der Darcy-Geschwindigkeit definiert. Diese berechnet sich nach Gl. (4.9) aus dem Produkt von Grundwassergradient und dem Durchlässigkeitsbeiwert. Der Grundwassergradient wurde für den Standort mittels einer Grundwassergleichenkarte für Leipzig mit $i = 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{m}}$ ermittelt. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist eine Größe, welche in der Literatur ebenfalls durch Wertebereiche angegeben wird. Diese erstrecken sich über mehrere Zehnerpotenzen und werden nur grob in Arten von Lockergesteinen kategorisiert. Der Unsicherheitsbereich für die Darcy-Geschwindigkeit wurde daher auf Basis des Wertebereichs für den Durchlässigkeitsbeiwert in [Höiting und Coldewey \(2013\)](#) bei konstantem Grundwassergradient definiert. Die Werte für k_f lagen hierfür zwischen 10^{-4} und 10^{-8}ms^{-1} .

Die Anfangstemperatur im Modell wird durch die Parameter T_{geo} und ΔT_{geo} beschrieben. Die Ungenauigkeiten für diese beiden Parameter wurden auf Basis von

Erfahrungswerten angenommen, mit $\pm 0,5\text{K}$ für den Parameter T_{geo} und $\pm 0,5\text{Km}^{-1}$ für den Parameter ΔT_{geo} . Der Parameter für die Modelltemperatur T_{geo} definiert im Wesentlichen die ungestörte Untergrundtemperatur. Bei größeren Sondenanlagen wird diese oftmals gemeinsam mit dem geothermischen Gradienten im Rahmen eines TRT an einer Pilotbohrung ermittelt. Ungenauigkeiten können hier beispielsweise bei der Messung entstehen, wenn nach Fertigstellung der Probebohrung nicht lange genug gewartet wird (Rumohr, 2021a, b).

4.2.4 Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen

Die Berechnung der Ergebnisse für die Unsicherheitsanalyse erfolgte, wie beschrieben, in zwei Schritten. Zunächst wurden mittels numerischer Simulationen in OGS Ergebnisse für Variationen von Parameterwerten innerhalb der Unsicherheitsbereiche erzeugt, um damit ein Proxy-Modell zu erstellen. Die Genauigkeit des Proxy-Modells wurde, wie in der Sensitivitätsanalyse, mittels OGS-Ergebnissen überprüft. Hierfür wurden Werte aus einem LHS mit 100 Samples verwendet. Abb. 4.29 zeigt die Genauigkeit der Ergebnisse aus dem Proxy-Modell gegenüber den OGS-Berechnungen anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 und des RMSE. Trotz der geringeren Anzahl an Trainingspunkten zeigt das Proxy-Modell eine höhere Genauigkeit gegenüber dem für die Sensitivitätsanalyse vorgestellten Proxy-Modell (siehe auch Abschn. 4.1.4). Für die Untersuchung der Unsicherheit wurde mit dem Proxy-Modell ein LHS mit 100.000 Variationen der Parameterwerte ausgewertet. Anschließend wurde für die Darstellung des Ergebnisses die kumulative Verteilungsfunktion für die minimale Fluidtemperatur im fünften Jahr der Simulation T_{in}^{min} gebildet. Die kumulativen Verteilungsfunktionen geben hier die Wahrscheinlichkeit an, dass die Temperatur kleiner als der zugehörigen T_{in}^{min} -Wert auf der Abszisse (horizontal-

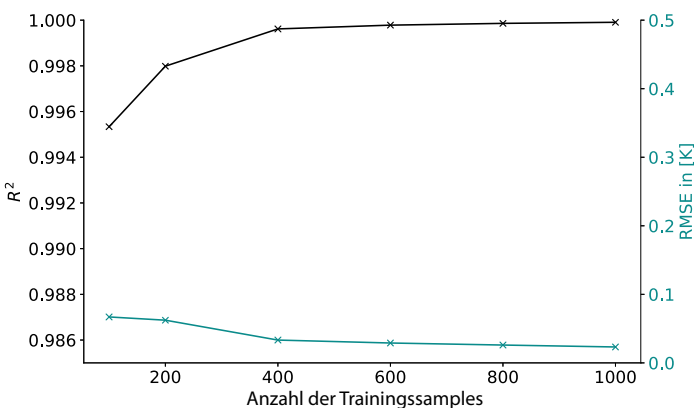


Abb. 4.29 Qualität des Proxy-Modells für Szenario 1 im Vergleich zu OGS-Ergebnissen anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme RMSE für die Ergebnisgröße T_{in}^{min} abhängig von der Anzahl der Trainingsamples

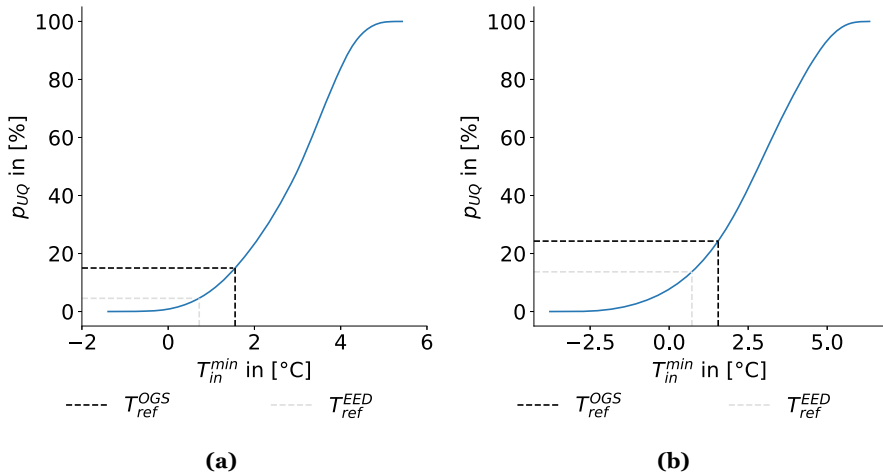


Abb. 4.30 Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse für T_{in}^{min} anhand der kumulativen Verteilungsfunktion (a) für *Szenario 1* und (b) für *Szenario 2* hinsichtlich der Unsicherheit des Jahresbedarfs an Wärmeenergie

le Achse) ist. Man kann diese Wahrscheinlichkeit anhand von den Kurven für die kumulative Funktion direkt an der Ordinate (vertikale Achse) ablesen. Diese kumulativen Verteilungsfunktionen sind für beide Szenarien der Auswertung in Abb. 4.30 dargestellt. In die Grafiken ist außerdem die Temperatur T_{ref}^{EED} eingezeichnet. Dabei handelt es sich um die minimale Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde im fünften Jahr, die für die Auslegung mit EED berechnet wurde. Da in EED nur ein Temperaturverlauf für die mittlere Fluidtemperatur ermittelt wird, wurde die benötigte Vorlauftemperatur mittels der Annahme einer Temperaturspreizung von 3 K zwischen Vor- und Rücklauftemperatur des Sondenfluids gebildet. Des Weiteren tritt die minimale Fluidtemperatur in EED etwas früher im zeitlichen Verlauf auf (siehe 4.28). Daher wurde diese abweichend zu den Simulationen in OGS dort ausgewertet. Die Temperatur T_{ref}^{OGS} in den Grafiken kennzeichnet hingegen die minimale Fluidtemperatur T_{in}^{min} , die sich mit den Parameterwerten der EED-Auslegung in der Simulation mit OGS ergibt. Die Temperatur T_{ref}^{EED} liegt bei 0,72 °C und die Temperatur T_{ref}^{OGS} bei 1,55 °C. Anhand der Werte an der Ordinate kann in der Grafik abgelesen werden, wie wahrscheinlich es ist, dass die jeweiligen Ergebniswerte T_{in}^{min} unterschritten werden. Die Unsicherheit p_{UQ} gibt also die Wahrscheinlichkeit an, dass T_{in}^{min} unter dem abgelesenen Temperaturwert liegt.

Auf den ersten Blick ist ersichtlich, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Temperaturen T_{ref}^{EED} und T_{ref}^{OGS} unterschritten werden, bei beiden Szenarien kleiner ist, als dass sie überschritten werden. Dennoch ist die Wahrscheinlichkeit für die Unterschreitung der Referenztemperaturen in beiden Szenarien nennenswert und somit stets eine Unsicherheit vorhanden. Hinsichtlich der ursprünglichen Auslegung in EED liegt die Unsicherheit für niedrigere Temperaturen in *Szenario 1* bei 4,6%.

Bezogen auf die Simulation in OGS mit den Parameterwerten der Sondendimensionierung liegt die Unsicherheit für niedrigere Werte bei 15,0 %. Die Unsicherheit für Temperaturen $T_{in}^{min} \leq 0^\circ\text{C}$ lag hingegen bei 0,3 %. Die kleinste Temperatur für T_{in}^{min} lag bei $-1,39^\circ\text{C}$ und damit 2,11 K unter T_{ref}^{EED} und 2,94 K unter T_{ref}^{OGS} . Der größte Temperaturwert in den Ergebnissen lag bei $5,43^\circ\text{C}$. In *Szenario 2* wurde ein größerer Unsicherheitsbereich für den Jahresbedarf an Wärmeenergie Q betrachtet. In der Abb. 4.30b mit den Ergebnissen zu diesem Szenario ist daher ein größerer Temperaturbereich für die Verteilung von T_{in}^{min} zu sehen. Der kleinste Wert lag hier bei $-3,77^\circ\text{C}$ und damit 4,49 K unter T_{ref}^{EED} und 5,32 K unter T_{ref}^{OGS} . Die maximale Temperatur für T_{in}^{min} lag in dieser Betrachtung bei $6,34^\circ\text{C}$. Die Unsicherheit für kleinere Fluidtemperaturen als in EED lag bei 13,7 %. Gegenüber V ag die Unsicherheit für niedrigere Temperaturen in diesem Szenario bei 24,3 %.

In Deutschland orientiert sich die Dimensionierung von Sonden oftmals an der Richtlinie VDI 4640 (2020). Dort wird vorgegeben, dass bei Geothermieanlagen die Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde kurzzeitig bis zu -5°C erreichen darf und im Monatsmittel 0°C nicht unterschreiten soll. Wird dieser Maßstab an die in Abb. 4.30 dargestellten Ergebnisse angelegt, ist von einer ausreichenden Dimensionierung hinsichtlich der Spitzenlast in den ersten fünf Jahren des Sondenbetriebs auszugehen. Über die Monatsmitteltemperatur kann jedoch anhand der Auswertung von T_{in}^{min} keine Aussage getroffen werden. Im hier angewendeten Jahresverlauf des Wärmeenergiebedarfs liegt der größte Bedarf und somit die niedrigste Monatsmitteltemperatur im Februar. Daher wurden weitere Proxy-Modelle anhand der bereits vorhandenen 1000 OGS-Berechnungen mit dem Monatsmittelwert der Fluidtemperatur bei Sondeneintritt für den Monat Februar trainiert. Anschließend wurden mit diesen Proxy-Modellen ebenfalls anhand des zuvor verwendeten LHS 100.000 Wertekonstellationen für die Parameter ausgewertet. Mithilfe der kumulativen Verteilung der Ergebniswerte für die mittlere Fluidtemperatur im Februar wurde die Unsicherheit p_{UQ} ermittelt, dass die Monatsmitteltemperatur unter 0°C liegt. Abb. 4.31 zeigt diese Unsicherheitswerte für die ersten fünf Jahre für beide Szenarien der Unsicherheitsanalyse. Für *Szenario 1* liegt die Unsicherheit im ersten Jahr bei 0 % und bleibt auch im fünften Jahr mit 0,6 % unter 1 %. Für *Szenario 2* erreicht die Unsicherheit im ersten hingegen 1,3 % und liegt im fünften Jahr bei 6,9 %.

Neben der Auswertung der Unsicherheit mittels der Betrachtung von statistischen Verteilungen wurden außerdem Sobol'-Indizes zur Bewertung der Unsicherheitsquellen berechnet. Diese Betrachtung erfolgte wieder anhand der minimalen Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde im fünften Jahr der Simulation T_{in}^{min} . Hierfür wurden mit dem erstellten Proxy-Modell 106.496 Parametervariationen auf Basis einer Sobol'-Folge ausgewertet und Sobol'-Indizes erster Ordnung berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.32 dargestellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die Unsicherheit am betrachteten Standort für beide Szenarien im Wesentlichen durch die Parameter Q , λ_s , T_{geo} bestimmt wird. Für *Szenario 1* ist im betrachteten Fall die größte Quelle für Unsicherheiten die Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes λ_s , wohingegen in *Szenario 2* der Jahresbedarf an Wärmeenergie Q als Unsicherheitsquelle dominiert.

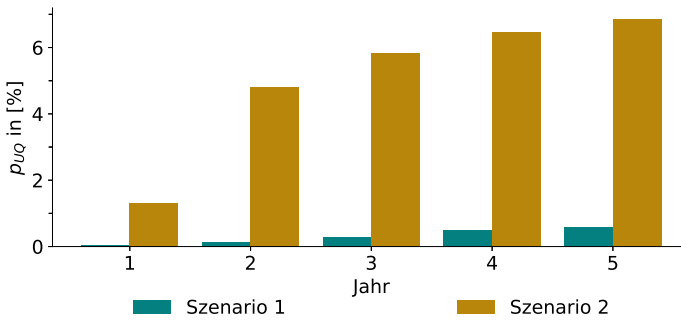


Abb. 4.31 Unsicherheit p_{UQ} für kleinere Fluidtemperaturen als 0°C im Monatsmittel im Monat Februar

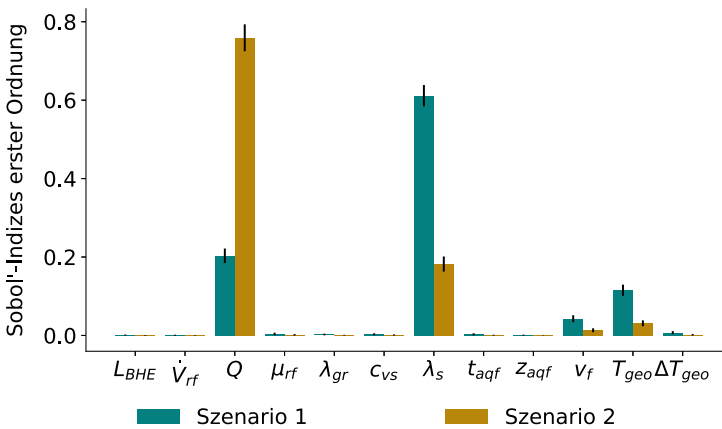


Abb. 4.32 Sobol'-Indizes erster Ordnung für die Parameter der Unsicherheitsanalyse bezüglich der minimalen Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde im fünften Jahr der Simulation T_{in}^{min}

4.2.5 Zusammenfassung und Diskussion

In der vorgestellten Unsicherheitsanalyse wurde die Unsicherheit einer Sondendimensionierung bezüglich der Sondenperformance für einen fiktiven Standort betrachtet. Ziel war dabei einerseits eine methodische Betrachtung für Unsicherheitsanalysen im Kontext von Planungsprozessen oberflächennaher Geothermie. Andererseits soll die Betrachtung einen beispielhaften Eindruck vermitteln, wie sich vorhandene Unsicherheiten bezüglich der Standortgegebenheiten auf den Betrieb einer Geothermieanlage auswirken können. Im Unterschied zur allgemeinen Betrachtung in der Sensitivitätsanalyse, handelt es sich hierbei um eine standortbezogene Untersuchung. Daher ist für andere Standorte von anderen Unsicherheiten auszugehen. Das Ergebnis dieser Unsicherheitsanalyse liefert jedoch interessante Erkenntnisse für die Planungspraxis und kann wichtige Hinweise geben, wie Unsicherheitsbetrachtungen für EWS im oberflächennahen Raum angegangen werden können.

Für die Analyse wurde wie in der Sensitivitätsanalyse ein Proxy-Modell verwendet, welches mittels OGS-Modellen angelernt wurde. Im Vergleich zur Sensitivitätsanalyse konnte hier bereits mit einer kleineren Anzahl von Trainingssamples eine bessere Approximation der OGS-Ergebnisse durch das Proxy-Modell erreicht werden. Die Begründung hierfür liegt sicherlich darin, dass das Proxy-Modell das Verhalten des OGS-Modells aufgrund der kleineren Wertebereiche besser approximieren kann. Am fiktiven Standort wurden hier zwei Szenarien betrachtet, welche sich durch die Unsicherheit für den Jahresbedarf an Wärmeenergie unterscheiden. In *Szenario 1* wurde eine Unsicherheit von Q auf Basis von klimatischen Schwankungen untersucht. *Szenario 2* berücksichtigt hingegen einen größeren Unsicherheitsbereich für Q , welcher sich durch einen Nutzerwechsel begründen kann. Auswirkungen der Unsicherheit der Eingangsparameter auf den Betrieb der Sonde wurden anhand der niedrigsten Fluidtemperatur T_{in}^{min} im fünften Jahr der Simulation betrachtet. Das Ergebnis der Unsicherheitsanalyse ist eine statistische Verteilung, die Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit gibt, dass die Fluidtemperatur ober- oder unterhalb bestimmter Werte liegt. Die Ausgangslage für die Unsicherheitsbetrachtung stellte eine Dimensionierung der EWS für den Standort auf Basis einer Berechnung in der Software EED dar, die ein gängiges Werkzeug zur Dimensionierung solcher Anlagen ist.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Unsicherheit für niedrigere minimale Fluidtemperaturen, als zum gleichen Auswertezeitpunkt in der Betrachtung mit EED, für *Szenario 1* bei 4,6 % und für *Szenario 2* bei 13,7 % lag. In der Simulation mit OGS, auf der die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse basieren, ergab sich aufgrund des Modellierungsansatzes für die Untergrundtemperatur eine niedrigere mittlere Untergrundtemperatur im Modell (siehe auch Abschn. 4.2.2). Daher sind die angegebenen Unsicherheiten für niedrigere Temperaturen im Vergleich zur Auslegung mit EED hier eher eine konservative Abschätzung. Andererseits wird an den Ergebnissen dennoch der konservative Charakter der Auslegung mittels EED sichtbar. Beispielsweise ergab sich bei der Simulation mit den Parameterwerten der EED-Dimensionierung in OGS trotz der niedrigeren Untergrundtemperatur eine höhere Fluidtemperatur als in EED. Dies begründet sich vor allem darin, dass in der Berechnung mit der Software EED keine Grundwasserströmungen am Standort berücksichtigt werden können.

Des Weiteren ist die Betrachtung hinsichtlich der Einhaltung von Regularien interessant. Ein Vergleich diesbezüglich wurde hier gegenüber Temperaturgrenzen der Richtlinie VDI 4640 (2020) angestellt. Dabei zeigte sich, dass die Grenzwerte für die Fluidtemperatur bei Spitzenlast in beiden Szenarien zumindest innerhalb der ersten fünf Jahre eingehalten werden. In einer weiteren Betrachtung der mittleren monatlichen Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde zeigte sich jedoch, dass diese auch Temperaturen unter 0°C erreicht. Im fünften Jahr der Simulation zeigte sich für das Monatsmittel der Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde für den Monat Februar eine Unsicherheit von 0,6 % in *Szenario 1* und von 6,9 % in *Szenario 2* für Werte unter 0°C . Daher ist die EWS am Standort hinsichtlich der VDI 4640 (2020) zu diesem Zeitpunkt mit einer Unsicherheit von 0,6 % in *Szenario 1* und von 6,9 % in *Szenario 2* unterdimensioniert. Bezüglich der Einhaltung der Temperaturgrenzen muss hier jedoch berücksichtigt werden, dass nur die ersten fünf Jahre des Sondenbe-

triebs betrachtet wurden. Die [VDI 4640 \(2020\)](#) gibt hingegen eine Betriebsdauer von 50 Jahren vor, von der im Regelfall ausgegangen werden soll. Bei einer Betrachtung der gesamten Betriebsdauer der Geothermieanlage von 50 Jahren ist mit tendenziell niedrigeren Fluidtemperaturen und daher auch größeren Unsicherheiten bezüglich Unterdimensionierungen der Sonde zu rechnen.

Neben der Unsicherheit bezüglich zu niedriger Temperaturen zeigen die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse im Beispiel eine große Wahrscheinlichkeit für höhere Fluidtemperaturen, als diese durch die ursprüngliche Auswertung zu erwarten sind. Liegt bei einer Berücksichtigung der gesamten Betriebsdauer immer noch eine große Wahrscheinlichkeit für höhere Fluidtemperaturen vor, kann dies mit einer großen Wahrscheinlichkeit für eine Überdimensionierung der Anlage am betrachteten Standort gleichgesetzt werden. Überdimensionierungen müssen, neben der genauen Untersuchung der einflussreichsten Parameter aus der Sensitivitätsanalyse, vor allem durch Verkleinerung der Unsicherheitsbereiche der Eingangsparameter angegangen werden. Hierzu ist es wichtig zu wissen, welche Parameter die Hauptverursacher der Unsicherheit im Ergebnis sind. Dies wurde für den Beispielstandort mittels Sobol'-Indizes ermittelt. In den Ergebnissen zeigte sich, dass die Unsicherheit für beide Szenarien im Wesentlichen auf vier Parameter zurückzuführen ist. Dabei handelt es sich um den Jahresbedarf an Wärmeenergie Q , die Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes λ_s , die Darcy-Geschwindigkeit der Grundwasserströmung und den Parameter T_{geo} für die Modelltemperatur, welcher im Wesentlichen die ungestörte Untergrundtemperatur beschreibt. In *Szenario 1* wird die größte Unsicherheit in der Performance der EWS durch die Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes λ_s verursacht. Der festgelegte Unsicherheitsbereich für diesen Parameter basiert auf der Annahme, dass am Standort kein gemessener Wert vorliegt und daher auf Basis der Gesteinsart ein Wert in der Literatur (hier [VDI 4640 \(2020\)](#)) ausgewählt werden musste. TRT bieten eine Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit genauer zu ermitteln. Häufig sind für Geothermieanlagen mehrere Sonden nötig, sodass ein solcher Test an einer Pilotbohrung durchgeführt werden kann. Am Beispielstandort ist jedoch nur eine Sonde vorgesehen, daher kann durch einen TRT im Nachhinein nur noch eine Überprüfung des Wertes für λ_s stattfinden. Im Fall von nur einer Bohrung lohnt es sich, im Planungsprozess genau zu recherchieren, ob beispielsweise mittels Geoinformationssystemen anhand von vorhandenen Daten aus Bohrungen in der Umgebung eine genauere Abschätzung des Wertes erreicht werden kann. Andererseits zeigte die bereits erwähnte Betrachtung der Methode zur Auswertung von TRT, dass auch diese eine Quelle für Unsicherheiten darstellt. Grund hierfür ist in erster Linie ein vom Anwender zu wählender Startpunkt für die Auswertung und der gemittelte Wert für die Wärmeleitfähigkeit. Näheres dazu ist in [Abschn. 6.1](#) beschrieben. In *Szenario 2* stellt der Jahresbedarf an Wärmeenergie Q die größte Quelle für Unsicherheiten dar. Prinzipiell kann die Unsicherheit des Energiebedarfs mit einer möglichst detaillierten Bedarfsanalyse, die beispielsweise eine Simulation der Haustechnik beinhaltet, verringert werden. Im hier vorliegenden Szenario wird jedoch eine Unsicherheit betrachtet, die sich aufgrund eines Nutzerwechsels ergeben kann. Dies ist bei der Planung einer Anlage schwer abzuschätzen und in den meisten Fällen nicht wirtschaftlich sinnvoll. Daher empfiehlt es sich eher, solchen Unsicher-

heiten durch eine Überprüfung der ursprünglichen Dimensionierung der Anlage zu begegnen, wenn der Fall eines Nutzerwechsels eintritt und gegebenenfalls zusätzliche Bedarfe durch Erweiterung des Systems zu kompensieren.

Wie eingangs erwähnt, soll die vorgestellte Unsicherheitsanalyse einen exemplarischen Eindruck über die Möglichkeiten und die Methodik von Unsicherheitsanalysen geben. Dabei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, alle Unsicherheitsquellen einbezogen zu haben. Aufgrund softwarebedingter Probleme konnten beispielsweise keine Unsicherheiten berücksichtigt werden, die sich aufgrund der schwer vorhersagbaren, in der Planung jedoch ideal angenommenen, Lage der einzelnen Sondenrohre in der Sonde ergeben. Ebenso sind Unsicherheiten aufgrund der fehlenden Kenntnis des genauen Schichtaufbaus im heterogenen geologischen Untergrund zu vermuten. Oftmals sind Informationen aus anderen Bohrungen nur in einiger Entfernung zur geplanten Anlage vorhanden. Auch der genaue Verlauf der Sonde im Untergrund ist mit Unsicherheiten behaftet, welche beispielsweise [Steinbach et al. \(2021\)](#) in einer Unsicherheitsstudie betrachten. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass sich die Unsicherheiten der Parameter auch auf andere Bereiche auswirken, die nicht untersucht wurden. Beispielsweise zeigt sich in der Auswertung mittels Sobol'-Indizes, dass die Viskosität des Sondenfluids nur einen geringen Einfluss auf die Performance hat. Dennoch bewegt sich der tatsächliche Wert der Viskosität μ_{rf} in einem großen Unsicherheitsbereich (siehe auch Tab. 4.4). [Stober und Bucher \(2014\)](#) bemerken zur großen Änderung der Viskosität während des Sondenbetriebs, dass dies Auswirkungen auf den benötigten Pumpenstrom hat und damit die Performance der Geothermieanlage an anderer Stelle beeinflusst.

Auch wenn die Unsicherheitsanalyse auf teils stark vereinfachten Modellannahmen basiert, konnte diese einen guten Einblick in das Potenzial einer solchen Studie liefern. So zeigt diese einerseits eine fundiertere Betrachtung hinsichtlich einzuhaltender Regularien und bietet andererseits Informationen, die zur Reduzierung von Überdimensionierungen genutzt werden können. Neben der Unsicherheit ging es in der Betrachtung auch um methodische Aspekte. Der hier verfolgte Ansatz stellt eine gute Herangehensweise dar, um ein differenziertes Bild von den Unsicherheiten zu erlangen. Für den Einsatz in Planungsprozessen in der Praxis ist dies bisher jedoch aufgrund des hohen Zeitaufwands durch die numerischen Simulationen noch nicht umsetzbar. Weiterführende Forschungen könnten sich daher damit beschäftigen, wie vergleichbare Ergebnisse in einem vertretbaren zeitlichen Aufwand in der Praxis erzielt werden können. Darüber hinaus sollte die Rechendauer so gering sein, dass auch Simulationen von 50 Jahren betrachtet werden können, um Aussagen zur Unsicherheit für die gesamte Betriebsdauer der Geothermieanlage zu treffen. Naheliegender wäre hier beispielsweise eine Reduzierung der Modellgröße des OGS-Modells. Das hier verwendete Modell wurde ursprünglich für die Sensitivitätsanalyse dimensioniert, wo sich aufgrund der größeren Parameterwertebereiche größere Temperaturfahnen ergeben können und damit größere Modellabmessungen benötigt wurden. Weitere Ansätze könnte außerdem die Anwendung von Monte-Carlo-Simulationen, in der Art wie sie beispielsweise von [Watanabe et al. \(2010\)](#) benutzt wurden oder auch die Reduzierung der betrachteten Parameter bieten. Wie zuvor erwähnt, zeigte

sich im Ergebnis dieser Analyse bereits, dass die Unsicherheit im Wesentlichen auf wenige Parameter zurückzuführen ist.

4.3 Potenzielle Optimierungsstrategien für die Auslegung untertägiger Systemkomponenten

Bei der Planung von Erdwärmesondensystemen wird zur Dimensionierung und Positionierung der EWS in der Praxis meist die Software EED verwendet, welche die benötigte Bohrlänge sowie Vorschläge für die Positionierung der EWS liefert. Dabei wird jedoch keinerlei Heterogenität im Untergrund berücksichtigt, was bedeutet, dass für Untergrundparameter wie die Wärmeleitfähigkeit oder die spezifische Wärmekapazität jeweils ein einzelner fester Wert angenommen wird, der im Vorfeld, beispielsweise mithilfe eines TRT, ermittelt wurde. Außerdem wird in EED keine Grundwasserströmung berücksichtigt, weshalb das Ergebnis tendenziell konservativ ausfällt. Dies äußert sich durch eine Überdimensionierung der Bohrlänge. Wenn es sich bei der Auslegung um ein Sondenfeld handelt, wird in EED die Anordnung der EWS in der Regel in gleichmäßigen Rastern oder anderen genormten Formen ausgegeben. Die Positionen der EWS werden bei der Nutzung von EED dementsprechend nicht standortspezifisch optimiert. Je nachdem, wie viel durch Vorerkundungen über den Untergrund bekannt ist, bietet sich hier potenziell die Möglichkeit, mithilfe von optimierter Positionierung und Dimensionierung der EWS, Kosten einzusparen. Daher wurde in diesem Abschnitt untersucht, inwieweit so eine Optimierung theoretisch möglich ist und welche Zielfunktionen und Optimierungsverfahren sich dafür anbieten. In diesen Untersuchungen wurde bislang der Fokus auf die Sondenpositionierung gelegt, perspektivisch jedoch soll auch die Dimensionierung mit hinzugezogen werden.

4.3.1 Zielfunktionen und Nebenbedingungen

Für die Optimierung der Sondenpositionen gibt es verschiedene Möglichkeiten, Zielgrößen zu wählen. Als einfacher Ansatz, der zunächst keine Gebäudekühlung berücksichtigt, kann die Rücklauftemperatur in den Sonden in Abhängigkeit von Sondenpositionen (und gegebenenfalls Sondenlängen) maximiert werden. Ein weiterer Ansatz, den [Hecht-Méndez et al. \(2013\)](#) und [de Paly et al. \(2012\)](#) vorschlagen, ist, den thermischen Einfluss auf den Untergrund zu minimieren und auf diesem Wege extrem niedrige Temperaturen im Boden zu vermeiden. Um triviale oder impraktikable Lösungen wie beispielsweise extrem lange Sonden oder die Positionierung der Sonden an den Grundstücksgrenzen zu vermeiden, müssen Nebenbedingungen formuliert werden. Beispielsweise können dabei ein minimaler und maximaler Sondenabstand festgelegt werden, eine maximal zulässige Temperaturänderung an der Grundstücksgrenze, maximale Bohrmeter, möglichst kurze Leitungslängen zur Wär-

mepumpe sowie Hindernisse im Boden, wie z. B. Fahrstuhlchächte oder verlegte Leitungen.

Im Folgenden werden einige Beispiele für die Formulierung von Zielfunktionen f und Nebenbedingungen aufgezeigt. In den hier betrachteten Szenarien ist die Anzahl n_{BHE} und die Länge der Sonden festgelegt, sodass nur die Positionen der Sonden optimiert werden. Für die Beschreibung der Sondenpositionen werden die Vektoren $\mathbf{x}^{(j)} = (x_{WO}^{(j)}, x_{NS}^{(j)})$ verwendet, die je die Koordinaten der j -ten EWS enthalten. Dabei steht $x_{WO}^{(j)}$ jeweils für die Koordinate in West-Ost- und $x_{NS}^{(j)}$ für die Koordinate in Nord-Süd-Richtung. Diese Koordinaten sind auf eine Grundmenge G beschränkt, welche hier das Grundstück repräsentiert, auf dem die EWS platziert werden sollen. Zielgröße der Optimierung ist die Rücklauftemperatur. Genauer gesagt, wird der Durchschnitt der Rücklauftemperatur über alle Sonden zum letzten Zeitschritt der jeweiligen Berechnung betrachtet. In der Optimierung wird dann das Maximum (oder eines aus mehreren Maxima) für diese Rücklauftemperatur gesucht. Die Rücklauftemperatur in der j -ten Sonde zum letzten Zeitschritt wird im Folgenden mit $T_o(\mathbf{x}^{(j)})$ bezeichnet. Mit diesen Vorgaben kann das folgende simple Optimierungsproblem aufgestellt werden:

$$\text{Maximiere } f(\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})}) = \sum_{j=1}^{n_{BHE}} T_o(\mathbf{x}^{(j)}) \quad \text{über } \mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})} \in G. \quad (4.14)$$

Verschiedene Nebenbedingungen zu der Optimierungsaufgabe (4.14) können davon ausgehend hinzugefügt werden. Soll beispielsweise ein Mindestabstand d_{\min} gefordert werden, so könnte dies folgendermaßen aussehen:

$$\begin{aligned} \text{Maximiere } f(\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})}) &= \sum_{j=1}^{n_{BHE}} T_o(\mathbf{x}^{(j)}) \quad \text{über } \mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})} \in G, \\ \text{sodass } d_{\min} - |\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(k)}| &\leq 0, \quad \text{für } j, k = 1, \dots, n_{BHE}, \text{ wobei } j \neq k. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Alternativ können solche Nebenbedingungen auch in Form von Straftermen formuliert werden:

$$\begin{aligned} \text{Maximiere } f(\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})}) &= \sum_{j=1}^{n_{BHE}} \left(T_o(\mathbf{x}^{(j)}) - \gamma \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{n_{BHE}} (d_{\min} - |\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(k)}|) \right) \\ \text{über } \mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})} &\in G, \end{aligned} \quad (4.16)$$

wobei der Strafparameter $\gamma > 0$ geeignet zu wählen ist. In sogenannten Straftermverfahren oder auch Penalty-Verfahren wird der Strafparameter iterativ vergrößert und innerhalb der Iterationen jeweils ein Optimum gesucht. Weitere Informationen zum Penalty-Verfahren sind beispielsweise in [Ulbrich und Ulbrich \(2012\)](#) zu finden. Dieses Verfahren bestraft einen zu geringen Abstand und belohnt somit im Umkehrschluss einen größeren Sondenabstand. So kann es passieren, dass diese Zielfunktion, je nachdem wie der Strafparameter gewählt wird, ihr Maximum genau

dann erreicht, wenn die Sonden den größtmöglichen Abstand zueinander haben. Daher ist es hier notwendig, zusätzliche Nebenbedingungen wie beispielsweise einen Maximalabstand d_{\max} einzubinden:

$$\begin{aligned} \text{Maximiere } f(\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})}) &= \sum_{j=1}^{n_{BHE}} T_o(\mathbf{x}^{(j)}) \quad \text{für } \mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})} \in G, \\ \text{so dass } d_{\min} - |\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(k)}| &\leq 0, \quad \text{für alle } j, k = 1, \dots, n_{BHE}, \text{ wobei } j \neq k \\ \text{und } |\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(k)}| - d_{\max} &\leq 0, \quad \text{für alle } j, k = 1, \dots, n_{BHE}, \text{ wobei } j \neq k, \end{aligned} \quad (4.17)$$

oder wieder mit Straftermen und zugehörigen Strafparametern $\gamma_1, \gamma_2 > 0$:

$$\begin{aligned} \text{Maximiere } f(\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})}) &= \\ &= \sum_{j=1}^{n_{BHE}} \left(T_o(\mathbf{x}^{(j)}) - \gamma_1 \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{n_{BHE}} (d_{\min} - |\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(k)}|) - \gamma_2 \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{n_{BHE}} (|\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(k)}| - d_{\max}) \right) \\ \text{über } \mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n_{BHE})} &\in G. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Diese Optimierungsproblemstellungen können auf vielfältige Art und Weise erweitert bzw. angepasst werden. Dafür können weitere Nebenbedingungen formuliert werden oder aber auch die zulässige Grundmenge G auf Hindernisse im Untergrund oder auf dem Grundstück angepasst werden. Auch die Einbeziehung von Sondenlängen ist durch Anpassungen der Optimierungsvariable $\mathbf{x}^{(j)}$ möglich. Diese würde dann nicht mehr nur die Koordinaten der j -ten EWS enthalten, sondern zusätzlich die Länge der j -ten EWS. Die folgende Untersuchung beschränkt sich auf das Optimierungsproblem aus Gl. (4.14), um zunächst die generelle Durchführbarkeit von Optimierungsverfahren testen zu können.

4.3.2 Optimierung mit dem Nelder-Mead-Verfahren

Optimierungsverfahren lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Gradientenbasierte und gradientenfreie Optimierungsverfahren. Gradientenbasierte Verfahren benötigen in der Regel weniger Iterationen als gradientenfreie Verfahren zur Ermittlung einer Lösung in vergleichbarer Genauigkeit. Jedoch erfordern gradientenbasierte Verfahren die Berechnung der ersten (und manchmal auch der zweiten) Ableitung, was in der Regel mit einem erhöhten Rechenaufwand verbunden ist. Dies erweist sich auch bei den Zielfunktionen aus den zuvor genannten Beispielen als kompliziert, da dort die Temperatur in Abhängigkeit von den Sondenpositionen abgeleitet werden müsste. Daher empfiehlt es sich, zunächst auf ein gradientenfreies Verfahren zurückzugreifen.

Ein beliebtes gradientenfreies Verfahren ist das sogenannte Nelder-Mead-Verfahren von [Nelder und Mead \(1965\)](#), welches oftmals auch als Downhill-Simplex-Verfahren bezeichnet wird. Dieses Verfahren steckt des Öfteren hinter geläufigen

Optimierungsbefehlen in bestehenden Programmierpaketen. Beispielsweise ist das Verfahren Teil des Python-Pakets SciPy, siehe [Virtanen et al. \(2020\)](#).

Im Folgenden wird an einem Beispiel mit einer Einfach-U-Sonde das Prinzip des Nelder-Mead-Verfahrens erklärt. Die Zielfunktion hängt also nur noch von einem Vektor $\mathbf{x} = (x_{\text{WO}}, x_{\text{NS}})$ ab, der die Koordinaten der EWS beinhalten soll. Sie hat also die folgende Form:

$$\text{Maximiere } f(\mathbf{x}) = T_o(\mathbf{x}) \text{ über } \mathbf{x} \in G. \quad (4.19)$$

Als Grundstück wird das quadratische Gebiet $G = [0, 400] \times [0, 400]$ festgelegt und somit bedeutet $\mathbf{x} \in G$ hier nichts anderes als $x_{\text{WO}} \in [0, 400]$ und $x_{\text{NS}} \in [0, 400]$. Beim Nelder-Mead-Verfahren werden mehrere Startpunkte gewählt. Die Anzahl der Startpunkte muss um eins größer sein als die Dimension der Optimierungsvariable \mathbf{x} . Diese ist im betrachteten Beispiel zweidimensional, weswegen die drei Startpunkte, \mathbf{x}_0 , \mathbf{x}_1 und \mathbf{x}_2 , benötigt werden. In ihrer Gesamtheit werden die Startpunkte auch als Startsimplex bezeichnet. Jeder Punkt repräsentiert eine mögliche Position für eine EWS, mit der das Optimierungsverfahren begonnen werden soll. Die Zielfunktion wird an allen drei Startpunkten ausgewertet und anschließend entsprechend der Ergebnisse umsortiert, sodass \mathbf{x}_0 der ‚beste‘ Punkt ist. Dies entspricht dann der Sondenposition, die von den gegebenen Startpunkten zu der höchsten Rücklauftemperatur führt. Punkt \mathbf{x}_2 stellt dementsprechend die ‚schlechteste‘ Position der drei Startpunkte dar. In jeder Iteration soll \mathbf{x}_2 , also der ‚schlechteste‘ Punkt, durch einen neuen Punkt ersetzt werden, der vermeintlich besser ist. Um dies sicherzustellen, werden drei Operationen benutzt: Reflexion, Kontraktion und Expansion, welche in [Nelder und Mead \(1965\)](#) im Detail beschrieben werden.

In der Praxis müssen zudem Konvergenzkriterien gesetzt werden, bei denen es sich in der Regel um je eine Toleranzgrenze für den Input \mathbf{x} und für die Funktionswerte $f(\mathbf{x})$ handelt. Diese Toleranzen gelten als erfüllt, wenn von einer Iteration zur nächsten die Unterschiede sowohl in den Inputs als auch in den Funktionswerten die jeweiligen Toleranzen unterschreiten. Dann bricht der Algorithmus ab und gibt den vorliegenden Funktionswert als Lösung des Optimierungsproblems zurück.

Um erste Versuche einer Optimierung mit der Zielfunktion in Gl. (4.19), also für die Positionierung einer einzelnen Sonde durchzuführen, wurde das angepasste analytische Modell von [Beier \(2014\)](#) benutzt, welches auch bei Voruntersuchungen für die Sensitivitätsanalyse verwendet wurde (siehe Abschn. 4.1.1). Bei der Optimierung wird jedoch auch die Nutzung von Simulationssoftware wie OGS angestrebt. Das analytische Modell geht von einem homogenen Untergrund aus. Das bedeutet, dass jede Sondenposition zu gleichen Rücklauftemperaturen führt und sich somit eine Optimierung bezüglich standortspezifischer Untergrundeigenschaften innerhalb dieses Modells erübrigt. Daher wurde eine fiktive Karte erstellt, die variierende Untergrundparameter innerhalb des betrachteten Grundstücks darstellen soll. Außerdem wurde eine Funktion definiert, welche zu beliebigen Positionen innerhalb dieser Karte die entsprechenden Untergrundparameter zuordnet. Diese Untergrundparameter werden von der Funktion dem analytischen Modell als Eingabewerte übergeben, welches anschließend die zugehörigen Rücklauftemperaturen berechnet. Genauer gesagt gibt die Funktion, welche später auch als Zielfunktion fungieren soll, die Rücklauftemperatur zum letzten berechneten Zeitpunkt zurück. Der Untersuchungszeitraum beträgt

hier 25 Jahre. Ausgangspunkt für die Karte, welche das Grundstück repräsentiert, war ein quadratisches Raster mit 49 diskreten Punkten. An diesen Punkten wurde jeweils ein Wertepaar aus Wärmeleitfähigkeit λ_s und spezifischer volumetrischer Wärmekapazität c_{vs} festgelegt. Um kontinuierliche Werte zu den Untergrundparametern über die gesamte Grundstücksfläche zu erhalten, wurden diese zwischen den diskreten Punkten interpoliert. Für die Definition der fiktiven Wertepaare wurde auf möglichst realitätsnahe Bedingungen geachtet. Die Verteilung der Parameterwerte, welche für die folgenden Beispielberechnungen verwendet wurden, sind in den Abb. 4.33 und Abb. 4.33 dargestellt. Die restlichen Eingabeparameter des analytischen Modells wurden mit konstanten Werten belegt, welche in Tab. 4.5 aufgeführt sind.

Um die Qualität der Optimierungsergebnisse einschätzen zu können, wurde die Zielfunktion an 10.000 äquidistanten Punkten berechnet. Dies ermöglicht auch die Visualisierung in Abb. 4.33c, welche die Rücklauftemperatur T_o nach 25 Jahren Betriebszeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Sondenposition innerhalb des Grundstücks aufzeigt. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass unter Nutzung einer Simulationssoftware wie OGS, diese Art der Visualisierung aufgrund des Berechnungsaufwandes nicht mehr praxistauglich wäre. Außerdem würde sich die Notwendigkeit einer Optimierung erübrigen, wenn solch fein aufgelöste Lösungen leicht und schnell zu berechnen wären.

Im Folgenden werden nun Optimierungsbeispiele mit verschiedenen Startsimplex aufzeigt. Für das erste Beispiel werden die Punkte des jeweiligen Startsimplex zufällig (gleichverteilt) im gesamten Bereich des Grundstücks gewählt. Aus Abb. 4.34 wird ersichtlich, dass das Verfahren in der Lage ist, lokale Extrempunkte zu finden. Jedoch wird in Abb. 4.34b und Abb. 4.34c deutlich, dass diese Extrempunkte nicht immer auch die globalen Extrema sind. Es kann also davon ausgegangen werden, dass mit diesem Verfahren immer ein guter oder zumindest besserer Punkt (im Vergleich zu den Startpunkten) gefunden wird, wenn auch nicht zwangsläufig der beste. Daher wird in diesem Zusammenhang auch von einem lokalen Optimierungsverfahren gesprochen.

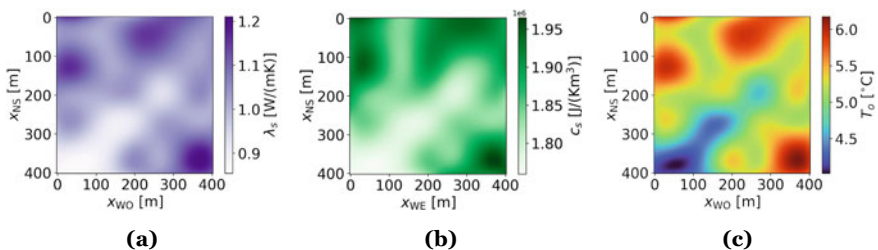


Abb. 4.33 Darstellung der interpolierten ortsabhängigen Untergrundparameter (Wärmeleitfähigkeit in (a) und spezifische volumetrische Wärmekapazität in (b)) und der resultierenden ortsbezogenen Rücklauftemperaturen nach 25 Jahren Betriebsdauer in (c) bei Platzierung einer einzelnen Sonde innerhalb eines Bereichs von $400\text{ m} \times 400\text{ m}$. Grundlage der Interpolation waren 49 Wertepaare

Tab. 4.5 Konstante Eingabeparameter für das analytische Modell

Parameter	Wert	Einheit
<i>Abmessungen</i>		
Sondenlänge	99	m
Bohrlochradius	0,07	m
Rohrdurchmesser (außen)	0,032	m
Rohrabstand	0,07	m
<i>Rohrmaterial</i>		
Wärmeleitfähigkeit	0,042	$W m^{-1} K^{-1}$
<i>Kältemittel</i>		
Dichte	1000	$kg m^{-3}$
Spezifische Wärmekapazität	3795	$J kg^{-1} K^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit	0,63	$W m^{-1} K^{-1}$
Dynamische Viskosität	$0,52 \cdot 10^{-2}$	$kg m^{-1} s^{-1}$
<i>Hinterfüllmaterial</i>		
Wärmeleitfähigkeit	2	$W m^{-1} K^{-1}$
Spez. volumetrische Wärmekapazität	3800	$kJ m^{-3} K^{-1}$
<i>Anfangs- und Randbedingungen</i>		
Durchflussrate des Kältemittels	10^{-3}	$m^3 s^{-1}$
Entzugsleistung	500	W
Anfangstemperatur des Untergrunds	11,6	$^{\circ}C$

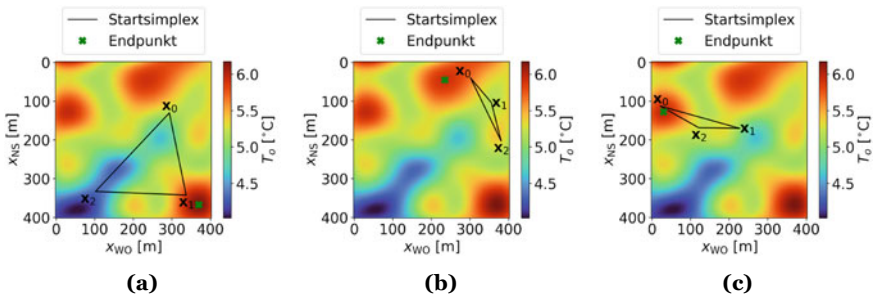


Abb. 4.34 Beispiele zur Optimierung der Sondenposition bezüglich der Rücklauftemperatur nach 25 Jahren Betriebsdauer mit dem Nelder-Mead-Verfahren für verschiedene Startsimplexes. In allen Fällen (a), (b) und (c) führte der Startsimplex zu einem lokalen, jedoch nur in (a) zum globalen Optimum

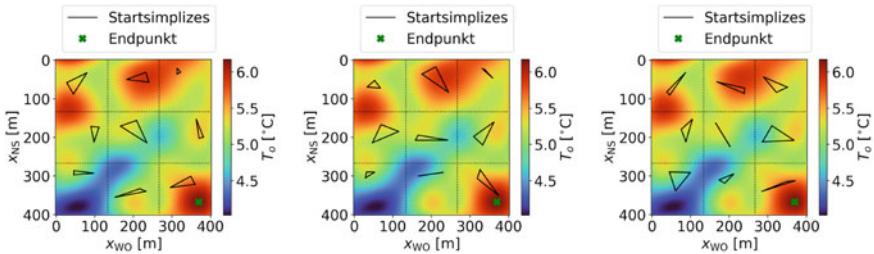


Abb. 4.35 Beispiele für Optimierung mit zufallsbasiertem Globalisierungsansatz für das Nelder-Mead-Verfahren unter Nutzung von neun verschiedenen Startsimplices. Diese werden jeweils zufällig innerhalb eines Teilgebiets gewählt

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde versucht, das lokale Verfahren zu „globalisieren“, indem es sukzessive mit verschiedenen Startsimplices durchgeführt und das Ergebnis der einzelnen lokalen Optimierungen nur dann abgespeichert wurde, wenn es eine Verbesserung zu vorherigen Optimierungsversuchen darstellte. Dabei empfiehlt es sich, die Startsimplices so zu wählen, dass sie möglichst gut auf dem gesamten Grundstück verteilt sind. Dies soll gewährleisten, dass so viel Grundstücksfläche wie möglich auf Extrempunkte durchsucht wird. Je nachdem, wie viele Startsimplices gewählt werden – mit anderen Worten: je nachdem, wie oft das Nelder-Mead-Verfahren hintereinander durchgeführt werden soll – bietet es sich also an, das Grundstück in diese Anzahl von Teilgebieten zu unterteilen. Die einzelnen Punkte werden nach wie vor zufällig gewählt, jedoch so, dass sie sich ausschließlich im Bereich ihres jeweiligen Teilgebiets befinden. In Abb. 4.35 sind drei Beispiele für diesen zufallsbasierten Globalisierungsansatz mit je neun verschiedenen Startsimplices aufgezeigt. Mehrere Hundert Berechnungen haben gezeigt, dass diese Anzahl für das hier betrachtete Grundstück ausreicht, um ein globales Extremum (bzw. hier das einzige globale Extremum) zu finden. Eine pauschale Aussage darüber, wie viele Startsimplices im Allgemeinen nötig sind, oder zumindest eine Faustregel, lässt sich schwer treffen, da dies stark von der Anzahl lokaler Optima abhängt.

4.3.3 Diskussion und Ausblick

Wie die vorangegangenen Erläuterungen verdeutlicht haben, ist es mit den beschriebenen Mitteln möglich, eine Optimierung der Sondenposition einer EWS durchzuführen. Dies wurde mittels fiktiver Daten für die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität durchgeführt. Dementsprechend stellt sich die Frage, inwieweit bei realen Standorten Daten in einer so hohen Auflösung existieren, dass eine solche Optimierung überhaupt durchführbar bzw. aussagekräftig ist. Es sollte also zukünftig die Praxistauglichkeit untersucht sowie gegebenenfalls Aussagen darüber getroffen werden, in welchem Umfang es an Daten mangelt, um eine sinnvolle Optimierung durchführen zu können.

Neben dem in Abschn. 4.3.2 beschriebenen Ansatz zur Globalisierung von lokalen Verfahren existiert eine Bandbreite an globalen Optimierungsverfahren, von denen einige potenziell geeignet sind und für die entsprechende Softwarelösungen nutzbar zur Verfügung stehen, wie z. B. innerhalb der Python-Bibliothek SciPy (Virtanen et al., 2020). Zu diesen Verfahren gehören Simplicial Homology Global Optimisation (SHGO) von Endres et al. (2018), Dual Annealing (DA) von Xiang et al. (1997) und Differential Evolution (DE) von Storn und Price (1997). Um einen ersten Eindruck darüber zu gewinnen, ob es innerhalb des hier behandelten Beispiels schnellere bzw. zuverlässigere Algorithmen gibt, wurden die drei genannten Verfahren an der in Gl. (4.19) beschriebenen Zielfunktion getestet, jedoch ohne vertieft auf die jeweilige Methodik einzugehen. Dabei ließ sich feststellen, dass, zumindest mit geeigneten Randbedingungen, alle drei Verfahren in der Lage sind, sich dem globalen Optimum der Zielfunktion aus Gl. (4.19) anzunähern. Von diesen drei Varianten erwies sich DE als das schnellste Verfahren. In den Versuchen benötigte es etwa halb so viel Rechenzeit wie das globalisierte Nelder-Mead-Verfahren und war um ein Vielfaches schneller als SHGO und DA. Zudem ist es potenziell zuverlässiger als das globalisierte Nelder-Mead-Verfahren, bezogen auf die Suche nach globalen Extrempunkten, was jedoch noch im Detail zu untersuchen ist. Deshalb sollte der nächste Schritt in einer fundierten methodischen Ausarbeitung des Optimierungsverfahrens DE bestehen und in einem anschließenden Vergleich zum hier vorgestellten globalisierten Nelder-Mead-Verfahren.

Außerdem sollten die Verfahren in Zukunft auch auf komplexere Zielfunktionen angewendet werden, welche beispielsweise Hindernisse im Boden oder Abstände zur Grundstücksgrenze einbeziehen. Für die Betrachtung von Quartieren ist des Weiteren eine Einbeziehung von Sondenfeldern interessant. Dafür wäre eine Untersuchung nötig, inwieweit die beschriebenen Methoden und Zielfunktionen auf andere Modelle als das hier verwendete analytische Modell übertragbar sind. Dabei kann es sich um andere analytische Modelle oder aber auch um FE-Modelle wie z. B. OGS handeln. Sobald die Einbeziehung mehrerer Sonden ermöglicht ist, können auch Zielfunktionen bzw. Nebenbedingungen formuliert werden, welche Minimalabstände zwischen den EWS berücksichtigen. Mit der Nutzung von OGS eröffnet sich auch die Option, dass Temperaturverteilungen im Untergrund, insbesondere die Ausbreitung von Temperaturfahnen, Bestandteil der Optimierung werden könnten. Beispielsweise könnte überprüft werden, inwieweit Temperaturgrenzen, die, gemäß geltender Regularien, an Grundstücksgrenzen einzuhalten sind, als Nebenbedingungen formuliert werden könnten. Neben der Optimierung der Sondenpositionen stellt sich in der Praxis auch die Frage nach der Optimierung von Sondenlängen und nach der Kombination dieser beiden Faktoren, sodass auch dies Gegenstand weiterer Untersuchungen werden sollte.

Literatur

- Beier RA (2014) Transient heat transfer in a U-tube borehole heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 62(1):256–266. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.014>
- Buchwald J, Chaudhry AA, Yoshioka K et al (2020) DoE-based history matching for probabilistic uncertainty quantification of thermo-hydro-mechanical processes around heat sources in clay rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 134(104):481. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104481>
- Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A (2007) An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software* 22(10):1509–1518. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.004>
- Campolongo F, Saltelli A, Cariboni J (2011) From screening to quantitative sensitivity analysis. A unified approach. *Computer Physics Communications* 182(4):978–988. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.12.039>
- Casasso A, Sethi R (2014) Sensitivity Analysis on the Performance of a Ground Source Heat Pump Equipped with a Double U-pipe Borehole Heat Exchanger. *Energy Procedia* 59:301–308. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.381>
- Claesson J, Bennet J (1987) Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder
- Dick J, Kuo FY, Sloan IH (2013) High-dimensional integration: The quasi-Monte Carlo way. *Acta Numerica* 22:133–288. <https://doi.org/10.1017/S0962492913000044>
- Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 1. Fundamentals. *Computers & Geosciences* 37:1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.003>
- DWD Climate Center (CDC) (2018) Historische monatliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer etc.) für Deutschland. Version v007
- Eide AL, Holden L, Reiso E, et al. (1994) Automatic History Matching by use of Response Surfaces and Experimental Design. In: ECMOR IV – 4th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, European Association of Geoscientists & Engineers, Røros, Norway., DOI <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201411186>
- Endres SC, Sandrock C, Focke WW (2018) A simplicial homology algorithm for Lipschitz optimisation. *Journal of Global Optimization* 72(2):181–217. <https://doi.org/10.1007/s10898-018-0645-y>
- Geuzaine C, Remacle JF (2009) Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11):1309–1331. <https://doi.org/10.1002/nme.2579>
- Gillbricht CA, Radmann KJ (2017) Mythos Dispersion - wieso Modelle die Wirklichkeit nicht abbilden. *altlasten spektrum* (01/2017):11–16, DOI <https://doi.org/10.37307/j.1864-8371.2017.01.04>
- GPy (2014) GPy: A gaussian process framework in python. <http://github.com/SheffieldML/GPy>, Zugegriffen: 20.08.2021
- 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 Conversion and Management* 66:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.019>
- Herman J, Usher W (2017) SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis. *The Journal of Open Source Software* 2(9):97. <https://doi.org/10.21105/joss.00097>
- Himmel M, Schäfer W (2010) Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich. *Tech. Rep. 12*, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Recklinghausen
- Hörling B, Coldewey WG (2013) Hydrogeologie. *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg*, <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2354-2>

- Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2021) Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx. <https://www.iwu.de/fileadmin/tools/gradtagzahlen/Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx>, Zugriff: 23.4.2021
- Kretzschmar HJ, Kraft I, Stöcker I (2011) Kleine Formelsammlung technische Thermodynamik, 4th edn. Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl, München, oCLC: 743207828
- Lubashevsky K (2022) Sobol'-Sensitivitätsanalyse der Untergrundparameter bei der Simulation von oberflächennaher Geothermie mithilfe von Gauß-Prozess-Emulatoren. Technische Universität Chemnitz, Masterarbeit
- Matzka S (2021) Künstliche Intelligenz in den Ingenieurwissenschaften: Maschinelles Lernen verstehen und bewerten, 1st edn. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden
- Mckay MD, Beckman RJ, Conover WJ (2000) A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics* 42(1):55–61. <https://doi.org/10.2307/1271432>
- Morris MD (1991) Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics* 33(2):161–174. <https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804>
- Nelder JA, Mead R (1965) A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal* 7(4):308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- Owen AB (2021) On dropping the first Sobol' point. *arXiv:2008.08051* [cs, math, stat] DOI <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2008.08051>
- de Paly M, Hecht-Méndez J, Beck M et al (2012) Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming. *Geothermics* 43:57–65. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.03.001>
- Pianosi F, Beven K, Freer J et al (2016) Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software* 79:214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>
- Rosinski C, Zapp FJ (2007) Auswirkung unterschiedlicher Parameter auf die Wärmeübertragungsfähigkeit von Erdwärmesonden. In: *Energie für alle Fälle: Tagungsband; Der Geothermiekongress 2007*, Bochum
- Ruano MV, Ribes J, Seco A et al (2012) An improved sampling strategy based on trajectory design for application of the Morris method to systems with many input factors. *Environmental Modelling & Software* 37:103–109. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.03.008>
- Rumohr S (2021) Temperaturmessungen an Erdwärmesonden - Einflüsse von Bohrvorgang und Ringraumverfüllung. *bbr Leitungsbau. Brunnenbau, Geothermie* 9–2021:54–59
- Rumohr S (2021) Temperaturmessungen in Erdwärmesonden - Hinweise zur Messung der „ungestörten Untergrundtemperatur“. *bbr Leitungsbau. Brunnenbau, Geothermie* 10–2021:50–55
- Saltelli A (2002) Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications* 145(2):280–297. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1)
- Saltelli A, Ratto M, Andres T, et al. (2008) *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley, Chichester, England; Hoboken, NJ, oCLC: ocn180852094
- Sanner B, Mands E, Gieß C (2005) Erfahrungen mit thermisch verbessertem Verpressmaterial für Erdwärmesonden. *bbr Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie* (9/2005):30–35, http://ubeg.de/Lit/bbr_09_2005_30-35_Giess-Mands.pdf, Zugegriffen: 10.01.2023
- Shao H, Hein P, Sachse A et al (2016) *Geoenergy Modeling II: Shallow Geothermal Systems*. SpringerBriefs in Energy, Springer International Publishing, Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45057-5>
- Sobol' I (2001) Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation* 55(1):271–280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6), the Second IMACS Seminar on Monte Carlo Methods
- Stadt Leipzig Amt für Umweltschutz (2017a) Differenzenkarte des Hauptgrundwasserleiters 2017 - 1991. https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02_3_Dez3_Umwelt_Ordnung_Sport/36_Amt_fuer_Umweltschutz/Umwelt_und_Naturschutz/Gewaesserschutz/Grundwasser/Differenzen_2017-1991.pdf, Zugegriffen: 09.11.2022

- Stadt Leipzig Amt für Umweltschutz (2017b) Hydroisohypsen des Hauptgrundwasserleiters und des oberen Grundwasserleiters. https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.3_Deiz3_Umwelt_Ordnung_Sport/36_Amt_fuer_Umweltschutz/Umwelt_und_Naturschutz/Gewaesserschutz/Grundwasser/Hydroisohypsen_2017_25000.pdf, Zugriffen: 09.11.2022
- Steinbach P, Schulte DO, Welsch B et al (2021) Quantification of bore path uncertainty in borehole heat exchanger arrays using adaptive anisotropic stochastic collocation. *Geothermics* 97(102):194. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102194>
- Stober I, Bucher K (2014) *Geothermie*. Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41763-4>
- Stone N (2011) Gaussian Process Emulators for Uncertainty Analysis in Groundwater Flow. Dissertation, University of Nottingham, <http://eprints.nottingham.ac.uk/11989/>
- Storn R, Price K (1997) Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization* 11(4):341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Ulbrich M, Ulbrich S (2012) *Nichtlineare Optimierung. Mathematik kompakt*, Birkhäuser, Basel
- VDI 4640 (2020) *Thermische Nutzung des Untergrundes*. Tech. rep
- Verband Beratender Ingenieure VBI (ed) (2012) *Oberflächennahe Geothermie. VBI-Leitfaden, VBI-Schriftenreihe, vol 18, 3rd edn*. Verband Beratender Ingenieure VBI, Berlin
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, et al. (2020) SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods* 17(3):261–272, DOI <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Watanabe N, Wang W, McDermott CI et al (2010) Uncertainty analysis of thermo-hydro-mechanical coupled processes in heterogeneous porous media. *Computational Mechanics* 45(4):263–280. <https://doi.org/10.1007/s00466-009-0445-9>
- Xiang Y, Sun DY, Fan W et al (1997) Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model. *Physics Letters A* 233(3):216–220. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(97\)00474-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(97)00474-X)

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Analyse von Haustechnikkomponenten

5

Paul Satke, Jakob Randow, Max Jäschke
und Stephan Schönfelder

Bis zu diesem Kapitel wurde hauptsächlich das unterirdische Teilsystem von geothermischen Anlagen untersucht. Im Folgenden wechselt der Fokus zu den oberirdischen Verbrauchern, deren thermischer Modellierung und deren Verknüpfung mit dem Untergrundmodell.

Wie im abgebildeten Übersichtsschema (siehe Abb. 5.1) dargestellt, bilden die beiden Teilsysteme:

- Quartiersmodell,
- Untergrundmodell

und deren Interaktion in Form von Stoff- und Wärmeübertragung ein Gesamtsystem. Für das Untergrundmodell ist die Kenntnis über die Verbraucher und deren Wärme- bzw. Kältebedarf wichtig (siehe Abschn. 4.1), um die Anzahl und Ausdehnung der Wärmeübertrager im Untergrund zu dimensionieren. Für das Gebäude und speziell die Anlagentechnik ist die Flüssigkeitstemperatur essenziell, um die Anlageneffizienz berechnen zu können. Abschn. 5.1 thematisiert die Modellierung des Quartiersmodells in Form von Gebäuden und Anlagen, die mithilfe der Programmiersprache

P. Satke (✉) · J. Randow · M. Jäschke · S. Schönfelder
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: paul.satke@htwk-leipzig.de

J. Randow
E-mail: jakob.randow@htwk-leipzig.de

M. Jäschke
E-mail: max.jaeschke@stud.htwk-leipzig.de

S. Schönfelder
E-mail: stephan.schoenfelder@htwk-leipzig.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_5



Abb. 5.1 Übersichtsschema des Systems

Modelica¹ beschrieben werden. Darauf folgt die Entwicklung einer Schnittstelle zwischen den beiden Teilsystemen (siehe Abschn. 5.2.1) und die Untersuchung des Gesamtsystems in Abschn. 5.2.

5.1 Simulation von Lastfällen für Stadtquartiere

Die Klimaerwärmung (Arias et al. 2021) und die daraus resultierende Notwendigkeit, die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren, stellen den Gebäudesektor vor große Herausforderungen. Das Potenzial des Sektors ist durch den großen Anteil von ca. 32 % (Raumwärme und Warmwassererzeugung) am Endenergieverbrauch vergleichsweise hoch (BMW i 2021). Quartiere als Zusammenschluss mehrerer benachbarter Gebäude bieten die Chance, einheitliche Versorgungskonzepte mit, im Vergleich zu Einzelgebäuden, höherem Einfluss auf den Energieverbrauch bzw. die Emissionen und einer größeren Bandbreite von Möglichkeiten zu realisieren. Diese Planungsebene hat allerdings Konsequenzen für den Detailgrad der Modellierung, der abnimmt, je größer das betrachtete System ist. Für den Modellansatz ist es deshalb wichtig, die Interpretation des Begriffs *Quartier* bzw. *Stadtquartier* zu erläutern.

5.1.1 Begriffserklärung Stadtquartiere

Der Begriff *Quartier* stammt ursprünglich aus dem Lateinischen *quartarius* und bedeutet Viertel. Im Französischen wurde der Begriff verwendet, um den Teil eines Heerlagers zu beschreiben. Im deutschen Sprachgebrauch wird das Quartier in der Regel benutzt, um eine vorübergehende Unterkunft zu beschreiben (sich einquartieren). Die Präzisierung Stadtquartier löst sich von den bisherigen Bedeutungen und scheint eine Art Konzept-, Projekt- oder Planungseinheit im städtischen Raum zu beschreiben, die allerdings keine offizielle öffentliche Verwaltungseinheit ist.

¹ Unter A.3 werden die Programmiersprache Modelica, die verwendete Simulationsumgebung SimulationX, sowie die Bibliothek *GreenCity* kurz beschrieben.

Die bereits veröffentlichte Literatur schlägt meist relativ unscharfe Begriffsdefinitionen aus einer sozialwissenschaftlichen Perspektive vor. So auch [Wieland \(2014\)](#), der verschiedene Ansätze wie folgt zusammenfasst: „Ein Quartier ist ein innerstädtischer Stadtraum mit einer Ausdehnung von 1 bis 5 ha, der eine robuste und vielfältige Nutzungsmischung aufweist, öffentlich zugänglich ist und sich deutlich durch eine spezifische Qualität und Identität von der Umgebung abgrenzt.“ Diese Definition ist für die Fragestellungen dieses Projekts nur bedingt sinnvoll, allerdings stehen die Merkmale: Ausdehnung von 1 bis 5 ha, innerstädtischer Stadtraum und Nutzungsmischung hervor.

In der Begleitforschung der Förderinitiative Energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt) wird das Quartier durch Siedlungstypen energetisch definiert ([Erhorn 2010](#)). Grundlage für die Siedlungstypen ist der Ansatz von [Häubi und Roth \(1981\)](#), indem zwischen neun Siedlungstypen differenziert wird, um diesen passende Energieversorgungssysteme zuordnen zu können. Die Siedlungstypen stellen unterschiedliche Gebäudeanordnungen und Höhen dar, aus denen sich das Quartier zusammensetzt.

In der 2021 veröffentlichten Studie des Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) wurden neue Stadtquartiere (nach 1990 gebaut) analysiert, die nach einem einheitlichen städtebaulichen Grundkonzept entstanden sind ([Freudenau et al. 2021](#)). Bei dieser Studie musste mindestens einer der folgenden Punkte erfüllt sein, damit ein Bauprojekt als Stadtquartier aufgenommen wurde:

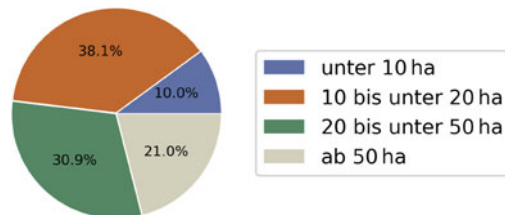
- mindestens 10 ha Fläche,
- mindestens 500 Wohneinheiten oder
- mindestens 1000 Einwohnerinnen und Einwohner.

Der Einfluss von kleineren Quartieren wurde mit diesen Kriterien vermieden. In [Abb. 5.2](#) ist die Flächengröße der untersuchten Quartiere durch 4 Kategorien abgebildet. Die durchschnittliche Flächengröße liegt bei 40,4 ha. Die von [Wieland \(2014\)](#) gewählte Definition einer maximalen Ausdehnung von 5 ha wird hier deutlich überschritten.

Zusätzlich können der Studie weitere Informationen bezüglich der Einwohnerdichte und der Nutzungsmischung der Quartiere entnommen werden (siehe [Abb. 5.3](#)). Die Studie stellt fest, dass es einen Trend zu kleineren, sehr dicht bebauten Quartieren gibt, da die Einwohnerdichte ab 2010 relativ stark zugenommen hat.

Wird die Nutzung der Quartiere betrachtet, dann sind in allen untersuchten Quartieren Wohnflächen vorhanden, 80 % enthalten Grünflächen, 58 % beinhalten öf-

Abb. 5.2 Flächengröße der Quartiere, die vom BBSR untersucht wurden ([Freudenau et al. 2021](#)). Die Anzahl der betrachteten Quartiere entspricht $n = 609$



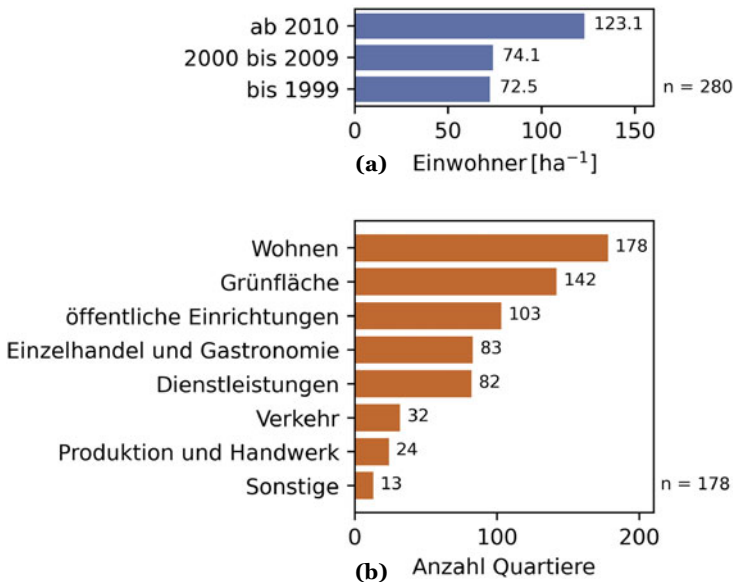


Abb. 5.3 Daten zur Einwohnerdichte (a) und Nutzungsmischung (b) der Studie *Neue Quartiere* des BBSR (Freudenau et al. 2021)

fentliche Einrichtungen, die Bildungs- und Kulturflächen einschließen, 47 % besitzen Einzelhandels- oder Gastronomieflächen und 46 % enthalten Dienstleistungsflächen. Des Weiteren hat die Auswertung der Erhebung ergeben, dass 52,2 % der neuen Stadtquartiere monofunktionale Wohnquartiere sind. In diesen werden über 90 % der Gebäudefläche für Wohnungen genutzt. Nur 44,1 % der Quartiere werden gemischt genutzt, d. h. die Gebäudefläche für Wohnungen liegt zwischen 30 % bis 90 %.

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Ansätze zur Begriffsdefinition des Quartiers beschrieben. An dieser Stelle erfolgt die Festlegung des Begriffs für dieses Projekt: In einem Kompromiss zwischen der Definition von [Wieland \(2014\)](#) und der des BBSR wird die Ausdehnung des besiedelten Gebietes auf einen Bereich von 5 bis 50 ha beschränkt. Die Nutzung der Gebäude kann sowohl als Wohn- sowie Nichtwohngebäude erfolgen, wobei die Nichtwohngebäude in die Nutzungsarten Büro-, Einzelhandels- und Bildungsgebäude unterteilt werden. Wesentlich für das Quartier ist die Energieversorgung nach einem einheitlichen Konzept.

5.1.2 Modellierung der Quartiersgebäude

Oberflächennahe Geothermieanlagen liefern in der Regel keine Temperaturen, die direkt zum Heizen von Gebäuden genutzt werden können. Das Temperaturniveau

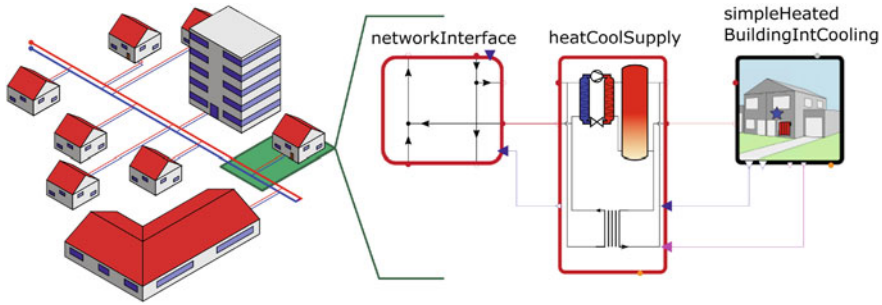


Abb. 5.4 Grundlegender Quartiersaufbau und zentrale Komponenten des Gebäude- und Anlagenmodells pro Gebäude

der Sole (-3 °C bis 17 °C) wird mithilfe einer Wärmepumpe angehoben, um das Heizsystem mit entsprechenden Temperaturen (30 °C bis 90 °C) versorgen zu können. Die thermische Versorgung der einzelnen Gebäude wird durch ein Wärmenetz realisiert, dessen Temperatur nicht angehoben wird. Im Fall von Erdwärmesonden – eng. Borehole Heat Exchanger (BHE) als geothermische Wärmeübertrager sind die Temperaturen im Netz geringeren Schwankungen (5 °C bis 15 °C) unterworfen, da die tieferen Bereiche des Untergrunds kaum von Wetterbedingungen beeinflusst werden. Das kalte Wärmenetz kann auch zum Kühlen der Gebäude genutzt werden und trägt dadurch zur Regeneration der Untergrundtemperatur bei. Abb. 5.4 veranschaulicht das beschriebene Konzept und den Modellierungsansatz durch die Modelica typischen Komponenten:

- NetworkInterface (NeI),
- HeatCoolSupply (HCS) und
- SimpleHeatedBuildingIntCooling (SHBIC),

die zusammen jeweils ein Gebäude beschreiben. Diese Komponenten basieren auf der *GreenCity* Bibliothek (Unger et al. 2012). Dieser Abschnitt erläutert das Gebäudemodell SHBIC der Bibliothek.

Das Gebäude wird durch ein Systemmodell² mit acht Ein- und Ausgängen beschrieben, das aufgrund von Vereinfachungen (basierend auf dem Kurzverfahren Energieprofil des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) (Loga et al. 2005)) und der integrierten Kühlungsmöglichkeit ausgewählt wurde (siehe Abb. 5.5). Die Vereinfachungen reduzieren sowohl den Modellierungs- als auch den Berechnungsaufwand, dadurch eignet sich die Komponente grundsätzlich für Quartiersbetrachtungen. Das Gebäude wird durch eine Zone mit homogener Temperatur und dessen Zonengren-

² Die Bezeichnungen Systemmodell und Komponentenmodell sollen die unterste Modellebene von darauf aufbauenden Modellen abgrenzen. Komponentenmodelle beschreiben physikalische Zusammenhänge mit Gleichungen (unterste Modellebene). Systemmodelle enthalten nicht nur Gleichungen, sondern auch Komponenten- oder Systemmodelle und deren Verbindungen (Tiller 2014).

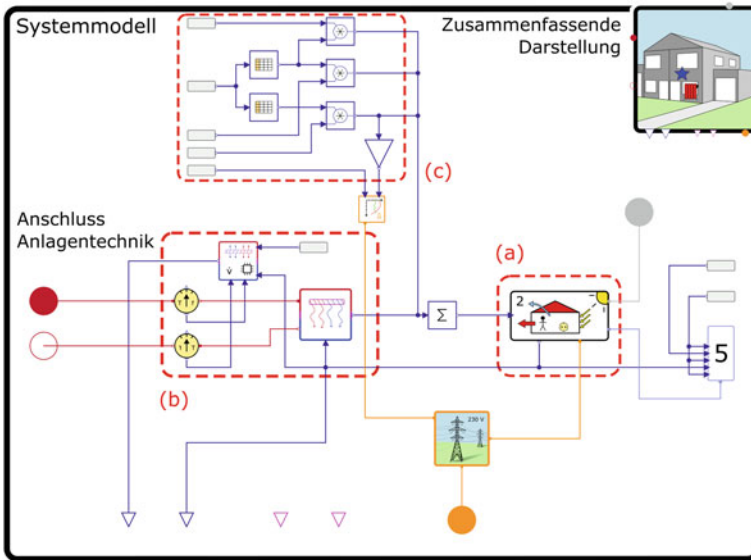


Abb. 5.5 Systemmodell SHBIC aus der *GreenCity* (Unger et al. 2012) Bibliothek und dessen Aufbau

zen beschrieben. Die Innenraumtemperatur wird durch den Wärmestrom aus den folgenden Einflüssen berechnet (Markierungen korrespondieren zu Abb. 5.5):

- Transmission (a),
- solare Strahlung (a),
- Lüftung (c),
- innere Quellen
 - Heiz- bzw. Kühlsystem (b),
 - Personen (c),
 - elektr. Verbraucher (c),
- thermische Massen (a).

Das integrierte Heiz- bzw. Kühlsystem modelliert eine Flächenheizung und ihre Regelung, die den Innenraum auf einen Temperaturbereich von 20 °C bis 27 °C temperiert, indem der Volumenstrom entsprechend eingestellt wird.

Alle Parameter, auch die der Komponentenmodelle, werden mit standardisierten Werten initialisiert, die teilweise von übergeordneten Parametern des Systemmodells abhängen. Die bereits erwähnten Vereinfachungen reduzieren die Parameter, die vom Nutzer angepasst werden sollen auf die in Tab. 5.1 dargestellten. In einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der einzelnen Parameter auf den Energiemengenbedarf des Gebäudes untersucht, um zu prüfen, ob die Anpassung aller Parameter notwendig ist. Aufgrund der teilweise diskontinuierlichen Definitionsbereiche der

Tab. 5.1 Übergeordnete Parameter des Systemmodells SimpleHeatingIntCooling und deren Definitionsbereiche für die Sensitivitätsanalyse

Parameter	Beschreibung	Einheit	Referenz	Definitionsbereich
Material				
buildingAge	Zeitraum der Gebäudeerbauung	a	1918	{ 1918; 1948; 1957; 1968, 1978; 1983; 1994; 2002; 2004; 2007; 2009; 2014; 2016; 2021 }
deltaU	Faktor des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten	%	50	[1; 200]
windowAge	Zeitraum des Fensteraustausches	a	1918	{ 1918; 1948; 1957; 1968, 1978; 1983; 1994; 2002; 2004; 2007; 2009; 2014; 2016; 2021 }
windowType	Fenstermaterial und Aufbau	–	Plastic windows, insulation glazing	{ Wooden windows, single glazed; Wooden windows, double glazed; Plastic windows, insulation glazing; Aluminium or steel windows, insulation glazing }
buildingType	Wohn- oder Nichtwohngebäude	–	Residential building	{ Residential building, Non-residential building }
Geometrie				
nFloors	Anzahl der Stockwerke	–	3	[1; 5]
ALH	Fläche des temperierten Gebäudeteils (nach DIN V 18559-1 2018 als Nettogrundfläche bezeichnet)	m ²	450	[100; 5000]
cRH	Deckenhöhe	m	2,6	[2; 5]
AWindows	Fensterfläche	%	17,3	[0,2; 100]
flanking	Anzahl der anschließenden Gebäude	–	0	{0; 1; 2}
outline	Gebäudeform	–	true	{true, false}
roofType	Dachtyp und Nutzung	–	Attic floor unheated	{ Flat or slightly inclined roof; Attic floor unheated; Attic floor partly heated; Attic floor fully heated }

(Fortsetzung)

Tab. 5.1 (Fortsetzung)

Parameter	Beschreibung	Einheit	Referenz	Definitionsbereich
dormers	Vorhandensein von Dachgauben	–	false	{true, false}
cellarType	Vorhandensein des Kellers und Nutzung	–	Basement unheated	{Building without Basement; Basement unheated; Basement partly heated; Basement fully heated}
Nutzung				
Pe(Curve	Jahresverteilung des Strombedarfs	–	Reference distribution	Reference distribution
EelYearA	Jährlicher elektr. Energieverbrauch pro m ²	kWh m ⁻²	2,2̄	[0; 30]
presenceCurve	Jahresverteilung der Personenanwesenheit	–	Reference distribution	{Never being present; Reference distribution; Always being present}
nPersA	Anzahl der Personen pro 100 m ²	m ⁻²	2	[0; 20]

Parameter wurde die Methode One-Variable-at-A-Time (OVAT) angewendet, um die Sensitivitäten zu ermitteln.

Neben den übergeordneten wurden zwei weitere Parameter untersucht, die zu dem Komponentenmodell `BuildingZone` (dargestellt unter (a) in Abb. 5.5) innerhalb des Systemmodells SHBIC gehören, um den Einfluss der Gebäudeorientierung und der Verschattung einordnen zu können (siehe Tab. 5.2). Die Sensitivitätsanalyse basiert auf Jahressimulationen mit Umwelteinflüssen, die dem Test Reference Year (TRY) 2015 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für Leipzig entsprechen.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse in sortierter Form in Abb. 5.6 dargestellt. Die Differenz zwischen dem sich über die Variation des Parameters einstellenden minimalen und dem maximalen Jahresenergiebedarf ist ausschlaggebend für die Reihenfolge der Parameter. Der Fall, dass alle Parameter mit den Referenzwerten simuliert wurden, ist durch die blaue Linie kenntlich gemacht. Eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Sensitivitäten sowie ausgewählte Variationen von verschiedenen Parametern sind unter [Satke \(2022\)](#) zu finden.

Die ursprüngliche Frage, inwiefern alle übergeordneten Parameter des Systemmodells SHBIC angepasst werden müssen, kann durch die Sensitivitätsanalyse mit Nein beantwortet werden. Die Variation der Parameter `dormers` und `windowType` hat z. B. keine Auswirkung auf den Jahresenergiebedarf, wenn die restlichen Parameter mit ihren Referenzwerten simuliert werden. Die Betrachtung des Quellcodes des Systemmodells SHBIC zeigt viele Parallelen zu dem Systemmodell `SimpleHeatedBuilding`, die darauf schließen lassen, dass es sich bei der untersuchten Komponente um ein modifiziertes Modell handelt. Gegebenenfalls haben die hier auffälligen Parameter ursprünglich einen Einfluss auf den Jahresenergieverbrauch im Modell `SimpleHeatedBuilding` oder benötigen eine andere Parameterkonstellation innerhalb des Modells SHBIC, um das Ergebnis zu beeinflussen.

Für konzeptionelle Simulationen ist es wünschenswert, den Modellierungsaufwand so gering wie möglich zu halten. Deshalb wird eine reduzierte Gebäudeparametrisierung eingeführt, die zusammen mit einem Python-Skript eine automatische Modellgenerierung ermöglicht. Basierend auf den einflussreichsten Parametern der Sensitivitätsanalyse und der anfänglichen Quartiersdefinition ergibt sich die reduzier-

Tab. 5.2 Zusätzliche Parameter des Komponentenmodells `BuildingZone` innerhalb des Systemmodells SHBIC, die in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt wurden

Parameter	Beschreibung	Einheit	Referenz	Definitionsbereich
<code>epsShading</code>	Prozentuale Verschattung der Zonengrenze	%	20	[0; 100]
<code>alphaOrientation</code>	Orientierung der Zonengrenze (0°-Nord, 90°-Ost, 180°-Süd, 270°-West)	°	0	[0; 90]

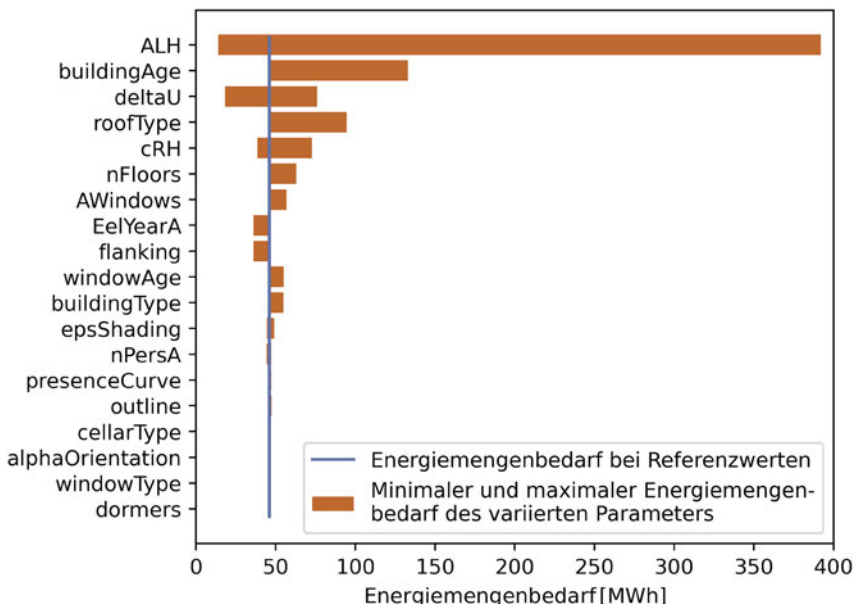


Abb. 5.6 Ergebnisse der OVAT-Sensitivitätsanalyse in Form des sortierten Unterschieds zwischen maximalem und minimalem Jahresenergieverbrauch der untersuchten Parameter

te Gebäudeparametrisierung wie in Tab. 5.3 dargestellt. Der Parameter `number` dient lediglich der Unterscheidung der verschiedenen Gebäude. `usage` hingegen kombiniert die Parameter `EelYearA`, `pelCurve`, `nPresA` sowie `presenceCurve` in vier Nutzungsmöglichkeiten: Wohnen, Büro, Einzelhandel und Bildung. Je nach Nutzungsart des Gebäudes wird die maximale Personenanzahl pro 100 m², die Anwesenheitsverteilung der Personen im Gebäude sowie der elektr. Energieverbrauch in kWh/m² mit dem dazugehörigen Lastprofil überschrieben. Die maximale Personenanzahl pro 100 m² sowie deren Anwesenheitsverteilung ist für die Nutzungsarten Wohnen, Büro und Bildung bereits in der Bibliothek hinterlegt (siehe Tab. 5.4). Im Fall des Einzelhandels werden 15 Personen pro 100 m² angenommen. Der Wert von 2,6 Personen pro 100 m² für die Wohnnutzung wurde anhand von Daten des Deutsches Institut für Wirtschaft (DIW) überprüft (Liebig et al. 2019). Diese Daten zeigen, dass 50 % der deutschen Bevölkerung mehr als 41 m² pro Person und 50 % der deutschen Bevölkerung weniger als 41 m² pro Person zur Verfügung stehen. Durch die Umrechnung des Wertes in Personen pro 100 m² ergibt sich der Vergleichswert zu ca. 2,4 Personen pro 100 m². Da sich kein großer Unterschied zu dem in der Bibliothek hinterlegten Wert ergibt, werden die Standardeinstellungen beibehalten.

Der ebenfalls in Tab. 5.4 dargestellte jährliche elektr. Energieverbrauch wurde für die Nutzungsart Wohnen aus dem Stromspiegel von Deutschland aus dem Jahr 2021 ermittelt und für die restlichen Nutzungsarten der Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand entnommen (BMWi 2015).

Tab. 5.3 Beispiel für die reduzierte Gebäudeparametrisierung

Number	ALH	buildingAg	roofType	cRH	nFloors	AWindows	usage
[-]	[m ²]	[a]	[-]	[m]	[-]	[m ²]	[-]
1	200	2016	Unheated	2,6	2	46,3	Wohnen
2	240	2007	Heated	2,6	2	50,0	Büro

Tab. 5.4 Skalierungsfaktoren der Verteilungen in Form von der maximalen Personenanzahl pro 100 m² und dem jährlichen elektr. Energieverbrauch zur Beschreibung des Nutzungsverhaltens in Gebäuden

Parameter	Einheit	Wohnen	Büro	Einzelhandel	Bildung
nPersA	m ⁻²	2,60	8,7	15	6
EelYearA	kWhm ⁻²	25,14	35,0	85	20

Wie viele Personen sind wann anwesend bzw. wie viel Strom wird wann verbraucht? Diese Fragen werden von den Anwesenheitsverteilungen und den Stromlastprofilen beantwortet. Die Anwesenheitsverteilungen werden, wie bei deren Skalierungswerten, von der Bibliothek bereitgestellt. Nur die Anwesenheit der Nutzungsart Einzelhandel wird nach eigenem Ermessen angenommen. In Abb. 5.7 sind die Anwesenheitsverteilungen dargestellt.

Die Definition der Anwesenheit ist stündlich aufgelöst und berücksichtigt Feiertage als Sonntage sowie Heiligabend und Silvester als Samstage. Die Stromlastprofile werden nach dem Verfahren des Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) zur Ermittlung repräsentativer Lastprofile berechnet. Bei diesen Profilen fließt die wöchentliche Definition in drei Ausführungen in das resultierende Lastprofil ein. Ein Jahr wird in vier Bereiche unterteilt: Winter, Sommer und zwei Übergangsbereiche (siehe Abb. 5.8). Dementsprechend wird das Lastprofil aus diesen

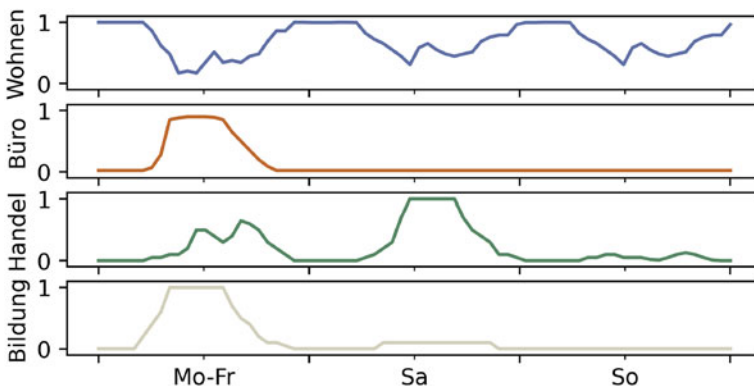


Abb. 5.7 Prozentuale Anwesenheitsverteilungen der unterschiedlichen Nutzungsarten

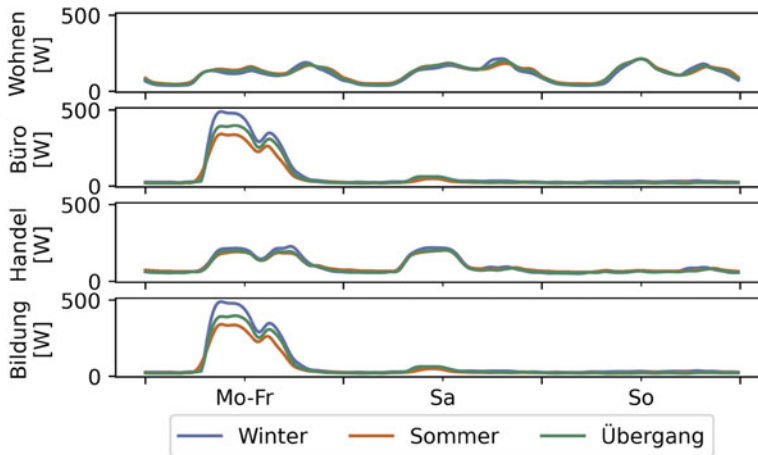


Abb. 5.8 Stromlastprofile der unterschiedlichen Nutzungsarten differenziert nach Bereichen; ermittelt nach [Bitterer und Schieferdecker \(1999\)](#)

Bereichslastprofilen zusammengesetzt. Die Lastprofile werden auf einen Jahresverbrauch von 1 kWh normiert, um im Zusammenhang mit dem Jahresenergieverbrauch pro m^2 aus Tab. 5.4 den festgelegten Stromverbrauch zu erreichen. Die zusätzlichen Modifikationen bezüglich Feiertagen, Heiligabend und Silvester werden entsprechend der Anwesenheitsverteilung umgesetzt. Bei den Nutzungsarten Bildung, Büro und Einzelhandel wird davon ausgegangen, dass die Stromprofile, abgesehen von den unterschiedlichen Bereichen, statisch beschrieben werden können. Bei der Nutzungsart Wohnen wird das gesamte Lastprofil mit täglichen Dynamisierungsfaktoren multipliziert ([Bitterer und Schieferdecker 1999](#)).

5.1.3 Validierung des Gebäudemodells

Ziel der Validierung ist es, zu überprüfen, wie gut die Ergebnisse der Simulation den realen Messwerten entsprechen. Dafür wird ein Gebäude, von dem die jährlich benötigte thermische Energiemenge in Form eines Messwerts vorliegt, nachmodelliert. Bei dem Gebäude handelt es sich um ein Einfamilienhaus (EFH) dessen Planungsunterlagen (Geometrie, Materialparameter) vorliegen. Die gute Datenlage erlaubt nicht nur die Modellierung mit den reduzierten Gebäudeparametern des Systemmodells SHBIC, sondern auch eine detaillierte Parametrisierung des Komponentenmodells BuildingZone. Für die detaillierte Parametrisierung wird die jeweilige massive Fläche des Bauteils A_B , dessen Wärmeübergangskoeffizienten U_B , spezifische Wärmekapazität c_B , Dichte ρ_B und Dicke d_B angegeben (siehe Tab. 5.5). Neben dem Index B für *Boundary* werden die Indizes W für *Window* und D für *Door* eingeführt

Tab. 5.5 Geometrie- und Materialparameter der massiven Zonengrenze der detaillierten Parametrisierung des Validierungsmodells

	Orientierung	Neigung	A_B	U_B	c_B	ρ_B	d_B
		[°]	[m ²]	[Wm ⁻² K ⁻¹]	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	[kg m ⁻³]	[m]
1	N/O	90	39,50	0,220	850	356,0	0,40
2	N/W	90	33,63	0,220	850	356,0	0,40
3	S/W	90	36,21	0,220	850	356,0	0,40
4	S/O	90	33,60	0,220	850	356,0	0,40
5	N/O	90	120,00	0,320	852	1607,0	0,35
6	–	0	98,44	0,330	852	1733,0	0,56
7	N	30	49,72	0,142	880	158,1	0,53

Tab. 5.6 Geometrie- und Materialparameter der Fenster und Türen, der detaillierten Parametrisierung des Validierungsmodells

	Fenster		Türen	
	A_W [m ²]	U_W [W m ⁻² K ⁻¹]	A_D [m ²]	U_D [W m ⁻² K ⁻¹]
1	8,31	0,89		
2	14,68	3,76	3,76	0,77
3	11,60	0,74		
4	11,71	0,73		

Tab. 5.7 Reduzierte Gebäudeparametrisierung des Validierungsmodells

Number	ALH	buildingAg	roofType	cRH	nFloors	AWindows	Usage
[-]	[m ²]	[a]	[-]	[m]	[-]	[m ²]	[-]
1	200	2016	Unheated	2,6	2	46,3	Wohnen

und die entsprechenden Werte in Tab. 5.6 aufgelistet. Die reduzierte Parametrisierung führt zu den in Tab. 5.7 aufgelisteten Angaben. Die beiden Validierungsmodelle wurden unter den Umwelteinflüssen des TRY 2015 des Standortes Freiberg für den Zeitraum von einem Jahr berechnet, da diese zu Planungszwecken genutzt werden können. Das detailliert parametrisierte Validierungsmodell wurde zusätzlich mit den 2020 gemessenen Umwelteinflüssen des DWD simuliert, da der Messwert der benötigten Jahresenergiemenge aus diesem Zeitraum stammt.

In Abb. 5.9 sind die Ergebnisse der drei Simulationen zuzüglich der ursprünglichen Auslegungsberechnung des Planungsbüros als jährlich benötigter thermischer Energiemengenbedarf dargestellt. Das Ergebnis der reduzierten Parametrisierung weicht um ca. 51 % von der gemessenen Energiemenge ab. Die detaillierte Parametrisierung unter dem Umwelteinfluss des TRY liegt mit nur ca. 1 % Abweichung

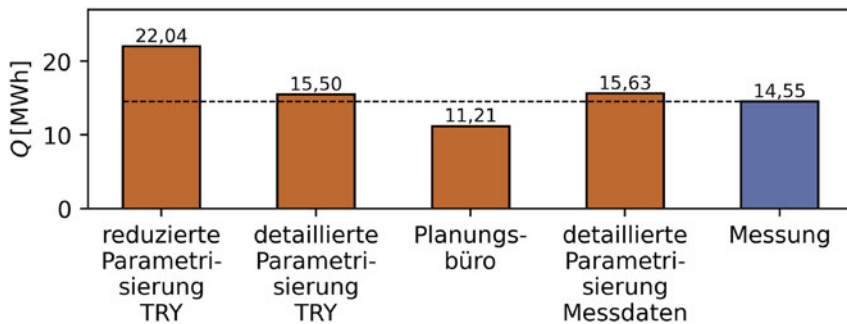


Abb. 5.9 Ergebnisse der reduzierten und detaillierten Validierungsmodelle unter den Umwelteinflüssen des TRY sowie gemessenen Umwelteinflüssen im Vergleich zur realen Auslegungsrechnung des Planungsbüros und dem Monitoringergebnis

wesentlich näher an dem Messergebnis. Der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Umweltbedingungen ist in diesem Fall mit nur 126,2 kWh sehr gering. Die ursprüngliche Berechnung des Planungsbüros weicht um ca. 23 % von der Messung ab, im Gegensatz zu den Simulationsrechnungen liegt der ermittelte Energiebedarf allerdings unter dem tatsächlichen. Für die Praxis ist die Auslegung nach einem geringer berechneten Energiebedarf durchaus kritisch, da die Unterdimensionierung zu Versorgungsengpässen führen kann. In einem weiteren Vergleich wird die relativ große Abweichung der reduzierten Parametrisierung untersucht, indem zwischen den geometrischen und materialbezogenen Vereinfachungen differenziert wird. Die Parameter `ALH`, `roofType`, `crH`, `nFloors` und `AWindows` beeinflussen vor allem die Geometrie, wohingegen der Parameter `buldingAge` das Material bestimmt. Die Untersuchung vergleicht deren Einfluss auf den thermischen Energiebedarf des Validierungsmodells durch die Präzisierung des Materialparameters auf der einen und die Präzisierung der geometrischen Parameter auf der anderen Seite. Alle Simulationen dieser Analyse wurden mit den gleichen Umwelteinflüssen des TRY 2015 berechnet.

Abb. 5.10 stellt die unterschiedlichen thermischen Energiebedarfe innerhalb eines Jahres dar. Der Einfluss des präzisierten Materialparameters `buildingAge`, der U_B , c_B , ρ_B etc. pauschal nach Baujahr definiert, ist erheblich und seine Präzisierung bzw. die der abhängigen Parameter führt zu Abweichungen von ca. 1 % im Vergleich zu dem Messwert. Die Präzisierung der geometrischen Parameter resultiert in einem ebenfalls besseren Ergebnis, allerdings beträgt die Abweichung zum Messwert noch ca. 26 %.

5.1.4 Modellierung der Anlagentechnik

Das Modell der Anlagentechnik versorgt das bereits eingeführte Gebäudemodell (Abschn. 5.1.2) sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall. Im Gegensatz zu dem Gebäudemodell SHBIC stellt die Bibliothek *GreenCity* keine Systemkomponenten zur

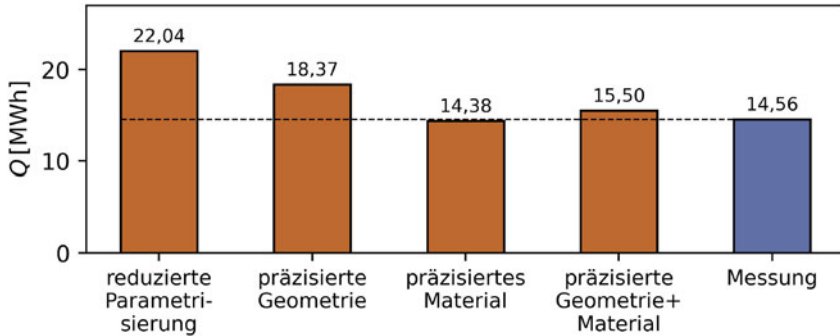


Abb. 5.10 Ergebnisse der Validierungsmodelle, die zwischen reduzierten Material- und Geometrieparametern differenzieren

Verfügung, die in der Lage sind, das gesamte Verhalten der Anlage zu simulieren. Für die Modellierung der Anlage müssen einzelne Komponentenmodelle in einem System aufgebaut werden, um die Versorgung zu realisieren. Das resultierende Systemmodell HCS und seine Zusammensetzung aus Komponentenmodellen ist in Abb. 5.11 dargestellt. Ein zentrales Teilsystem ist die Wärmepumpe und ihre Regelung, welche die quellseitigen Temperaturen von -3 °C bis 17 °C auf ca. 40 °C im Heizkreislauf anhebt, um die oberste Schicht des Heizungspufferspeichers auf einen Temperaturbereich von 34 °C bis 40 °C zu regulieren. Der Heizungspufferspeicher versorgt die Fußbodenheizung (Komponentenmodell im Gebäudemodell) unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Leitungen. Parallel zur Wärmepumpe wird ein Plattenwärmeübertrager modelliert, der die relativ geringen quellseitigen Temperaturen für das passive Kühlen des Gebäudes nutzt. Innerhalb des Systemmodells wird zwischen zwei zirkulierenden Medien unterschieden: dem quellseitigen Glykol-Wasser-Gemisch und Wasser auf der Seite des Gebäudes.

Das im Rahmen des Gebäudemodells eingeführte Python-Skript schätzt den voraussichtlichen thermischen Leistungsbedarf des Gebäudes mithilfe des Baujahrs und der beheizten Fläche ab, um eine initiale Parametrisierung der Komponentenmodelle festzulegen (siehe Tab. 5.8). Mit der angenommenen Leistung werden die Wärmepumpe und der Heizpufferspeicher nach Herstellerangaben parametrisiert; in diesem Fall nach den *Viessmann*-Modellen *VITOCAL 200-G* (Wärmepumpe, siehe Tab. 5.9) und *VITOCCELL 100-E* (Heizungspufferspeicher, siehe Tab. 5.10). Für die Kategorisierung des Heizungspufferspeichers in Litern wird die angenommene Leistung entsprechend dem Planungshandbuch mit dem Faktor 20 kW^{-1} multipliziert (*Viessmann 2011*).

Das Wärmepumpenmodell basiert auf zwei charakterisierenden Funktionen, welche die thermische Gesamtleistung \dot{Q}_{HP} und die Leistungszahl der Wärmepumpe – eng. Coefficient of Performance (COP) in Abhängigkeit der Eintrittstemperaturen sowohl quellseitig als auch heizseitig definieren. Die ursprünglichen Werte der Funktionen sind für relativ hohe Leistungen ausgelegt (siehe Abb. 5.12), die bei geringen quellseitigen Volumenströmen in sehr niedrigen Austrittstemperaturen aus

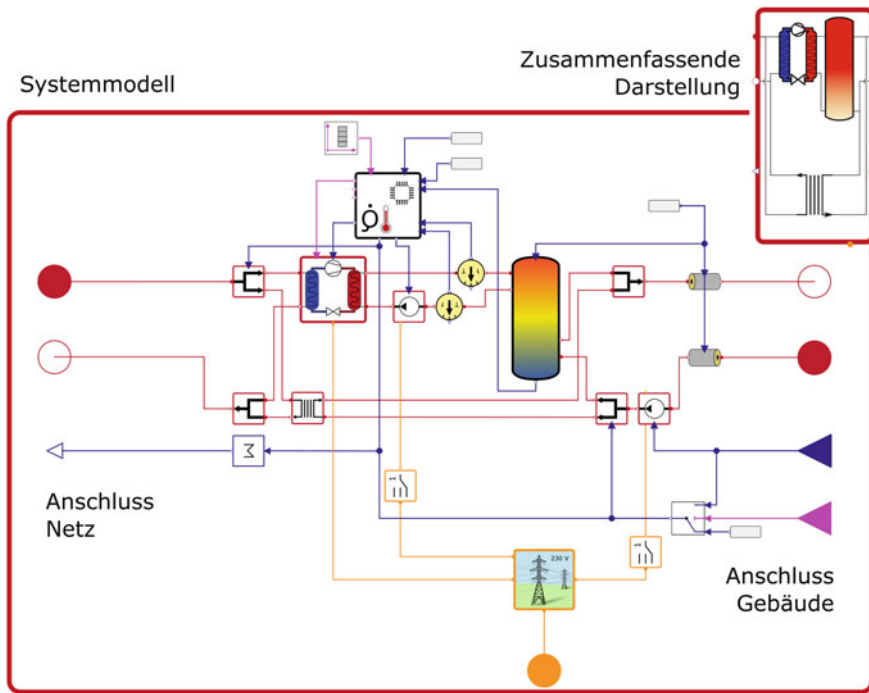


Abb. 5.11 Zusammenfassendes Systemmodell HCS und dessen Aufbau

Tab. 5.8 Flächenbezogener Heizleistungsbedarf in Abhängigkeit des Baujahrs zur Vordimensionierung der Anlagentechnik (Rogatty 2006)

Baujahr	Vor 1958	1959–1968	1969–1973	1974–1977	1978–1983	1984–1994	Ab 1995
Heizleistungsbedarf 180 von EFH [W/m ²]	180	170	150	115	95	75	60

der Wärmepumpe resultieren. Unter der Annahme, dass sich die grundlegende Form der Funktionen auch bei niedrigeren Leistungen nicht ändert, werden die Funktionen mithilfe des gemessenen Betriebspunktes aus Tab. 5.9 skaliert, um die Wärmepumpe präziser zu modellieren. Außerdem ist die Wärmepumpe in der Lage, \dot{Q}_{HP} in einem Bereich von 20 % bis 100 % je nach Bedarf zu variieren.

Die Leitungen, die den Heizungspufferspeicher sowie den Plattenwärmeübertrager mit der Fußbodenheizung verbinden, werden nach DIN EN 15316-3 (2017) dimensioniert. Die Norm unterteilt das wasserführende Leitungssystem in drei Bereiche: den Anschluss des Wärmeübertragers (Radiatoren) an senkrechte Schächte, die senkrechten Schächte und den Basisverteiler/-sammler. Der Bereich des Basisverteilers liegt nach Norm im unbeheizten Raum und ist deshalb für thermische Verluste relevant. Die hier verlegte Leitungslänge L_{Basis} wird mit der Vereinfachung einer

Tab. 5.9 Parametrisierung der Wärmepumpe nach dem Modell *VITOCAL 200-G* von *Viessmann*

Typ BWC	Einheit	201.B06	201.B08	201.B10	201.B13	201.B17
Nenn-Wärmeleistung (B0/W35, 5 K Spreizung) ³	kW	5,76	7,54	10,36	12,97	17,35
COP(B0/W35, 5 K Spreizung)	–	4,60	4,64	4,81	4,93	4,51
Volumen Sole	l	3,3	3,3	3,9	4,5	5,9
Nennvolumenstrom Sole	lh ⁻¹	1100	1300	1720	2100	2700
Volumen Heizwasser	l	3,3	3,5	3,8	4,6	5,7
Min. Volumenstrom Heizwasser	lh ⁻¹	600	710	920	1115	1500

³Angabe des Betriebspunktes der Wärmepumpe nach dem Prüfverfahren [DIN EN 14511-2 \(2019\)](#). B0 kennzeichnet die Eintrittstemperatur von 0 °C der Sole (eng. Brine) in die Wärmepumpe. W35 beschreibt die Austrittstemperatur des Wassers von 35 °C aus der Wärmepumpe bei einer Spreizung von 5 K, also einer heizseitigen Eintrittstemperatur von 30 °C

Tab. 5.10 Parametrisierung des Heizungspufferspeichers nach dem Modell *VITOCCELL 100-E* von *Viessmann*

Volumen [l]	200	400	600	750	950	1500	2000
Durchmesser [m]	0,582	0,859	1,064	1,064	1,064	1,31	1,31
Wärmestrom bezüglich Temp. [W k ⁻¹]	1,29	1,67	1,94	2,08	2,27	3,43	4,21

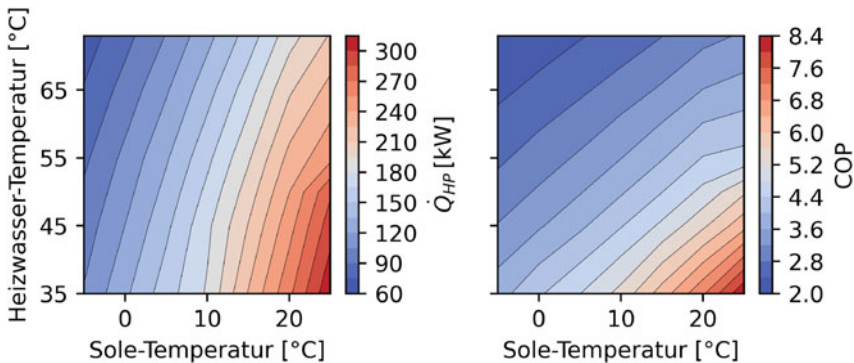


Abb. 5.12 Darstellung der Heizleistungs- und COP-Funktionen der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Eintrittstemperaturen; ursprüngliche Initialisierungswerte der *GreenCity* Bibliothek

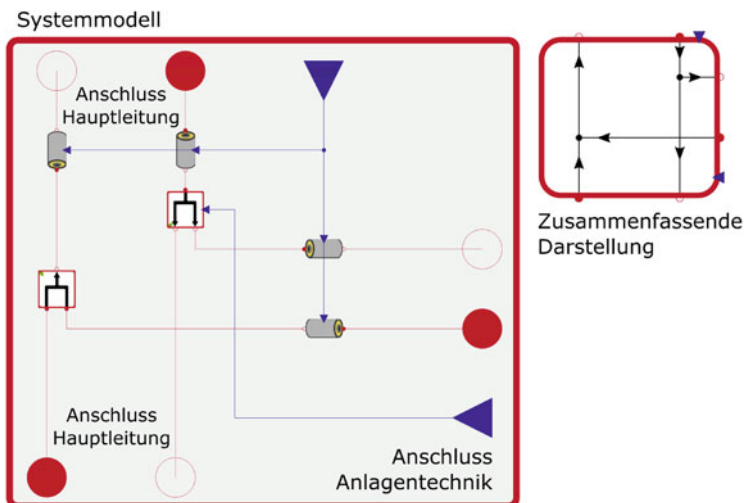


Abb. 5.13 Zusammenfassendes Systemmodell NeI und dessen Aufbau

quadratischen Nettogrundfläche des Gebäudes A_{NGF} durch:

$$L_{Basis} = 2\sqrt{A_{NGF}} + 0,0325\sqrt{A_{NGF}} + 6 \quad (5.1)$$

berechnet und hälftig auf Vor- und Rücklauf des Heizsystems aufgeteilt. Die Umgebungstemperatur für alle Komponenten, die sich in der Regel in unbeheizten Räumen befinden, wird nach [DIN EN 15316-3 \(2017\)](#) mit konstanten 13°C angenommen.

Für übergeordnete Konzepte auf Quartiersebene werden häufig Wärmequellen genutzt, die über Nahwärmenetze mit den Gebäuden verbunden werden. Die Verteilung der Flüssigkeit innerhalb des Netzes und die thermischen Einflüsse des umgebenden Untergrunds werden mit dem Systemmodell NeI abgebildet (siehe [Abb. 5.13](#)). Innerhalb des Systemmodells werden ein Abschnitt der größer dimensionierten Hauptleitung, die Hausanschlussleitungen sowie die benötigten Ventile berücksichtigt. Die Temperaturen des umgebenden Erdreichs werden für eine Tiefe von 2 m aus den Wetterdaten des TRY abgeleitet. Dadurch wird die Speicherfähigkeit des Erdreichs nicht abgebildet. Zusätzlich muss einschränkend ergänzt werden, dass hydraulische Druckverluste in der Modellierung des Nahwärmenetzes nicht berücksichtigt werden.

Da im Rahmen dieses Buchs nicht in aller Einzelheit auf die Parametrisierung des Modells eingegangen wird, sei die folgende Arbeit von [Satke \(2022\)](#) genannt, die ausgewählte Aspekte der Modellierung detaillierter dokumentiert.

5.1.5 Validierung der Anlagentechnik

Die Simulationsmodelle der Anlagentechnik, die im Projekt Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadt-

quartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes (EASyQuart) verwendet werden, sollen anhand eines Vergleiches von Simulationsergebnissen und Messdaten validiert werden. Die Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart stellt dafür ihre Messdatenbank, die im Rahmen des Projekts Kommunale netzgebundene Energieversorgung – Vision 2020 am Beispiel der Gemeinde Wüstenrot (EnVisaGe) erfasst wurde, dankenswerterweise zur Verfügung (Pietruschka 2016). Im Rahmen dieses Projekts wurde ein horizontaler Erdwärmekollektor ausgelegt und in Betrieb genommen, um ein kleines Wohnquartier über ein kaltes Nahwärmenetz zu versorgen (Brennenstuhl et al. 2019). Die Datenbank differenziert zwischen intensiv und extensiv gemessenen Gebäuden. Von besonderem Interesse sind hierbei die sechs intensiv gemessenen Gebäude, deren Daten im Zeitraum von 2017 bis 2021 vorliegen, da die Vielzahl an Sensoren eine genaue Einstellung der Randbedingungen ermöglicht. Außerdem sind fünf extensiv gemessene Gebäude enthalten. Die Sensorik der extensiven Gebäude wurde zu einem späteren Zeitpunkt verbaut und beschränkt sich auf die Messung der wichtigsten Energieflüsse in einem Zeitraum von 2019 bis 2021.

Die in der Datenbank enthaltenen Daten sind Rohdaten und stammen direkt von der in den Gebäuden verbauten Sensorik. Mitunter sind nicht auswertbare Zeiträume aufgrund von fehlerhaften Messungen der Sensoren in der Datenbank enthalten. Somit ergibt sich die Notwendigkeit, die vorliegenden Daten über knapp viereinhalb Jahre auf diese Messfehler zu untersuchen und daraus einen optimalen Zeitraum für die Validierung abzuleiten.

5.1.5.1 Auswertung der EnVisaGe-Datenbank

Das Ziel der Datenbankauswertung besteht darin, die fehlerhaften Messwerte der Sensoren eines Gebäudes auf einen Blick darzustellen. Hierzu soll eine Fehlermatrix erstellt werden. In den Zeilen der Matrix sind alle Sensoren eines Gebäudes aufgelistet, die Spalten werden durch eine Unterteilung des gesamten Zeitraums in Wochen gebildet. Die Sensoren weisen zum Teil unterschiedliche Messintervalle auf, sodass ein Sensor mit einem kurzen Messintervall, d. h. viele Messwerte je Woche, bei der Erkennung fehlerhafter Zeiträume überrepräsentiert ist. Deshalb wird in der Fehlermatrix ein skaliertes Fehler dargestellt. Die Skalierung erfolgt anhand des minimalen Messintervalls aller Sensoren. Ein Matrixeintrag gibt also die skalierte Summe an Messfehlern eines Sensors in der jeweiligen Woche an.

Die Aussagekraft der Fehlermatrix wird maßgeblich durch die Definition von fehlerhaften Zeiträumen beeinflusst, sodass hierbei mit äußerster Sorgfalt vorgegangen werden muss. Es wird mit der Prämisse gearbeitet, dass kein Zeitraum mit brauchbaren Messwerten als Fehler erkannt werden darf. Anhand einer grafischen Vorabanalyse einiger Sensoren konnten die folgenden relevanten Fehlerkategorien ermittelt werden:

- fehlende Messwerte,
- Messwerte außerhalb eines Toleranzbandes und
- lange gleichbleibende Messwerte.

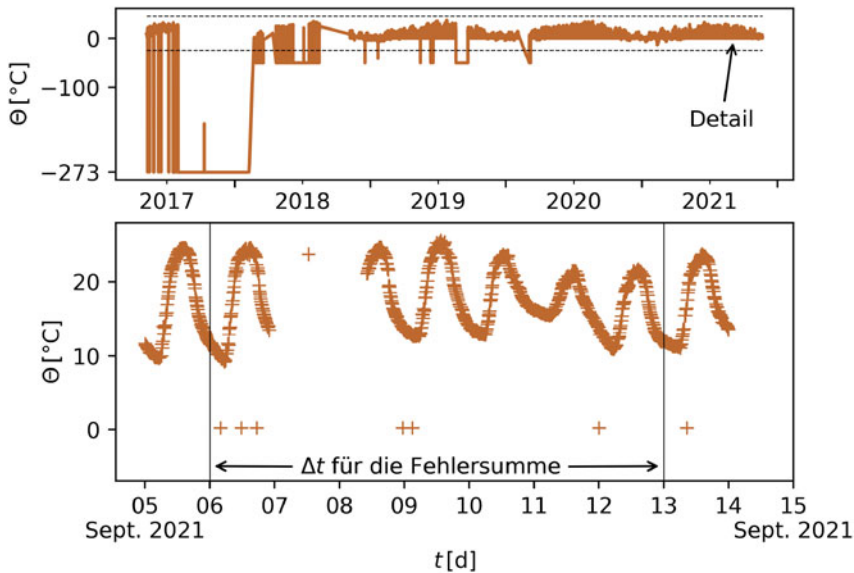


Abb. 5.14 Messsignal eines Außentempersensors aus der Datenbank des EnVisaGe-Projekts

In Abb. 5.14 ist das Messsignal eines Außentempersensors dargestellt. In der zweiten Jahreshälfte 2017 liefert dieser Sensor über einen langen Zeitraum einen Wert von $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dieser Wert der Außentemperatur ist unplausibel und fällt in die Fehlerkategorie von Messwerten außerhalb des Toleranzbandes. Die eingezeichneten gestrichelten Linien stellen das gewählte Toleranzband für die Außentemperatur dar. In der Detailansicht ist zu erkennen, dass das Sensorsignal nicht dauerhaft aus regelmäßig gemessenen Werten besteht. Erwartet wird jedoch eine regelmäßige Messwernerfassung, der Zeitraum in der Detailansicht beinhaltet also Fehler der Kategorie fehlender Messwerte. Des Weiteren werden lange gleichbleibende Messwerte als fehlerhafte Zeiträume erkannt, beispielsweise muss der Leistungssensor der Wärmepumpe im Winter pro Tag zumindest einen Messwert über null liefern. Die Erkennung gleichbleibender Messwerte wird nicht für alle Sensoren ganzjährig durchlaufen, vor allem bei Heizungskomponenten erfolgt die Prüfung nur in der Heizperiode vom 1. Oktober bis 30. April.

Die vorgestellte Methodik zum Erfassen fehlerhafter Zeiträume liefert ein brauchbares Ergebnis, jedoch mit beschränkter Aussagekraft. Die stärkste Vereinfachung liegt in der Darstellung des Fehlers pro Woche, da hierbei die Information über die Verteilung der Fehler innerhalb der Woche verloren geht. Trotzdem wurde sich bewusst für diese Auflösung entschieden, da Messdaten von bis zu fünf Jahren vorliegen, die in einer Grafik abgebildet werden. Fehlende und außerhalb des Toleranzbandes liegende Messwerte werden exakt erfasst, sodass diese auch zeitlich detaillierter dargestellt werden können. Die Erkennung gleichbleibender Werte erfolgt mittels einer Rasterung des Sensorsignals, d. h. es wird abschnittsweise auf gleichbleiben-

de Werte geprüft. Die größte verwendete Schrittweite beträgt dreieinhalb Tage, die maximal mögliche Auflösung der Fehlermatrix ist dadurch vorgegeben. Eine genaue Erfassung der gleichbleibenden Messwerte erfordert eine Vorwärts- bzw. rollierende Auswertung, bei der das Auswertungsintervall nur um einzelne Messwerte verschoben wird und dadurch wesentlich häufiger berechnet werden muss. Eine solche Methodik wurde ebenfalls ausprobiert, jedoch aufgrund des zu hohen Berechnungsaufwandes verworfen.

Der Aufbau der Anlagentechnik in einigen Gebäuden der EnVisaGe-Datenbank entspricht der Modellierung in Modelica. Dieser wird charakterisiert durch die Wärmepumpe – eng. Heat Pump (HP), den Trinkwarmwasserspeicher – eng. Domestic Hot Water Storage (DHWS), den Heizungspufferspeicher – eng. Space Heating Water Storage (SHWS) sowie die Fußbodenheizung – eng. Floor Heat Exchanger (FHE). Ein Horizontaler Erdwärmekollektor – eng. Horizontal Ground Heat Exchanger (HGHE) versorgt die Gebäude mit Wärme. Abb. 5.15 zeigt den Schaltplan des intensiv gemonitorten Gebäudes 002 inklusive der verbauten thermischen Sensorik. Hierbei werden neben den wichtigen Energieflüssen auch Temperaturen im Heizungspuffer- und Trinkwarmwasserspeicher gemessen, sodass das gesamte Anlagenverhalten im Detail nachvollziehbar ist.

In Tab. 5.11 sind alle für die Validierung relevanten Sensoren aufgelistet. Das „x“ in der Sensor-ID ist durch die Kennziffer des jeweiligen Gebäudes zu ersetzen. Bei Gebäude 002 wird „x“ also durch zwei ersetzt. Die Tabelle enthält auch die Information über den unterschiedlichen Aufbau des intensiven und extensiven Monitorings. Mit der intensiven Sensorik ist eine sehr genaue Nachbildung der Anlagentechnik möglich, jedoch erscheint auch die reduzierte extensive Sensorik ausreichend für die Validierung. Die Tab. enthält neben einer kurzen Beschreibung und dem Mess-

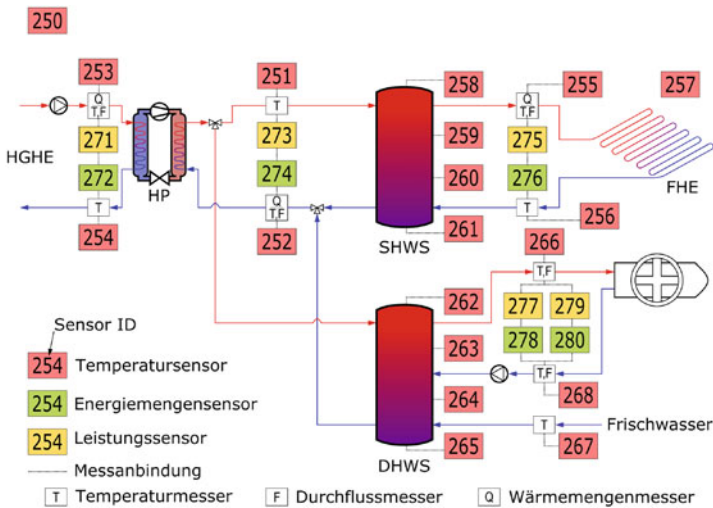


Abb. 5.15 Aufbau der Anlagentechnik und thermischen Sensorik im Gebäude 002 der Datenbank des EnVisaGe-Projekts

Tab. 5.11 Übersicht der verbauten Sensorik innerhalb der intensiv und extensiv gemessenen Gebäude

Sensor-ID	phys. Größe	Messstelle	Einheit	Messintervall [s]	Toleranzband min	Toleranzband max
Intensive und extensive Sensorik						
x01	P_{el}	HP	kW	5	0	5
x21	E_{el}	HP	kWh	900	0	$75 \cdot 10^3$
x50	ϑ	Außenluft	°C	60	-25	45
x53	ϑ	HGHE → HP	°C	60	-10	25
x54	ϑ	HP → HGHE	°C	60	-13	25
x55	ϑ	SHWS → FHE	°C	60	20	45
x56	ϑ	FHE → SHWS	°C	60	15	40
x71	\dot{Q}	HGHE → HP	kW	60	0	14
x72	Q	HGHE → HP	kWh	60	0	$100 \cdot 10^3$
x75	\dot{Q}	FHE	kW	60	0	10
x76	Q	FHE	kWh	60	0	$100 \cdot 10^3$
Intensive Sensorik						
x51	ϑ	HP → DHWS	°C	60	20	65
x52	ϑ	DHWS → WP	°C	60	15	60
x57	ϑ	Innenraum	°C	60	15	25
x58	ϑ	SHWS Schicht 1	°C	60	20	60
x59	ϑ	SHWS Schicht 2	°C	60	20	60
x60	ϑ	SHWS Schicht 3	°C	60	20	60
x61	ϑ	SHWS Schicht 4	°C	60	20	60
x62	ϑ	DHWS Schicht 1	°C	60	40	70

(Fortsetzung)

Tab. 5.11 (Fortsetzung)

Sensor-ID	phys. Größe	Messstelle	Einheit	Messintervall [s]	Toleranzband	
					min	max
x63	ϑ	DHWS Schicht 2	°C	60	35	60
x64	ϑ	DHWS Schicht 3	°C	60	25	55
x65	ϑ	DHWS Schicht 4	°C	60	5	40
x66	ϑ	DHWS Entnahme	°C	60	5	55
x67	ϑ	DHWS Zufluss	°C	60	0	30
x68	ϑ	DHWS Zirkulation	°C	60	10	50
x73	\dot{Q}	HP → SHWS	kW	60	0	15
x74	\dot{Q}	HP → SHWS	kWh	60	0	$100 \cdot 10^3$
x77	\dot{Q}	DHWS Entnahme	kW	60	0	20
x78	\dot{Q}	DHWS Entnahme	kWh	60	0	$100 \cdot 10^3$
x79	\dot{Q}	DHWS Zirkulation	kW	60	0	5
x80	\dot{Q}	DHWS Zirkulation	kWh	60	0	$100 \cdot 10^3$
Extensive Sensorik						
x33	\dot{Q}	HP → DHWS	kWh	60	0	$100 \cdot 10^3$
x85	ϑ	HP → DHWS	°C	60	5	70
x86	ϑ	DHWS → HP	°C	60	0	65
x90	\dot{Q}	HP → DHWS	kW	60	0	15

intervall des jeweiligen Sensors auch die Werte des, in der vorgestellten Methodik verwendeten, Toleranzbandes.

Auch Energiemengensensoren wurden mit einem Toleranzband versehen, da die stichprobenartige visuelle Analyse der Messwerte außerhalb des Toleranzbandes keine sinnvollen Messwerte enthält. Die Anwendung eines Toleranzbandes auf integrale Größen wie beispielsweise Energiemengen muss durch eine Prüfung auf logische Messwertverläufe außerhalb des Toleranzbandes ergänzt werden. Grundsätzlich ist die Fehlererkennung bei integralen Größen schwierig, da jederzeit und auf beliebigem Ausgangsniveau brauchbare Messwertverläufe geliefert werden können.

Das Lesen der Fehlermatrix erfolgt intuitiv und gibt schnell Aufschluss über brauchbare Auswerteziträume. Gewünscht ist ein von oben nach unten durchgängig dunkelgrüner Bereich über einen Zeitraum von einem Jahr, d.h. ein Zeitraum ohne offensichtlich falsche Sensormesswerte. Generell erscheinen Zeiträume mit einem skalierten Fehler von unter 20.000 auswertbar, das entspricht maximal ca. 16% unplausibler Messwerte. Grundsätzlich empfiehlt es sich, den mit der vorgestellten Methodik gefundenen Auswertezitraum anschließend im Detail zu prüfen. Hierbei können auch Abhängigkeiten der Sensoren untereinander geprüft werden, beispielsweise die Energiebilanz an der Wärmepumpe. Die Methodik liefert nur eine Vorauswahl an möglichen Auswerteziträumen und empfiehlt sich insbesondere bei großen Datenmengen, wie im vorliegenden Fall. Die fettgedruckten Sensor-IDs kennzeichnen wichtige Sensoren, welche für die Validierung des Simulationsmodells unbedingt notwendig sind. Dies betrifft hauptsächlich die Sensoren an der Wärmepumpe sowie an der Fußbodenheizung, da somit zumindest ein Minimalmodell ohne Trinkwarmwasser validierbar ist. Die weiteren dargestellten Sensoren sind optional, d.h. diese werden bei Bedarf im Validierungsmodell berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Fehlermatrix von Haus 002 (siehe Abb. 5.16) kann kein Zeitraum eines Jahres mit einer akzeptablen Anzahl von Messfehlern gefunden werden. Ein Zeitraum im Spätsommer 2019 weist die wenigsten fehlerhaften Messwerte auf, jedoch sind auch in diesem wichtige Sensoren mit fehlerhaften Messwerten vorhanden. Grundsätzlich erscheint es möglich, hieraus einen kürzeren, brauchbaren Zeitraum zu identifizieren. Sensor 274 ist ein Energiemengensensor und weist im genannten Zeitraum keinen sinnvollen Messwertverlauf auf. Dieser Sensor kann durch Integration des zugehörigen Leistungssensors 273 näherungsweise ersetzt werden. Eine Validierung des Minimalmodells mit dem Zeitraum des Spätsommers 2019 macht jedoch wenig Sinn, da die Heizung im Sommer ausgeschaltet ist und somit im System kaum relevanter Energieumsatz stattfindet. Bei der Validierung über einen Zeitraum von einem Jahr würde hierbei kein Problem bestehen, da dieser auch Zeiträume in der Heizperiode enthält. Bei der Validierung über kürzere Zeiträume sollten diese innerhalb der Heizperiode liegen, da nur so eine Rückkopplung zum echten Systemverhalten möglich ist.

Auch die anderen intensiv gemonitorten Gebäude wurden mit der vorgestellten Methodik untersucht und lieferten ebenfalls keinen brauchbaren Auswertezitraum. Ein Grund für die Häufigkeit von fehlerhaften Messwerten bzw. Sensoren ist die Tatsache, dass sich die intensiv gemonitorten Gebäude teilweise deutlich voneinander unterscheiden und hierfür jeweils ein maßgeschneidertes Monitoring-Schema von

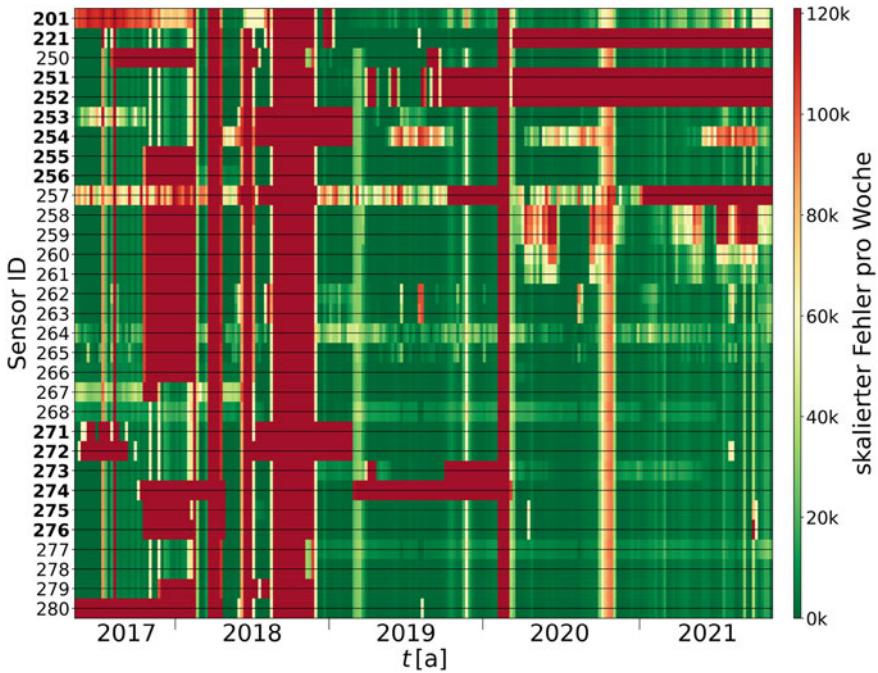


Abb. 5.16 Visualisierung der wöchentlichen Summen der Messfehler, die auf die Messfrequenz der Sensoren skaliert wurden; Gebäude 002 der EnVisaGe-Datenbank

unterschiedlichen Heizungsbauern und Elektrikern umgesetzt werden musste, was die Fehleranfälligkeit des Gesamtsystems erhöhte. Anschließend erfolgte die Auswertung von extensiv gemonitorierten Gebäuden. Hierbei ergaben sich bei allen Gebäuden weniger fehlerhafte Zeiträume. Abb. 5.17 zeigt die Fehlermatrix des Gebäudes 025, welches später für die Validierung des Simulationsmodelles der Anlagentechnik genutzt wurde. Es ergaben sich mehrere durchgängig dunkelgrüne Bereiche, d. h. mehrere Zeiträume, in denen die Sensorik sinnvolle Messwerte lieferte. Eine Validierung über einen Zeitraum von einem Jahr ist jedoch auch hier nicht möglich, sodass zwei jeweils einwöchige Validierungszeiträume ausgewählt wurden. Der erste Zeitraum liegt Mitte Dezember 2020, der zweite Zeitraum wurde Mitte März 2021 gewählt.

5.1.5.2 Validierungsmodell und Ergebnisse

Die in Gebäude 025 verbaute Anlagentechnik wird mithilfe der bereits eingeführten Systemkomponenten HCS und NeI nachgebildet. Diese Komponenten sollen anhand der ermittelten Messzeiträume validiert werden. Hierzu werden die Heizleistungskurve (Sensor 2575), der Volumenstrom in der Flächenheizung FHE sowie die netzseitige Vorlauftemperatur (Sensor 2553) vorgegeben (siehe Abb. 5.18). Der

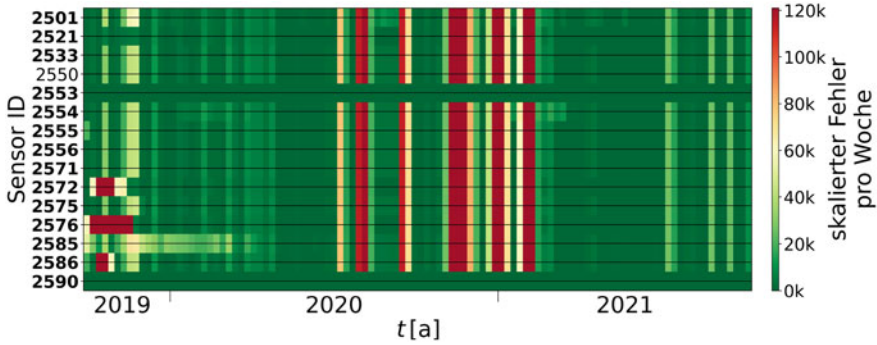


Abb. 5.17 Visualisierung der wöchentlichen Summen der Messfehler, die auf die Messfrequenz der Sensoren skaliert wurden; Gebäude 025 der EnVisaGe-Datenbank

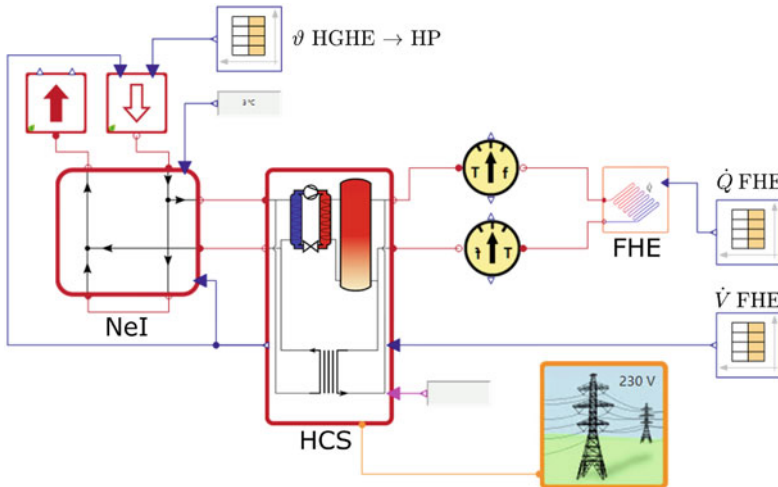


Abb. 5.18 Validierungsmodell der Anlagentechnik innerhalb der Simulationsumgebung *SimulationX* auf Grundlage der eingeführten Systemmodelle basierend auf der *GreenCity* Bibliothek

hausseitige Verbrauch an Heizenergie wird anhand der Messdaten möglichst genau im Simulationsmodell implementiert. Die Vergleichsparameter sind die netzseitige Energiemenge $Q_{HGHE \rightarrow HP}$ und der elektrische Verbrauch der Wärmepumpe $E_{el, HP}$.

Die Auswahl der Validierungszeiträume erfolgte mithilfe der bereits vorgestellten Fehlermatrix von Gebäude 025 (siehe Abb. 5.17). Nach einer detaillierteren grafischen Prüfung der wichtigsten Sensormesssignale wurden für die Validierung die folgenden Zeiträume ausgewählt:

- Mitte Dezember 19.12.2020 0:25 Uhr–26.12.2020 0:25 Uhr und
- Mitte März 10.03.2021 0:05 Uhr–17.03.2021 0:05 Uhr.

Die gewählten Zeiträume ermöglichen eine Anlagenvalidierung unter verschiedenen Randbedingungen. In der Dezemberwoche war die Außentemperatur etwas milder als in der Woche im März, sodass sich die benötigte Heizenergie unterscheidet. Außerdem ist die vom HGHE gelieferte Soletemperatur im Dezember deutlich höher als im März, da die oberflächennahsten Untergrundschichten jahreszeitlichen Temperaturschwankungen unterliegen (Brennenstuhl et al. 2019).

Die Parametrisierung des Simulationsmodelles erfolgt mithilfe des Datenblattes der Wärmepumpe sowie weiteren Informationen, welche von der HFT Stuttgart zur Verfügung gestellt wurden. Bei der verbauten Wärmepumpe handelt es sich um die *Tecalor TTF – 10*, welche mit einem Heizungspufferspeicher kombiniert wurde. Bezüglich der Regelungseinstellungen der gesamten Anlage liegen keine Informationen vor, sodass diese Werte in einem für diese Anlagenkonfiguration üblichen Bereich gewählt werden. Mithilfe der Auswertung von zwei Zeiträumen in unterschiedlichen Jahreszeiten soll überprüft werden, wie gut die unterschiedlichen Betriebspunkte der Wärmepumpe simuliert werden. Tab. 5.12 zeigt eine Auswahl der wichtigsten Stoff- und Systemparameter, welche für die Validierung verwendet wurden.

Das Hauptaugenmerk der Validierung liegt auf den Energiemengen, da diese Aufschluss über die grundlegend richtige Modellierung der Anlage geben. In den Messdaten der netzseitigen Energiemenge $Q_{\text{HGHE}} \rightarrow \text{HP}$ und im elektrischen Verbrauch

Tab. 5.12 Auswahl der wichtigsten im Validierungsmodell hinterlegten Stoff- und Systemparameter

Parameter	Wert	Einheit
Untergrund		
Dichte Sole	1044	kg m^{-3}
Isobare Wärmekapazität Sole	3850	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Untergrundtemperatur in 2m Tiefe im Dezember	6	$^{\circ}\text{C}$
Untergrundtemperatur in 2m Tiefe im März	3	$^{\circ}\text{C}$
Länge des Anschlussrohres vor dem Haus	2	m
Wärmepumpe und Heizungspufferspeicher		
Netzseitiger Volumenstrom	2620	l h^{-1}
Volumen SHWS	200	l
Referenztemperatur SHWS	33	$^{\circ}\text{C}$
Referenztemperatur HP \rightarrow SHWS	35	$^{\circ}\text{C}$
Gebäude		
Dichte Wasser	1000	kg m^{-3}
Isobare Wärmekapazität Wasser	4177	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Temperatur im Heizungsraum	12	$^{\circ}\text{C}$

der Wärmepumpe E_{el} HP sind die Energiemengen der Trinkwarmwasserversorgung mit enthalten. Im Validierungsmodell wird jedoch nur der Heizkreis betrachtet, sodass aus den Messdaten die Zeiten der Trinkwarmwasserversorgung herausgerechnet werden müssen. Das Betriebsverhalten der Wärmepumpe weist kein kontinuierliches Umschalten zwischen der Versorgung des SHWS und des DHWS auf, d. h., die Wärmepumpe ist beim Wechsel beider Betriebsmodi jeweils kurzzeitig ausgeschaltet. Dieser Umstand erlaubt es, den Leistungssensor 2590 \dot{Q} HP \rightarrow DHWS zum Detektieren der Versorgungszeiten des Trinkwarmwasserspeichers zu nutzen. Weist dieser Sensor also Werte größer als null auf, so werden die netzseitig der Wärmepumpe abgerufenen Leistungen und Energiemengen null gesetzt.

Abb. 5.19 zeigt den Vergleich der elektrischen Energiemenge der Wärmepumpe E_{el} HP und der netzseitigen Energiemenge Q HGHE \rightarrow HP im Dezemberzeitraum. Die Ergebnisse der Simulation stimmen grundsätzlich gut mit den gemessenen Werten überein. Die simulierte netzseitige Energiemenge ist größer als die gemessene. Bei der elektrischen Energiemenge dreht sich die Relation hingegen um. Je mehr thermische und weniger elektrische Energie zum Heizen genutzt wird, desto effektiver läuft die Anlage. Der aus den Messdaten ermittelte COP liegt im betrachteten Dezemberzeitraum bei ca. 4,5, aus den Simulationsdaten ergibt sich ein Wert von etwa 5,0.

Auch für den Validierungszeitraum im März zeigt sich ein ähnliches Verhalten, siehe Abb. 5.20. Die vom HGHE bereitgestellte Temperatur ist im März geringer als im Dezember, sodass sich der Arbeitspunkt der Wärmepumpe in einen ungünstigeren Bereich verschiebt. Dies zeigt sich am COP, welcher anhand der Messwerte ca. 4,0 und simuliert etwa 4,6 beträgt. Die relative Abweichung der simulierten netzseitigen Energiemenge Q HGHE \rightarrow HP pegelt sich bei beiden betrachteten Zeiträumen auf ca. 6,2% ein. Bei der elektrischen Energiemenge der Wärmepumpe E_{el} HP ergibt

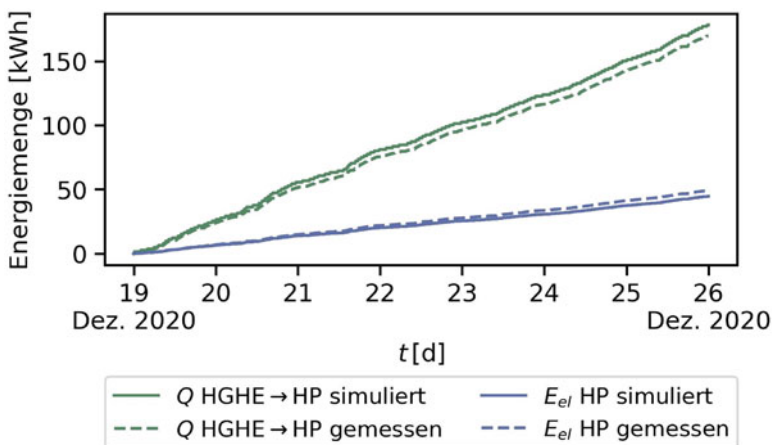


Abb. 5.19 Vergleich von simulierten und gemessenen Energiemengen an der Wärmepumpe über den Zeitraum einer Woche Mitte Dezember 2020

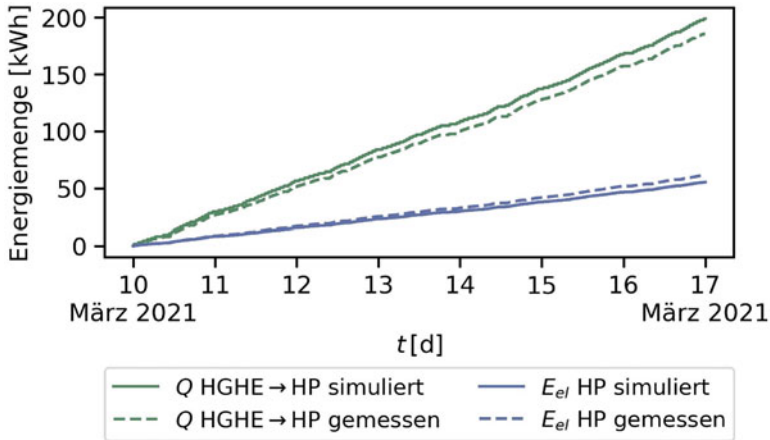


Abb. 5.20 Vergleich von simulierten und gemessenen Energiemengen an der Wärmepumpe über den Zeitraum einer Woche Mitte März 2021

sich eine relative Abweichung von ungefähr 9,3%. Die Anstiege der netzseitigen Energiemengenkurven sind in jedem Bereich ähnlich. Aus diesem Zusammenhang kann geschlussfolgert werden, dass die Simulation zu ähnlichen Zeitpunkten wie die reale Anlage Leistung aus dem Netz entnimmt. Aus energetischer Sicht bildet die Simulation die real gemessenen Werte gut ab, wobei sich Unterschiede hinsichtlich der Anlageneffizienz ergeben. Eine Ursache dafür liegt in den, im Simulationsmodell hinterlegten COP-Kurven aus dem Datenblatt der Wärmepumpe, welche unter Laborbedingungen aufgezeichnet und im realen Betrieb vermutlich nicht immer erreicht werden.

Abb. 5.21 zeigt einen zwölfstündigen Ausschnitt der netzseitigen Temperaturen und Leistungen, um eine detaillierte Betrachtung der Validierungsergebnisse vorzunehmen. Die Wärmepumpe ist im Simulationsmodell seltener angeschaltet als in der Realität, läuft dafür jedoch länger und mit einer höheren Entzugsleistung \dot{Q} HGHE \rightarrow HP, sodass insgesamt, wie bereits gezeigt, eine ähnliche Energiemenge gezogen wird. Die im Simulationsmodell vorliegende Entzugsleistung entspricht den Datenblatt-Angaben, d. h., die reale Anlage erreicht nicht die angegebenen Werte. Die installierte Wärmepumpe moduliert nicht, d. h., es wird eine dem Arbeitspunkt entsprechende unveränderliche Leistung gefördert. Eine beispielsweise nur 50-prozentige Leistungsentnahme ist nicht möglich, sodass die Leistungsunterschiede nicht auf einen modulierenden Betrieb zurückzuführen sind.

Die unterschiedliche Charakteristik der Wärmeentnahme aus dem Netz spiegelt sich auch im Verlauf der Rücklauftemperaturen ϑ HP \rightarrow HGHE wider. Da der Leistungsbezug von Wärme aus dem Netz zu einem starken Absinken der Rücklauftemperatur führt, weist die gemessene Kennlinie deutlich mehr Ausschläge auf. Die simulierte Kennlinie bleibt phasenweise fast konstant bei 6 °C, der im Dezember angenommenen Untergrundtemperatur in 2 m Tiefe, da sich die Temperatur der stehenden Flüssigkeitssäule der des umgebenden Erdreichs anpasst. Aufgrund der

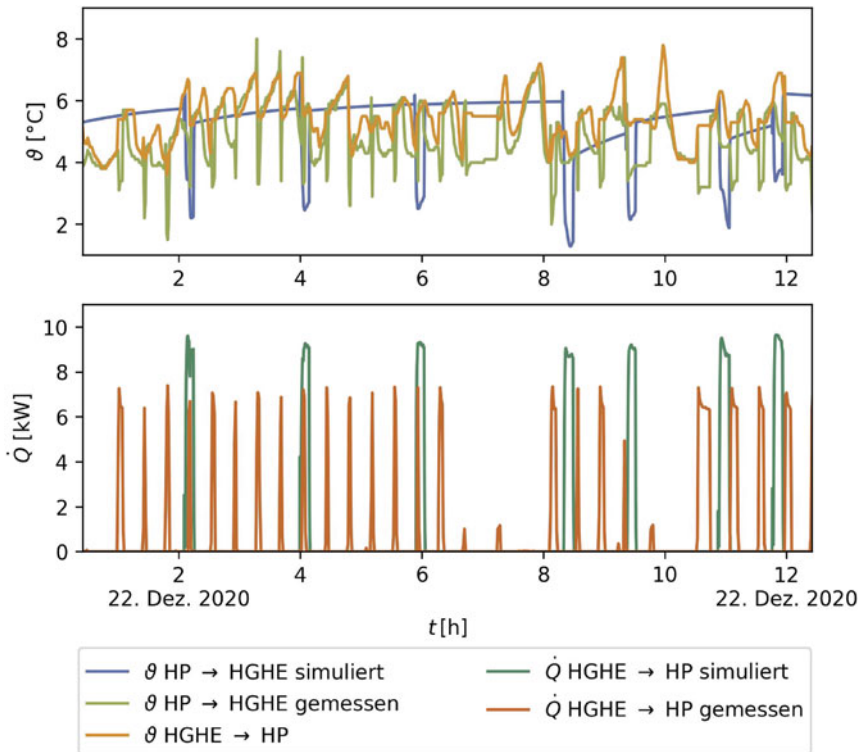


Abb. 5.21 Vergleich der netzseitigen Rücklauftemperaturen und Entzugsleistungen im Zeitraum 22.12.2020 0:25 Uhr bis 22.12.2020 12:25 Uhr

höheren simulierten Entzugsleistung fällt auch die simulierte Rücklauftemperatur stärker ab, da diese beiden Größen direkt miteinander in Zusammenhang stehen. Insgesamt befindet sich die Rücklauftemperatur ϑ HP \rightarrow HGHE in plausiblen Temperaturbereichen. Allerdings ist das Wärmepumpenmodell nicht in der Lage, den Einschaltzeitpunkt sowie die Entzugsleistung \dot{Q} HGHE \rightarrow HP entsprechend der Messwerte zu berechnen.

5.1.6 Anwendung des Quartiersmodells

Die bisher im Abschn. 5.1 eingeführten Ansätze werden anschließend auf ein fiktives Quartier angewendet. Das Quartier umfasst zehn Gebäude mit unterschiedlichen Geometrien, die an ein Nahwärmenetz angeschlossen sind. Abb. 5.22 veranschaulicht das entsprechende Quartier und die geometrischen Vereinfachungen, auf denen die Simulation basiert. Die hinteren vier Gebäude sind bis auf die Nutzung der Gebäude gleich parametrisiert, um die Unterschiede zwischen Wohn-, Bildungs-,

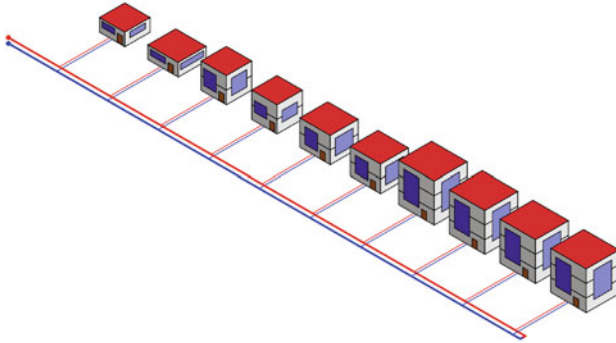


Abb. 5.22 Schematische Darstellung des berechneten Quartiers, die geometrische Vereinfachungen visualisiert

Einzelhandels- und Bürogebäuden vergleichen zu können. Mithilfe der reduzierten Gebäudeparametrisierung werden die einzelnen Gebäude definiert (siehe Tab. 5.13).

Anschließend erstellt ein Python-Skript das entsprechende Modelica-Modell automatisiert. Innerhalb der Simulationsumgebung *SimulationX* werden die System- und Komponentenmodelle wie in Abb. 5.23 dargestellt, strukturiert und verknüpft. Die bereits eingeführten Systemmodelle SHBIC, HCS und NeI werden pro Gebäude hinzugefügt. Neben den Systemmodellen werden Randbedingungen wie Umwelteinflüsse, die elektrische Netzanbindung und die Versorgung des Nahwärmenetzes definiert. Da die Versorgung des Quartiers im Rahmen des Projektes EASyQuart durch oberflächennahe Geothermie in Form von BHE erfolgt, wird die Versorgung des Nahwärmenetzes in erster Näherung durch konstante 9 °C angenommen. Präzi-

Tab. 5.13 Reduzierte Gebäudeparametrisierung des Quartiersmodells

Number	ALH	buildingAg	roofType	cRH	nFloors	AWindows	Usage
[-]	[m ²]	[a]	[-]	[m]	[-]	[m ²]	[-]
1	110	2016	Unheated	2,6	1	43	Wohnen
2	150	2016	Unheated	2,6	1	50	Wohnen
3	200	2016	Unheated	2,6	2	80	Wohnen
4	210	2016	Unheated	2,6	2	46,3	Wohnen
5	250	2016	Unheated	2,6	2	95	Wohnen
6	300	2016	Unheated	2,6	2	102	Wohnen
7	400	2016	Unheated	2,6	3	240	Wohnen
8	400	2016	Unheated	2,6	3	240	Bildung
9	400	2016	Unheated	2,6	3	240	Büro
10	400	2016	Unheated	2,6	3	240	Einzelh.

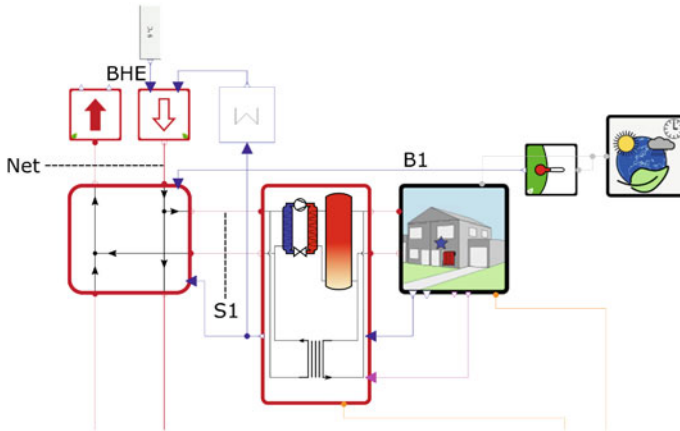


Abb. 5.23 Ausschnitt des Quartiersmodells innerhalb der Simulationsumgebung *SimulationX* auf Grundlage der eingeführten Systemmodelle basierend auf der *GreenCity* Bibliothek

sere geothermische Randbedingungen bis hin zur Co-Simulation von Untergrund- und Quartiersmodellen werden im Abschn. 5.2 thematisiert.

Die im Anschluss vorgestellten Ergebnisse beziehen sich entweder auf das gesamte Quartier, also z. B. die gesamte thermische Leistung, die vom Nahwärmenetz \dot{Q}_{Net} benötigt wird oder auf einzelne Gebäude und deren Anlagentechnik \dot{Q}_{S1} . In beiden Fällen wird die thermische Leistung aus dem Temperaturunterschied von Vor- und Rücklauf (z. B. ϑ_{NetIn} und ϑ_{NetOut}) berechnet. In Abb. 5.24 sind die Ergebnisse der Quartiersmodellierung für Daten am Standort Leipzig dargestellt. Neben den Soletemperaturen ϑ_{NetIn} und ϑ_{NetOut} , dem Volumenstrom \dot{V}_{Net} und dem daraus resultierenden Wärmestrom \dot{Q}_{Net} sind auch die Innenraumtemperaturen ϑ_B der Gebäude als Bereich zwischen den maximalen und minimalen Temperaturen dargestellt. Weitestgehend kann der angestrebte Temperaturbereich von 20 °C bis 26 °C eingehalten werden. Lediglich über die Sommermonate von Mai bis September kommt es zum kurzzeitigen Überschreiten des Temperaturbereichs. Die Ausgangstemperatur des Nahwärmenetzes zeigt relativ hohe Schwankungen (3,5 °C bis 23,8 °C), da die Gebäude im Sommer gekühlt werden, um den Anstieg der Innenraumtemperatur zu begrenzen. Die minimale Austrittstemperatur von 3,5 °C stellt kein Problem für den Betrieb eines BHE-Felds dar. Erst bei negativen Soletemperaturen, die über einen längeren Zeitraum in die BHE geleitet werden, kommt es zur Abschaltung der geothermischen Anlage. Die maximal benötigte thermische Leistung des Quartiers liegt bei ca. 90 kW, wohingegen die minimale bei ca. –160 kW liegt. Die verhältnismäßig hohe Kühlleistung besteht aus kurzen Leistungsspitzen, die durch einen Kältespeicher oder einen kleiner dimensionierten und deshalb früher leistungslimitierenden Plattenwärmeübertrager reduziert werden können. Letzteres würde in höheren Innenraumtemperaturen resultieren.

Neben den Ergebnissen auf Quartiersebene wurde der Einfluss des Nutzungsverhaltens auf den Energiebedarf untersucht. Die einzelnen Gebäude 7 bis 10 unter-

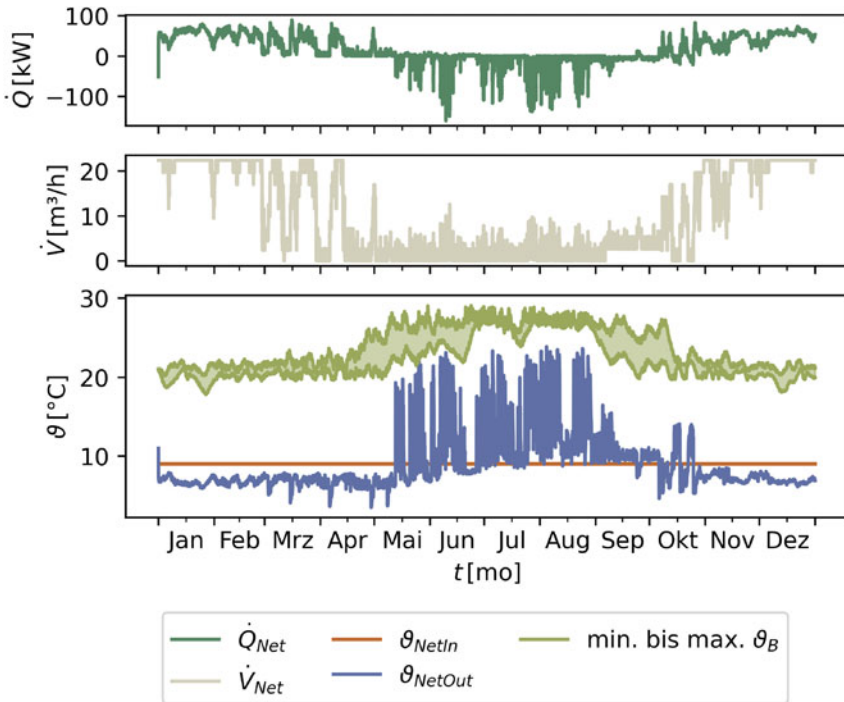


Abb. 5.24 Quartiersergebnisse des Modelica-Modells unter Umwelteinflüssen des TRY 2015 in Leipzig

scheiden sich bis auf das Nutzungsverhalten nicht, um die Überlagerung von Einflussfaktoren auszuschließen. Die Annahmen aus Abschn. 5.1.2 resultieren in den jährlich benötigten Energiemengen, die in Abb. 5.25 dargestellt sind. Ein geringerer Wärmebedarf geht mit einem steigenden Kältebedarf einher. Die maximale relative Abweichung des Wärmebedarfs in Abhängigkeit des Nutzungsverhaltens beträgt, bezogen auf den maximalen Wärmebedarf, ca. 36 %. Das Gebäude 8 hätte folglich einen 36 % geringeren Wärmebedarf, wenn es nicht als Büro-, sondern als Einzelhandelsgebäude genutzt wird. Die relativen Abweichungen des Kältebedarfs sind mit bis zu ca. 72 % noch größer. Das Nutzungsverhalten eines Gebäudes spielt eine entscheidende Rolle für dessen thermischen Energiebedarf. Für monofunktionale Quartiere wie z. B. Einkaufszentren oder Bürokomplexe lässt sich das Nutzungsverhalten nicht ohne weitere Maßnahmen ändern, da die hier aufgezeigten Unterschiede mit der Anzahl der Gebäude skalieren.

Abschließend wurden die Umweltbedingungen, die das Quartier beeinflussen, variiert. Es wird zwischen zwei Szenarien unterschieden: der Standortvariation und einer Prognose für das Jahr 2045 in Leipzig. Die Standortvariation unterscheidet zwischen den Umweltbedingungen in Berlin, Düsseldorf, Erfurt, Hamburg, Leipzig und München, um nationale Unterschiede anhand von benötigten Energiemengen

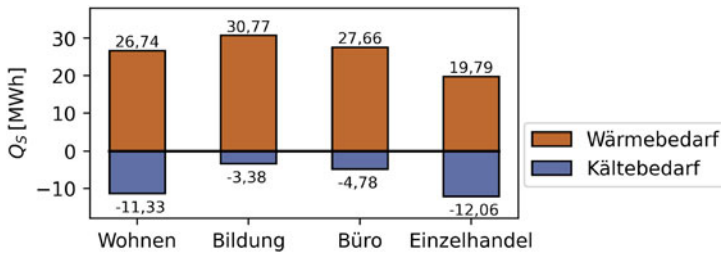


Abb. 5.25 Wärme- und Kältebedarf als Energiemengen unterschiedlicher Nutzungsarten basierend auf dem gleichen Gebäude (Quartiersgebäude 7–10)

aufzuzeigen. Die Prognose zeigt auf der Grundlage des TRY des DWD die voraussichtlichen Einflüsse des Klimawandels auf die thermische Energieversorgung von Quartieren.

Das Ergebnis der Standortvariation ist in Abb. 5.26 visualisiert. Das gleiche Quartier benötigt allein durch die unterschiedlichen Umweltbedingungen 25 % weniger Wärme, wenn es in Düsseldorf statt in Leipzig gebaut wird. Die Planung von allgemeinen Musterquartieren ist folglich kritisch zu beurteilen, da die Randbedingungen und deren Einflüsse keine Verallgemeinerung zulassen. Im Zusammenhang mit der Oberflächennahen Geothermie sind zusätzlich hydro- und geologische Unterschiede zu berücksichtigen, die standortspezifische Konzepte notwendig machen.

Die Prognose für das Quartier in Leipzig ist in Abb. 5.27 in Form von monatlich benötigten thermischen Energiemengen zum Heizen und Kühlen dargestellt. Vor allem die zweite Jahreshälfte weist große Unterschiede zwischen den benötigten Energiemengen auf. Der Trend zum geringeren Heizbedarf und höherem Kühlbedarf ist eindeutig. In den bisher vorgestellten jährlichen Energiemengen summiert sich der Heizbedarf zu ca. 195 MWh (2015) sowie 154 MWh (2045) und der Kühlbedarf zu ca. -30 MWh (2015) sowie -59 MWh (2045). Daraus folgt, dass sich die zum

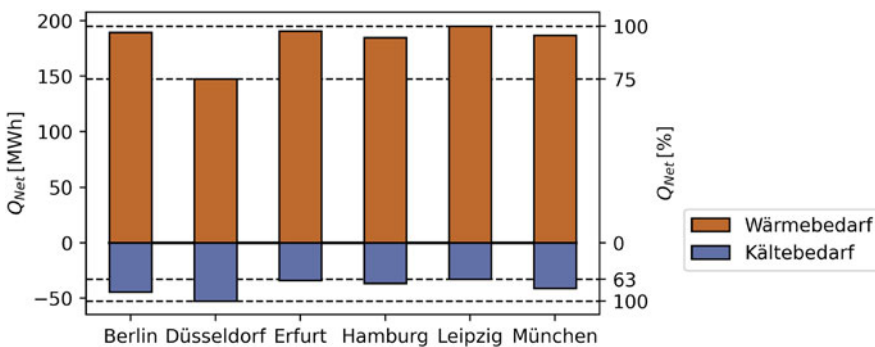


Abb. 5.26 Wärme- und Kältebedarf des gesamten Quartiers als Energiemengen an unterschiedlichen Standorten und dementsprechend unterschiedlichen TRY 2015

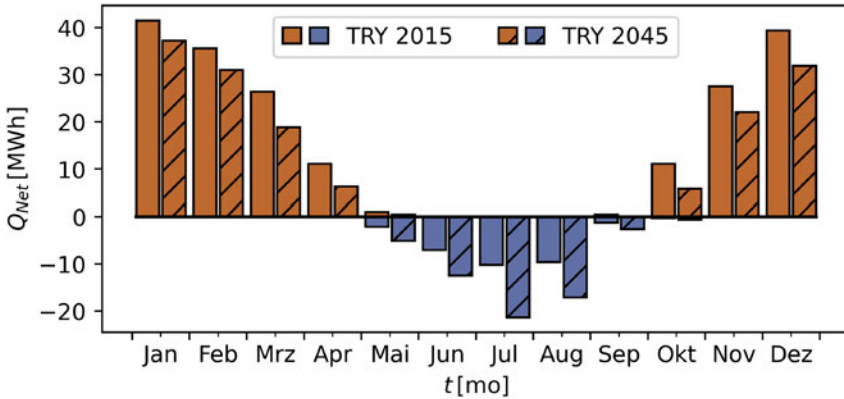


Abb. 5.27 Wärme- und Kältebedarf des gesamten Quartiers als Energiemengen unter Umwelteinflüssen des TRY 2015 und 2045 in Leipzig

Kühlen benötigte Energiemenge im Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2015 voraussichtlich verdoppelt. Für die thermische Energieversorgung durch oberflächennahe Geothermie bedeutet diese Entwicklung, dass die Untergrundtemperatur durch den Energieeintrag im Sommer erhöht wird und die Effizienz der Anlagentechnik steigt. Dieses Verhalten wird auch als Regeneration der Untergrundtemperatur bezeichnet. Je ausgeglichener Heiz- und Kühlbedarf sind, desto mehr kann die oberflächennahe Geothermie als saisonaler Speicher ausgelegt werden.

5.1.7 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Kapitel wurde ein Modellkonzept für Stadtquartiere vorgestellt, das auf der Modelica-Sprache basiert. Mit Komponenten der *GreenCity* Bibliothek werden sowohl die Gebäude als auch deren Anlagentechnik abgebildet. Im Kontext des Projekts EASyQuart werden die Anlagen der Gebäude durch ein Nahwärmenetz versorgt. Die Modellierung und Simulation erfolgt in der Simulationsumgebung SimulationX (Version 4.3).

Die Gebäude und ihre Wärmebedarfe können mit der Komponente *BuildingZone* sehr gut abgebildet werden. Für genaue Ergebnisse sind allerdings eine Vielzahl von Parametern zu definieren, die zu einem hohen Modellierungsaufwand führen. Auf der Quartiersebene wird dieser Detailgrad in der Regel nicht benötigt. Die *GreenCity* Bibliothek bietet eine vereinfachende alternative Komponente *SimpleHeatedBuildingIntCooling*, die sich an dem Vorschlag des IWU (Loga et al. 2005) orientiert. Durch die Sensitivitätsanalyse dieser vereinfachten Komponente hat sich herausgestellt, dass einige Parameter keinen oder einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den jährlichen Energiemengenbedarf der Komponente haben (siehe Abb. 5.6). Daraufhin wurde die Parametrisierung der Quartiersgebäude auf die einflussreichsten Parameter beschränkt (siehe Tab. 5.3). Diese

reduzierte Parametrisierung wird unabhängig von der zugrunde liegenden Modelica-Bibliothek mit unterschiedlichen Ansätzen auf ähnliche Weise verwendet (Lauster et al. 2016; Nytsch-Geusen et al. 2018). Die Validierung der reduzierten Gebäudeparametrisierung ergab am Beispiel des jährlichen Energiemengenbedarfs eines EFH eine Abweichung von 51 % im Vergleich zu dem Messergebnis. Die Ursache der relativ hohen Abweichung wurde anschließend untersucht, indem nacheinander die Geometrie- sowie Materialparameter präzisiert wurden. Der jährliche Energiemengenbedarf mit detaillierten Materialparametern weicht nur um ca. 1 % vom Messergebnis ab. Sofern Materialparameter vorliegen, sollten diese angegeben werden, um die Zuordnung der Komponente `SimpleHeatedBuildingIntCooling` durch das Baujahr zu überschreiben.

Die Ergebnisse der Anlagentechnik sind nicht nur für das Temperieren des Gebäudes wichtig, sondern auch für die resultierenden Soletemperaturen im Nahwärmenetz. Zentral ist dabei das Modell der Wärmepumpe, das maßgeblich durch die COP- und Leistungskurven in Abhängigkeit der einströmenden Soletemperatur und der einströmenden Heizwassertemperatur definiert wird. Um die Modelle der Anlagentechnik zu prüfen, wurde die Messdatenbank des Projekts EnVisaGe der HFT Stuttgart ausgewertet und mit Simulationsergebnissen verglichen. In diesem Projekt wird ein ländliches Quartier mit einem horizontalen Erdwärmekollektor und einem kalten Nahwärmenetz versorgt. Die erhaltenen Rohdaten wurden zunächst stichprobenhaft gesichtet und anschließend auf Messfehler untersucht, um einen möglichst fehlerfreien Zeitraum zur Validierung des Simulationsmodells nutzen zu können. Der Anfangszeitraum der Messdaten in den Jahren 2017 und 2018 enthält viele Messfehler, da die Messergebnisse in unplausiblen Bereichen liegen (siehe Abb. 5.14 und 5.16). In dieser Zeit der Inbetriebnahme kam es zu einer Vielzahl von Fehlern aufgrund der Komplexität des Monitorings. Diese ist auf die für die jeweiligen Gebäude notwendigen Individuallösungen, die auch noch von verschiedenen Unternehmen verbaut wurden, zurückzuführen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine automatisierte Überprüfung der Messergebnisse während der Inbetriebnahme und im anschließenden Messverlauf dringend anzuraten ist, um qualitativ hochwertige Daten zu generieren. In einigen Quartiersgebäuden wurde die Sensorik etwas später und in einem geringeren Umfang installiert. Die Messergebnisse dieser Gebäude enthalten im Vergleich zu den intensiv gemessenen wesentlich weniger Fehler, so dass zwei Zeiträume für die Validierung der Anlagentechnik ausgewählt werden konnten. Die Validierungsergebnisse der Anlagentechnik zeigen Abweichungen der Energiemenge, bezogen auf eine Woche, zwischen Messung und Simulation von bis zu 10 %. Die genauere Betrachtung eines kleineren Zeitraums von einem Tag zeigt, dass die simulierte Entzugsleistung der Wärmepumpe (nach Datenblatt modelliert) von der gemessenen abweicht und die Einschaltzeitpunkte der Messung nicht denen der Simulation entsprechen (siehe Abb. 5.21). Die berechneten Soletemperaturen, die zum horizontalen Erdwärmekollektor fließen, befinden sich in plausiblen Bereichen. Für die Quartiersberechnung bedeuten diese Ergebnisse, dass die Modellierung der Anlagentechnik verwendet werden kann, da die genaue Berechnung der Einschaltzeitpunkte für Jahreszeiträume nicht relevant ist. Trotzdem sollte weiterführend analysiert werden, warum die Betriebspunkte der simulierten Wärmepumpe

von der realen abweichen. Einen ersten Ansatz bietet die Vermutung, dass bereits die Datenblätter des Herstellers vom Realbetrieb im Gebäude abweichen. In analogen Betrachtungen von [Brennenstuhl et al. \(2019\)](#) konnte die Übereinstimmung zwischen Simulationsmodell und Messergebnissen durch eine Modellkalibrierung mittels heuristischer Optimierungsalgorithmen weiter verbessert werden.

Die Anwendung des Quartiersmodells ist durch die automatische Modellerstellung relativ einfach und liefert durch die abgebildete Anlagentechnik der Gebäude sehr genaue Lastprofile, die im Bereich von Sekunden aufgelöst sind. Die Ergebnisse sind nicht auf den Wärmestrom beschränkt, sondern können in der zugrunde liegenden Form von Soletemperaturen und Volumenstrom ausgegeben werden (siehe [Abb. 5.24](#)). Diese Ergebnisse sind im Zusammenhang mit geothermischen Anlagen, die das Nahwärmenetz versorgen, besonders wichtig und werden anschließend im [Abschn. 5.2](#) genutzt. Neben den übergeordneten Quartiersergebnissen können die Ergebnisse auch gebäudescharf untersucht werden. So können z. B. die Unterschiede der benötigten Wärme- und Kühlenergiemenge in Abhängigkeit des Nutzungsverhaltens visualisiert werden (siehe [Abb. 5.25](#)). Die Randbedingungen der Simulation können angepasst werden, um das Quartier in unterschiedlichen Städten (siehe [Abb. 5.26](#)) oder in zukünftigen Umgebungsbedingungen (siehe [Abb. 5.27](#)) zu simulieren. In Leipzig ergibt sich für das TRY 2045 eine Verdopplung der Kühlenergiemenge im Vergleich zum TRY 2015. Dadurch wird die oberflächennahe Geothermie weniger stark als reine Energiequelle genutzt und verändert sich zu einem saisonalen Energiespeicher, dessen Effizienz mit einem möglichst ausgeglichenen Wärme- und Kühlbedarf steigt.

Die Arbeit mit der Software SimulationX und der *GreenCity* Bibliothek ermöglicht die Betrachtung auf Quartiersebene. Der hier vorgestellte Ansatz ist im Vergleich zu anderen Simulationsmodellen auf dieser Betrachtungsebene relativ detailliert. Die Modellparametrisierung würde erheblich von einer Schnittstelle zum Building Information Modeling (BIM) profitieren, um die Parametrisierung zu präzisieren, ohne in wesentlich höherem Modellierungsaufwand zu resultieren. An dieser Stelle sei auf das Projekt Standardisierte Schnittstelle für Analysemodelle von Anlagen- und Gebäudekomponenten für BIM-basierte Planung und Betrieb (FMI4BIM) verwiesen, das sich mit der Thematik beschäftigt. Die Modellierung mit der *GreenCity* Bibliothek ist sehr benutzerfreundlich und die Bibliothek bietet eine große Bandbreite von Komponenten, die verschiedene Energiequellen abbilden. Allerdings handelt es sich um eine kommerzielle Bibliothek, die aufgrund von Zugriffsbeschränkungen nur bedingt erweiterbar ist.

5.2 Effizienzanalysen des energetischen Gesamtsystems

Das Gesamtsystem bestehend aus den Teilsystemen Untergrundmodell (OpenGeoSys (OGS)) und Quartiersmodell (Modelica) wird im Folgenden als Co-Simulation oder gekoppeltes Modell zusammengeführt. Ziel ist es, die unterschiedlichen Simulationen parallel auszuführen und an geeigneter Stelle Informationen zwischen den

Simulationen auszutauschen, um die jeweiligen Randbedingungen möglichst präzise berücksichtigen zu können. Der Unterschied zu *a priori* festgelegten Randbedingungen besteht aus möglichen Beeinflussungen der unterschiedlichen Simulationen zu deren Laufzeit. Die grundlegende Methodik dieser Schnittstelle wird in Abschn. 5.2.1 eingeführt und in Abschn. 5.2.2 angewendet.

5.2.1 Entwicklung der Schnittstelle zwischen Quartiers- und Untergrundmodell

Aus der Quartiersperspektive muss das Untergrundmodell die Eingangstemperatur für das Nahwärmenetz ϑ_{NetIn} berechnen und übergeben (in der bisherigen Anwendung als konstant angenommen), um den Stoff- und Wärmetransport zwischen den Teilsystemen zu berücksichtigen. Aus der Untergrundperspektive müssen die Eingangstemperatur für die BHE (ϑ_{BHEIn}) sowie der Volumenstrom \dot{V}_{BHE} , der durch die BHE strömt, vom Quartiersmodell definiert werden. Abb. 5.28 veranschaulicht die beiden Teilsysteme und die übergebenen physikalischen Größen. Der Pfeil auf Höhe der Systemgrenze symbolisiert, von welchem Teilsystem das Ergebnis kommt und in welchem Teilsystem das Ergebnis benötigt wird.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansätze, die notwendigen Informationen auszutauschen. Modelica unterstützt eine Standardschnittstelle für dynamische Simulationen, die Functional Mock-up Interface (FMI) genannt (Blochwitz et al. 2011) und vielfach angewendet wird, u. a. zusammen mit SimulationX (Schwan et al. 2017). OGS unterstützt diesen Standard allerdings nicht. Alternativ bietet die Modelica-Bibliothek *InterfacesGeneral* in SimulationX eine Komponente für Co-Simulationen, die den Informationsaustausch über das Transmission Control Protocol/ Internet Protocol (TCP/IP) ermöglicht. Diese Komponente beschränkt den In-

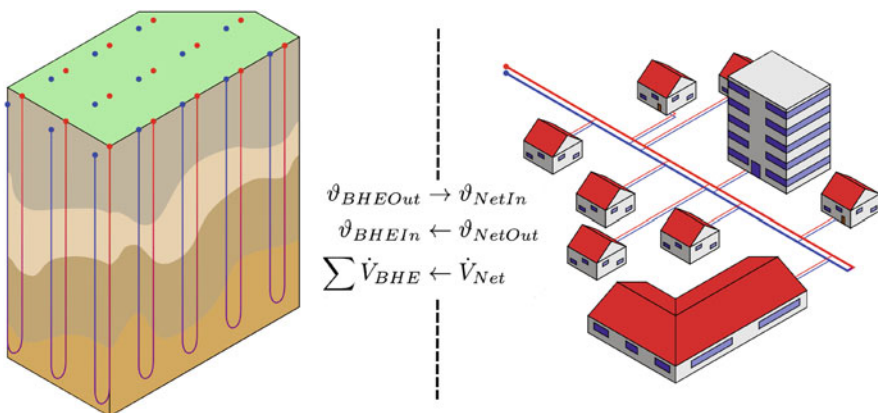


Abb. 5.28 Schematische Darstellung des Gesamtsystems mit Untergrundmodell (links) und Quartiersmodell (rechts)

formationsaustausch auf konstante Zeitschrittweiten t_c und verwendet kein iteratives Verfahren, das die gleichen Zeitschritte wiederholend berechnet, bis die Lösungen konvergieren. OGS-seitig wurde die benötigte Schnittstelle ergänzt, um lokal die Verbindung zu einem Kommunikationsserver aufzubauen, der den Informationstransfer zwischen den beiden Programmen während der Laufzeit durchführt. OGS, SimulationX sowie der Kommunikationsserver werden von einem Python-Skript gestartet. Der zeitliche Ablauf der Co-Simulation ist in Abb. 5.29 visualisiert. Modelica rechnet in unregelmäßigen und wesentlich kleineren Zeitschritten (im Bereich von Sekunden) als OGS (im Bereich von Stunden oder Tagen). Das Untergrundmodell wird nur zu den Kommunikationszeitpunkten berechnet, indem das Ergebnis von Modelica die ursprünglichen Werte im *pre-processing* überschreibt und die Ergebnisse von OGS im *post-processing* nach dem Berechnungsschritt an Modelica übergibt. Genau genommen rechnen die Programme nicht parallel, sondern nacheinander, da Modelica auf die Ergebnisse von OGS wartet.

Die relativ großen Zeitschritte von OGS stellen im thermisch trägen Untergrund normalerweise kein Problem dar. Die Ergebnisse von Modelica beinhalten allerdings so schnelle Änderungen, dass das Abtasten der Ergebnisse zu den Zeitschritten t_c in einem Informationsverlust resultiert. Von diesem Informationsverlust sind die Austrittstemperatur aus dem Nahwärmenetz ϑ_{NetOut} bzw. die Eintrittstemperatur ϑ_{BHEIn} und der Volumenstrom \dot{V}_{Net} bzw. \dot{V}_{BHE} betroffen. Um zu überprüfen, welche Auswirkungen dieser Informationsverlust in der Co-Simulation hat, wird eine Jahressimulation des EFH aus Abschn. 5.1.3 mit einem Untergrundmodell gekoppelt, das drei Doppel-U-Rohrsonden beinhaltet. Die Ergebnisse sind für zwei verschiedene t_c in Abb. 5.30 dargestellt. Die Temperatur, die von dem Modelica-Modell berechnet wird, kann im Fall von $t_c = 24\text{ h}$ nur näherungsweise auf das Untergrundmodell übertragen werden. Wesentlich genauer wird die Übertragung im Fall von $t_c = 1\text{ h}$. Zur Beurteilung des Informationsverlusts reicht die zeitabhängige Betrachtung der

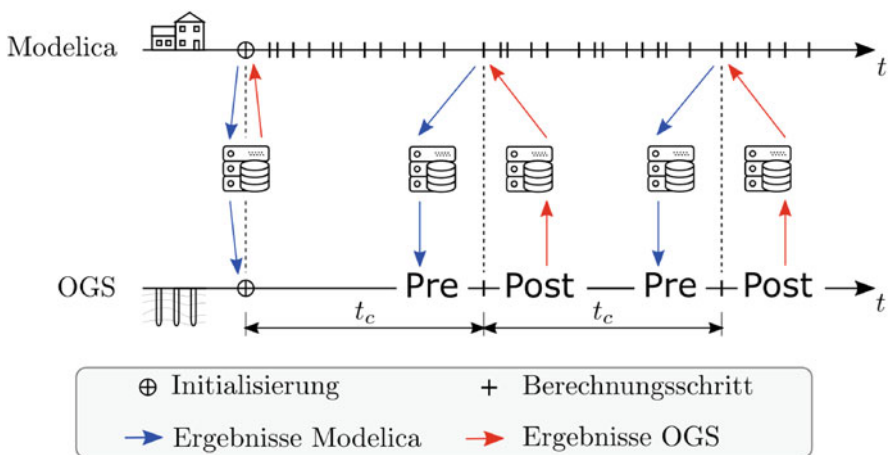


Abb. 5.29 Zeitlicher Ablauf der Kommunikation zwischen Modelica und OGS über den Server

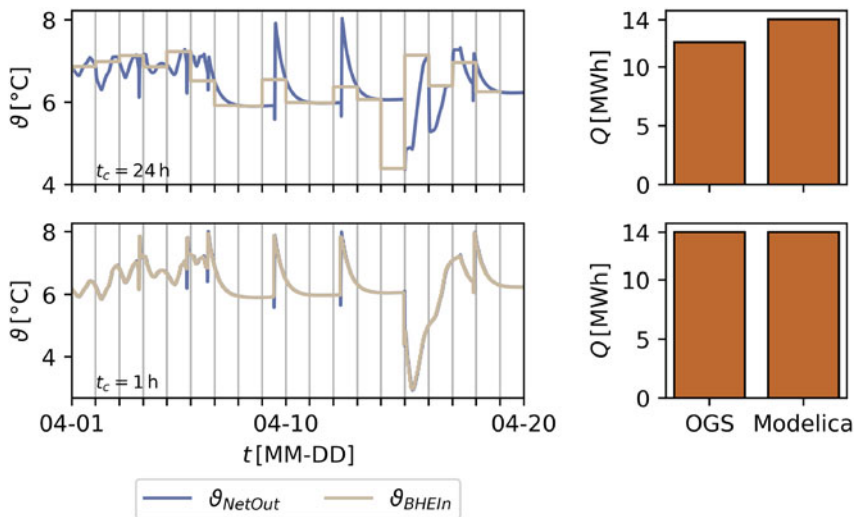


Abb. 5.30 Veranschaulichung des Informationsverlusts durch die Schnittstelle am Beispiel der Soletemperatur im Nahwärmenetz; Ausschnitt einer Jahressimulation des quartierseitigen Validierungsmodells (siehe Abschn. 5.1.3), das mit drei untergrundseitigen Doppel-U-Rohrsonden gekoppelt wurde

Temperaturen nicht. Erst die integrative Untersuchung der Temperaturen in Form von Energiemengen lässt Schlussfolgerungen bezüglich t_c zu. Unterschieden wird zwischen der Energiemenge, die im Modelica-Modell benötigt wird

$$Q_{Modelica} = \rho_{rf} c_{rf} \int_{0h}^{8760h} \dot{V}_{Net} (\vartheta_{NetIn} - \vartheta_{NetOut}) dt \quad (5.2)$$

und der Energiemenge, die durch OGS bereitgestellt wird

$$Q_{OGS} = \rho_{rf} c_{rf} \int_{0h}^{8760h} \dot{V}_{Net} (\vartheta_{NetIn} - \vartheta_{BHEIn}) dt. \quad (5.3)$$

Abb. 5.30 zeigt, dass die Energiemengen bei täglichen Kommunikationszeitschritten eine große Differenz aufweisen, die durch eine häufigere Kommunikation verringert werden kann. Relativ betrachtet, ergibt sich die Abweichung zu

$$\Delta Q_{rel} = \frac{Q_{Modelica} - Q_{OGS}}{Q_{Modelica}} 100\%. \quad (5.4)$$

Abb. 5.31 veranschaulicht den zeitlichen Verlauf von ΔQ_{rel} über die Simulationsdauer in Abhängigkeit von t_c . Auffällig sind die Übergangszeiträume im Frühjahr und im Herbst sowie die Sommermonate. In den Übergangszeiträumen steigt ΔQ_{rel} verhältnismäßig stark an, da die vom Gebäude benötigte Leistung großen Schwankungen unterliegt. Die Leistungsschwankungen beeinflussen die kommunizierten Ergebnisse und bilden im Zusammenhang mit groben Kommunikationszeitschritten größere Energieunterschiede. Im Sommer hingegen hat das Gebäude keinen

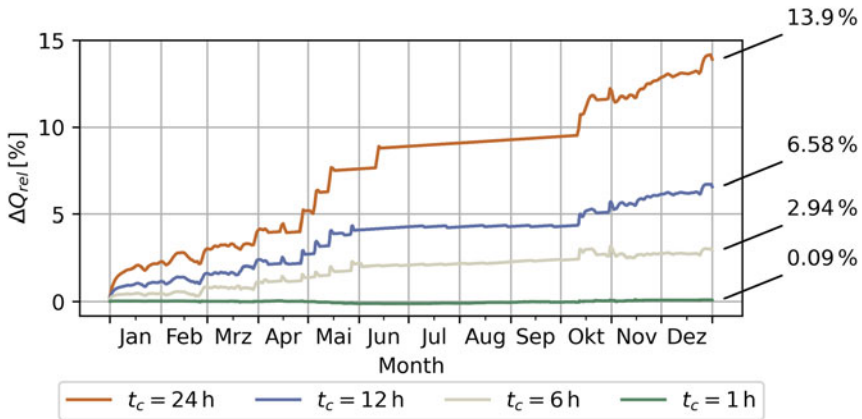


Abb. 5.31 Zeitlicher Verlauf des relativen Energiemengenunterschieds in Abhängigkeit der Kommunikationszeitschrittweite; Jahressimulation des quartierseitigen Validierungsmodells (siehe Abschn. 5.1.3), das mit drei untergrundseitigen Doppel-U-Rohrsonden gekoppelt wurde

Kühlbedarf, deshalb beträgt \dot{V}_{Net} die meiste Zeit $0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Die relativ geringen Änderungen der kommunizierten Ergebnisse führen zu geringeren Energieunterschieden, obwohl die Kommunikationszeitschrittweiten groß sind. Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich ein Optimierungspotenzial bezüglich des Rechenaufwands durch die Nutzung von variablen Zeitschrittweiten.

Der Rechenaufwand für die Co-Simulation, deren Ergebnisse in diesem Abschnitt thematisiert wurden, beträgt, aufgeteilt in die von OGS benötigten Zeit, gefolgt von der in SimulationX benötigten Zeit:

- $t_c = 24 \text{ h}$ 20,50 min und 8,50 min,
- $t_c = 12 \text{ h}$ 39,95 min und 8,73 min,
- $t_c = 6 \text{ h}$ 70,25 min und 8,62 min und
- $t_c = 1 \text{ h}$ 221,90 min und 8,25 min.

Die hier aufgelisteten Rechenzeiten wurden auf einem Berechnungsserver mit 128 Kernen (2.3 GHz) und 1024 GB Random-Access Memory (RAM) erreicht. Da SimulationX nicht in der Lage ist, mehrere Kerne parallel zu nutzen, ist deren Anzahl nicht ausschlaggebend. Erwartungsgemäß steigt die Rechenzeit, die OGS benötigt, da die Rechenschrittweite der Kommunikationsschrittweite entspricht. Im Gegensatz zu OGS ändert sich die Rechenzeit des Modelica-Modells nicht nennenswert, da die Rechenschrittweite unabhängig von der Kommunikationsschrittweite im Bereich von Sekunden liegt.

Der anschließende Abschn. 5.2.2 beschäftigt sich mit der Frage nach dem Mehrwert dieser Schnittstelle, indem die Ergebnisse des Untergrundmodells mit zunehmend detaillierteren Randbedingungen (bis zur Co-Simulation) des gebäudeseitigen Energiebedarfs berechnet und verglichen werden. Die folgenden Ergebnisse wurden

jeweils mit $t_c = 1$ h berechnet, um Fehler in der Energiebilanz möglichst gering zu halten.

5.2.2 Analyse des Gesamtsystems

Die als Teil der Effizienzanalysen entwickelte Softwareschnittstelle zwischen der Haus- und Anlagentechnik in Modelica und des Untergrunds in OGS soll im Folgenden analysiert werden. Dabei steht vor allem die Qualität der Ergebnisse im Vordergrund, die sich aufgrund verschiedener Informationsgrundlagen unterscheiden. Die gekoppelte Simulation soll einen dynamischen Austausch von Parametern beider Teilsysteme während der laufenden Simulation ermöglichen, der präzisere Aussagen zu den abhängigen ober- und unterirdischen Vorgängen zulässt. Einerseits hat der Heiz- und Kühlbedarf des Systems von der Gebäudeseite mitunter den größten Einfluss auf die Entwicklung der Untergrundtemperatur (vgl. Abschn. 4.1). Die sich ergebenden Fluidtemperaturen, die sich aus den Wärmetransport- und -übergangsprozessen im Untergrund ableiten, haben andererseits einen direkten Einfluss auf die Anlageneffizienz. Beide Teilsysteme haben demnach enorme Auswirkungen auf das jeweils andere Modell und bedingen sich permanent. Die Analyse der Schnittstelle soll den Einfluss dieser gekoppelten Simulation im Vergleich zu anderen Szenarien untersuchen und Aussagen über dessen Wirksamkeit in Bezug auf die Vorhersage komplexer Prozesse zulassen. Außerdem wird eine Langzeitsimulation von 15 Jahren vorgestellt, die den Einfluss gemessener Umweltbedingungen mit den sich wiederholenden Einflüssen des TRY 2015 vergleicht.

5.2.2.1 Simulationsszenarien

Für die Analyse des Gesamtsystems wurden verschiedene Simulationsszenarien erstellt, die jeweils unterschiedliche Datengrundlagen besitzen. Eine entsprechende Übersicht ist in Tab. 5.14 abgebildet. Szenario 1 stellt die teilweise genutzte derzeitige Praxis dar, bei der der Jahresenergiebedarf des Gebäudes auf monatlich konstante Werte für die thermische Entzugsleistung des Untergrunds reduziert wird. Dieses Vorgehen hat jedoch einen stark begrenzten Informationsgehalt (vgl. Abb. 5.32 und 5.33). Die Szenarien 2 und 3 beschreiben sequenzielle, also nacheinander ablaufende Simulationen, wobei die Haus- und Anlagentechnik teilweise bzw. vollständig zuvor in Modelica simuliert werden. Die resultierenden Kurven der Heizlast und Durchflussrate werden anschließend als Randbedingung in der Untergrundsimulation verwendet. Die gekoppelte Simulation nutzt die im Rahmen von EASyQuart entwickelte Softwareschnittstelle zwischen Modelica und OGS und ermöglicht einen dynamischen, gegenseitig abhängigen Datenaustausch zwischen den beiden Programmen, der für die Simulation des jeweils anderen Teilsystems verwendet wird. Um die jeweiligen Simulationen vergleichbar zu halten, wurde in allen Szenarien eine Zeitschrittweite von einer Stunde gewählt, welche in Szenario 4 auch der Kommunikationszeitschrittweite entspricht.

Tab. 5.14 Simulationsszenarien für die Analyse des Gesamtsystems

Nr.	Szenario	Beschreibung
1	Jahresenergiemenge ohne zeitabhängigen Verlauf	Als Datengrundlage fungiert lediglich die benötigte Jahresenergiemenge des Gebäudes, die durch monatliche prozentuale Anteile in jeweils konstante Leistungen \dot{Q}_{Net} je Monat umgerechnet wird. Der COP und \dot{V}_{BHE} werden angenommen, daher ist der Informationsgehalt dieses Szenarios sehr begrenzt
2	Nur Gebäudesimulation	Als Bemessungsgrundlage wurde zunächst eine Simulation des Gebäudes durchgeführt, um \dot{Q}_{Net} hochaufgelöst zu definieren. Durch Annahmen der Anlagentechnik (COP, \dot{V}_{BHE}) besitzt dieses Szenario einen teilweise begrenzten Informationsgehalt
3	Gebäude- und Anlagensimulation	Das Modelica-Modell berücksichtigt hierbei neben dem Gebäude außerdem die Anlagentechnik, sodass hochaufgelöste Kurven des Wärmebedarfs unter Berücksichtigung eines dynamischen COP und \dot{V}_{BHE} exportiert und für die Untergrundsimulation verwendet werden können
4	Gekoppelte Simulation	Die entwickelte Schnittstellensimulation zwischen OGS und Modelica bietet die dynamischste und flexibelste Kopplung aus einerseits der Gebäude- und Anlagentechnik sowie andererseits des Untergrunds. Bei jedem Berechnungsschritt werden ϑ_{BHEIn} und \dot{V}_{BHE} übergeben und die Ergebnisse des Untergrundmodells im Modelica-Modell verwendet

Als Datengrundlage für den Wärmebedarf des fiktiven Gebäudes wurde in einem ersten Schritt eine Haustechniksimulation mittels Modelica durchgeführt. Dabei wurde das erdseitige Sondenfeld lediglich als Quelle bzw. Senke dargestellt, die eine konstante Temperatur ϑ_{NetIn} an das Berechnungsmodell zurückgibt. Als Ergebnisse lagen sowohl der Gesamtenergiebedarf des Gebäudes (für Szenario 1) sowie zeitlich hochaufgelöste Heizlastkurven (für Szenario 2 und 3) vor, die anschließend als Randbedingung für die sequenziell darauf folgende Untergrundsimulation verwendet wurden. Für die gekoppelte Simulation wurde statt der Quellen-/Senkendefinition die Schnittstelle genutzt, welche die Parameterwerte des Durchflusses und der Fluidtemperatur im Heizkreislauf nach jedem Berechnungsschritt an die jeweils andere Software überträgt. Als Bezugswert für den Vergleich der Szenarien wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen des Sondenkreislaufs von OGS verglichen, sodass auch deren Differenz auswertbar ist, die direkt proportional zur extrahierten Wärmeleistung ist.

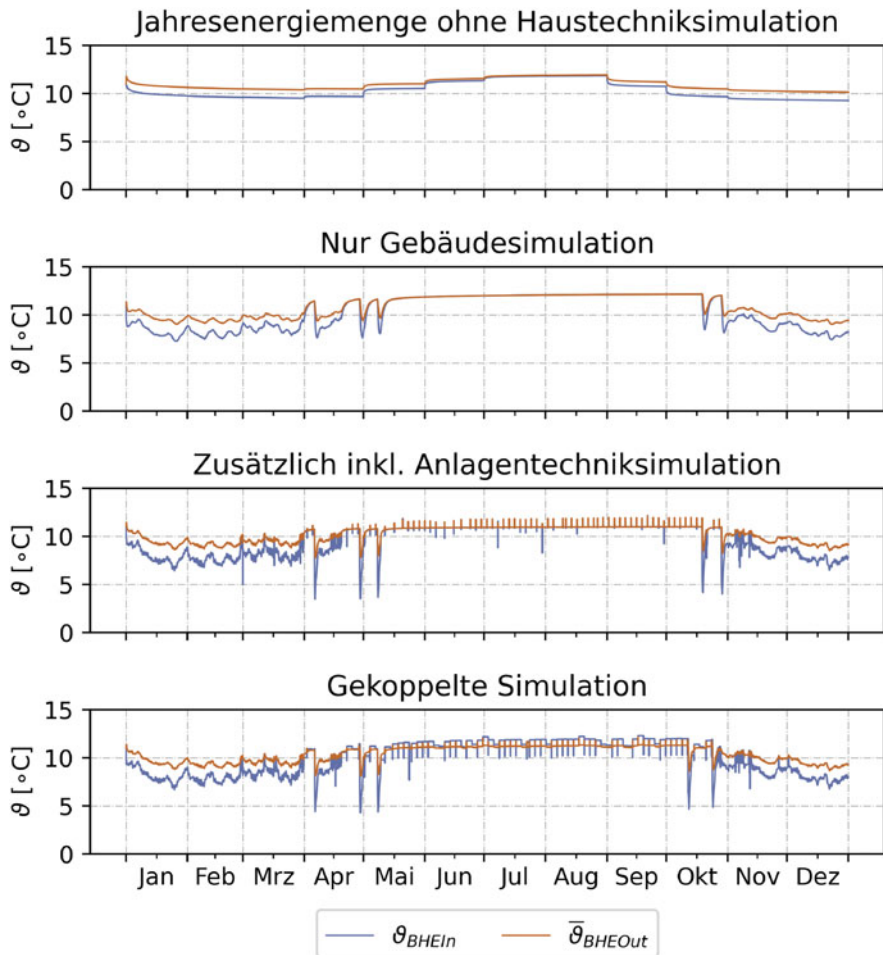


Abb. 5.32 Fluidtemperaturen der Sonde für verschiedene Simulationsszenarien im inhomogenen Modell. Blau: Sondenvorlauf, Rot: Sondenrücklauf

5.2.2.2 Inhomogenes Modell

Als erstes Simulationsbenchmark wurde ein 3-Sondenfeld mit einer Größe von $50\text{m} \times 15\text{m} \times 115\text{m}$ verwendet. Der geologische Untergrund ist dabei inhomogen und in acht verschiedene geologische Schichten unterteilt, wobei teilweise ein Grundwasserleiter existiert. Der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen in Vor- und Rücklauf des Erdwärmesondenfelds ist in Abb. 5.32 illustriert. Analog zu ihrer Datengrundlage haben die beiden ersten Szenarien eine lediglich begrenzte Aussagekraft über die Entwicklung der Fluidtemperatur im Systemkreislauf. Die verwendeten Randbedingungen sind durch zahlreiche Annahmen vereinfacht und können die Realität vergleichsweise nur abstrahiert darstellen. Die Szenarien 3 und 4 unterscheiden sich weniger durch die verwendete Datengrundlage, sondern aufgrund der verwen-

deten Methodik. Beide können auf den vollen Informationsumfang der Haus- und Anlagentechniksimulation zurückgreifen. In Szenario 3 wurden der Verlauf der benötigten Fluidtemperaturen und -durchflussraten allerdings als feste Randbedingung in der Untergrundsimulation definiert. Szenario 4 beschreibt die gekoppelte Simulation, die während der Laufzeit eine Parametermanipulation ermöglicht, sodass beide Teilsysteme mit regelmäßig aktualisierten Randbedingungen berechnet werden können. Aufgrund der zusätzlich simulierten Anlagentechnik kommt es bei beiden Szenarien während des Sommers auch ohne direkten Wärmebedarf zu kurzweiligen Betriebszeiten der Wärmepumpe, sobald der implementierte Wärmespeicher unter eine bestimmte Temperaturtoleranz fällt. Werden die Ergebnisse aus einer pragmatischen Sicht betrachtet, für die ein grober Verlauf bereits als präzise genug gewertet wird, lässt sich postulieren, dass für dieses Modell verwertbare Ergebnisse auch ohne die Simulation der Anlagentechnik (Szenario 2) oder sogar ganz ohne vorherigen Gebäudesimulation (Szenario 1) generieren lassen. Der prinzipielle Verlauf und Trend ist in allen vier Fällen analysierbar. Aufgrund der Unsicherheiten, mit denen die Auslegung von Erdwärmesondenanlagen behaftet ist (vgl. Abschn. 4.2), empfiehlt es sich ohnehin, eine ausreichende Toleranz bei der Dimensionierung zu berücksichtigen. Dieses Verhalten kann sich allerdings auch auf die beschränkte Komplexität des verwendeten Modells zurückführen lassen, weshalb in einem nächsten Schritt ein größeres Modell mit komplexeren Rand- und Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden soll.

5.2.2.3 Berlin-Modell

Das Berlin-Modell beschreibt ein öffentliches Gebäude, welches 16 Sonden zum Heizen und Kühlen verwendet. Das Modell wurde bereits für verschiedene Analysen verwendet und wird in Abschn. 6.2 ausführlich beschrieben. Für diesen Anwendungsfall wird allerdings ein gröber diskretisiertes Modell mit ca. 400.000 Elementen verwendet, um den Berechnungsaufwand in einem nutzbaren Bereich zu halten. Analog zum inhomogenen Modell zuvor wurden auch für dieses Untergrundmodell alle vier Szenarien angewendet. Neben der komplexeren Geometrie hat vor allem der zusätzliche Kühlbedarf im Sommer einen entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Im Berechnungsmodell der Haus- und Anlagentechnik ist nur ein Wärmespeicher, nicht aber ein Kältespeicher verbaut. Der Kühlbedarf wird direkt über den Plattenwärmeübertrager realisiert, indem die überschüssige Raumwärme im Erdreich eingespeichert wird. Das Besondere an der Geothermie ist, dass der Kühlprozess und die damit verbundene zusätzliche Wärme im Erdreich zu einer besseren Betriebsleistung als durch reinen Heizbetrieb führt. Die Betrachtung und Realisierung der Regelung der klimatischen Bedingungen im Gebäude mussten teilweise durch Annahmen erfolgen. So wurde in Szenario 1 der Kühlbetrieb des Gebäudes ausschließlich in den Monaten Mai bis September realisiert, dafür wurde der Wärmebedarf dieser Monate auf die anderen Monate verteilt. Die restlichen Szenarien nutzen den dynamischen hausseitigen Heiz- und Kühlbedarf, der durch die Modelica-Simulation sequenziell vor der Untergrundsimulation oder für die gekoppelte Simulation simultan berechnet wird.

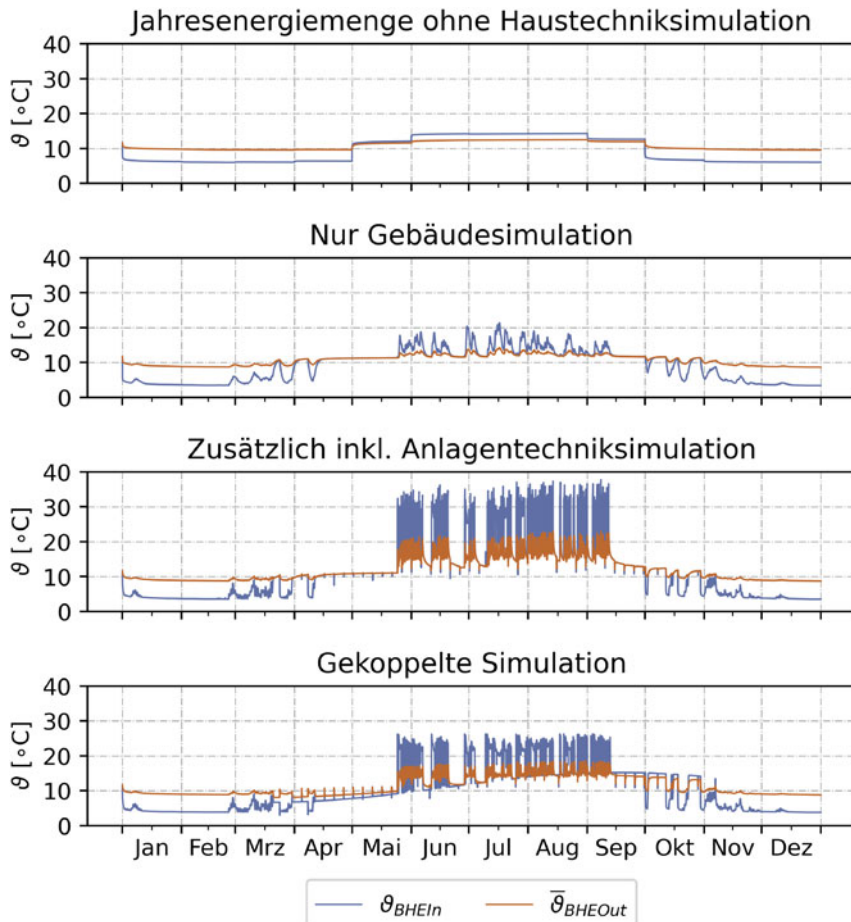


Abb. 5.33 Fluidtemperaturen der Sonde für verschiedene Simulationsszenarien im Berlin-Modell. Blau: Sondenvorlauf, Rot: Sondenrücklauf

Auf dieser Grundlage verfügt die Simulation aufgrund des Jahresenergiebedarfs wie schon beim inhomogenen Modell über einen einfachen Verlauf und eine lediglich beschränkte Aussagekraft (siehe Abb. 5.33). In Verbindung mit einer zuvor durchgeführten Gebäudetechniksimulation (Szenario 2) können bereits deutlich detailliertere Aussagen zum Wärmebedarf berücksichtigt werden. Im Bereich des Heizbetriebs von Oktober bis Mai befinden sich die Ergebnisse der Untergrundsimulation in guter Übereinstimmung mit den Szenarien 3 und 4, die zusätzlich die Anlagentechnik, also die Wärmepumpe, den Heizpufferspeicher und den Plattenwärmeübertrager (für den Kühlfall) berücksichtigen. Daher können in diesen beiden Fällen die realistischsten Aussagen im Kühlbetrieb über die Sommermonate getroffen werden. Im Gebäudemodell ist für die Innenraumtemperatur eine Regelgröße mit einer Maximaltemperatur von 26°C definiert. Bei Überschreitung dieser Temperatur wird das Raumklima

über den Plattenwärmeübertrager reguliert und die überschüssige Wärme im Boden eingespeichert. In diesem Fall liegt die Sondenvorlauftemperatur oberhalb der des Rücklaufs. Die Untergrundsimulationen in den Szenarien 1, 2 und 3 können die genaue Regelung dieser Größe allerdings nicht adäquat darstellen. Für die sequenziellen Simulationen musste die Komponente der Quellenseite für die Wärmepumpe vereinfacht angenommen werden. Dieser Baustein kann die komplexen Vorgänge im geologischen Untergrund nicht korrekt abbilden. Zwar tritt auch hier die klimatische Regelung bei Überschreitung der zulässigen Maximaltemperatur ein, allerdings nicht in Abhängigkeit der zeitabhängigen Untergrundtemperaturen, sondern aufgrund der angenommenen konstanten Quelltemperatur in der sequenziellen Simulation. Die daraus resultierende Leistungskurve ist fest definiert und unterliegt nicht mehr dem regelungstechnischen Einfluss der Haus- und Anlagentechnik, wenn sie anschließend als Randbedingung für die Untergrundsimulation in Szenario 3 verwendet wird. Dieses Verhalten kann nur in der gekoppelten Simulation berücksichtigt werden, da die beiden Teilsysteme der oberirdischen Haus- und Anlagentechnik und des Untergrunds bei jedem Berechnungsschritt in Interaktion treten. Bei Überschreiten der Regelgröße für den Kühlfall wird die Information unter Berücksichtigung der aktuellen Parameter der Hausseite direkt an die Untergrundsimulation übertragen und im folgenden Berechnungszeitschritt verwendet.

Neben den hier dargestellten Ergebnissen wird die Co-Simulation des Berlin-Modells im Kap. 7 als 3D-Modell visualisiert.

5.2.2.4 Langzeitanalyse

Eine der zentralen Fragen des Verbundpartners geoENERGIE Konzept bezieht sich auf die Auswirkung unterschiedlicher Umgebungsbedingungen an der Erdoberfläche auf die Soletemperaturen im Untergrund. Der Hintergrund dieser Fragestellung nimmt Bezug auf die Annahme, dass der typischerweise jährliche Berechnungszeitraum der Gebäudesimulation im Rahmen von Langzeitanalysen des Untergrundmodells als sich wiederholende Randbedingung definiert wird. Die benötigte Wärmeleistung, um das Gebäude zu versorgen, unterliegt allerdings Schwankungen, die hauptsächlich von der Außenlufttemperatur und der solaren Einstrahlung abhängt. Um zu untersuchen, welchen Einfluss diese Schwankungen der Umgebungsbedingungen auf die Soletemperatur haben, wird ein Co-Simulationsmodell erstellt, das 15 Jahre gemessene Umgebungsbedingungen mit 15 Wiederholungen des TRY 2015 vergleicht.

Die Datengrundlage für die Messdaten der Umgebungsbedingungen besteht aus der Datenbank Climate Data Center (CDC) des DWD. Die Verfügbarkeit von 15 Jahren kontinuierlicher Messdaten ist bezogen auf die Außenlufttemperatur kein Problem, die direkte und diffuse solare Einstrahlung hingegen hat an vielen Messstationen größere Fehlerbereiche. Die geringste Anzahl an fehlerhaften Werten bietet der Standort Lindenberg, dessen Aufzeichnungen von den Jahren 2004 bis 2019 für die Simulation genutzt werden. Wie bereits in vorangegangenen Untersuchungen wird das Validierungsmodell (siehe Abschn. 5.1.3) mit drei Doppel-U-Rohrsonden gekoppelt.

Die Ergebnisse der Co-Simulation sind in Abb. 5.34 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse jeweils auf Jahreszeiträume bezogen. Der Mittelwert der Außenlufttemperatur ϑ_e ist bei den Messdaten bis auf das Jahr 2010 größer als bei dem TRY 2015. Im Zusammenhang mit der solaren Einstrahlung resultieren die maximalen Abweichungen der jährlichen Energiemenge in Bezug auf das TRY 2015 zu ca. +0,8 MWh und -2,9 MWh. 2014 wurden nur ca. 80 % der Wärmeenergiemenge des TRY benötigt. Die Soletemperatur am Hauptleitungseingang ϑ_{NetIn} nimmt im Mittel erwartungsgemäß mit dem laufenden Betrieb der Anlage ab. Die unterschiedlichen benötigten Energiemengen beeinflussen die Temperatur der Sole, aber sowohl Messdaten als auch das TRY bilden den gleichen Trend ab. Im letzten Simulationsjahr 2018 unterscheidet sich die Temperatur der Sole zwar um ca. 0,34 °C, aber das Gesamtsystem scheint sich noch nicht im stabilen Zustand zu befinden, da die Temperatur der Sole weiterhin sinkt. Für die Auslegung des geothermischen Systems für das Validierungsgebäude ist die Nutzung der Daten des TRY folglich zulässig.

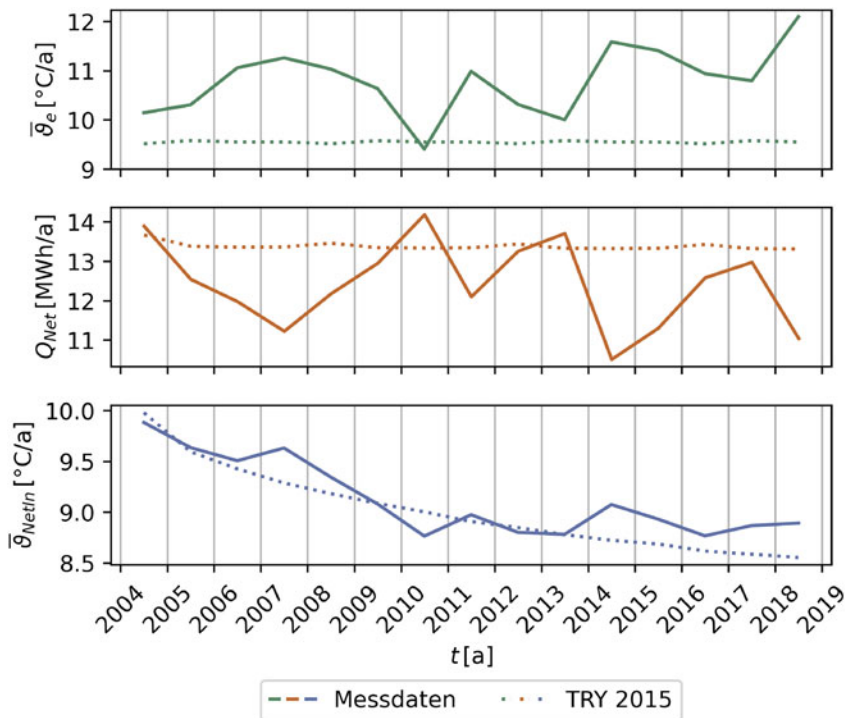


Abb. 5.34 Ergebnisse der Langzeitanalyse als Co-Simulation am Standort Lindenberg; Modelica-Validierungsmodell (siehe Abschn. 5.1.3) mit drei untergrundseitigen Doppel-U-Rohrsonden

5.2.3 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Schnittstelle zwischen den beiden Teilsystemen Untergrund und Quartier ermöglicht die Untersuchung des Gesamtsystems inklusive der gegenseitigen Beeinflussung der Systeme. Um den Informationsverlust durch die unterschiedlichen Rechenschrittweiten verhältnismäßig gering zu halten, kommunizieren die Programme stündlich (Simulationszeit). Mit variablen Kommunikationszeitschrittweiten kann die benötigte Rechenzeit voraussichtlich minimiert werden, da vor allem die Übergangszeiträume Frühling und Herbst schnelle Änderungen der Kommunikationsergebnisse beinhalten und dementsprechend kleine Schrittweiten benötigen. Der Sommerzeitraum hingegen kann ohne wesentliche Informationsverluste mit größeren Schrittweiten berechnet werden. Für die Umsetzung variabler Kommunikationszeitschrittweiten bieten die folgenden Veröffentlichungen erste Ansatzmöglichkeiten (Formhals et al. 2022; Hu et al. 2020; Thiele et al. 2017).

Innerhalb eines Vergleichs von unterschiedlichen Szenarien, die das gleiche Gebäude- und Anlagenmodell unterschiedlich detailliert in die Untergrundsimulation einbinden, wird die Schnittstelle angewendet. Tab. 5.15 stellt einige Eckdaten der Soletemperatur, die zur Wärmepumpe strömt, quantitativ gegenüber. Der Informationsgehalt in Szenario 1 vernachlässigt Leistungsspitzen, Minimal- und Maximalwerte von ϑ_{BHEOut} lassen deshalb nicht auf kritische Zeitpunkte schließen. Die geothermischen Anlagen müssen dadurch mit einem größeren Puffer ausgelegt werden. Außerdem ist die resultierende Temperatur wegen des gemittelten Leistungsbedarfs zum Simulationsende deutlich höher. Im Fall des inhomogenen Modells, das keinen Kühlbedarf hat, sind die Ergebnisse von Szenario 3 und 4 kaum zu unterscheiden. Hier ist der zusätzliche Aufwand, der durch die Co-Simulation entsteht, nicht gerechtfertigt. Im Fall des Berlin-Modells kommt es zur Überhöhung der Soletemperaturen im Kühlfall, da das Gebäude- und Anlagenmodell mit einer konstanten Soletemperatur von $\vartheta_{NetIn} = 9^\circ\text{C}$ rechnet und die resultierende Kühlleistung im Untergrundmodell berücksichtigt wird. In der Co-Simulation steigt ϑ_{NetIn} durch die Kühlung des Gebäudes an und die Bereitstellung der Kühlenergie erfolgt über einen längeren Zeitraum. In diesem Fall ist die Beeinflussung der beiden Teilsysteme relativ groß und die Co-Simulation kann gewinnbringend angewandt werden.

Die Langzeitanalyse am Standort Lindenberg vergleicht den Einfluss von gemessenen Wetterdaten mit den Daten des TRY 2015. Der Energiemengenbedarf des Anlagen- und Gebäudemodells weicht aufgrund der gemessenen Wetterdaten um bis zu 20 % von den Ergebnissen der Simulation unter Einfluss des TRY ab. Trotz dieser Abweichung bildet die TRY-Simulation den Trend der Soletemperatur ab. Die Messdaten führen zu einer Soletemperatur ϑ_{NetIn} am Ende der Simulation, die $0,34^\circ\text{C}$ wärmer ist als die der TRY-Simulation. Hier kann allerdings kein allgemeiner Zusammenhang abgeleitet werden, da die gemessene Jahresdurchschnittstemperatur meist über der Jahresdurchschnittstemperatur des TRY liegt. Inwiefern die TRY 2015 des DWD noch geeignet sind, um als Randbedingung für Auslegungsrechnungen genutzt zu werden oder ob z. B. das TRY 2045 eher den derzeitigen Messdaten entspricht, bedarf einer umfassenderen Untersuchung.

Tab. 5.15 Quantitative Ergebnisse der Simulationsszenarien, die das Gebäude- und Anlagenmodell mit unterschiedlichem Informationsgehalt berücksichtigen (siehe Tab. 5.14)

Nr.	$\min(\overline{\vartheta}_{BHEOut}) [^{\circ}\text{C}]$	$\max(\overline{\vartheta}_{BHEOut}) [^{\circ}\text{C}]$	$\overline{\vartheta}_{BHEOut}(t = 365 \text{ d}) [^{\circ}\text{C}]$
Inhomogenes Modell			
1	10,13	11,92	10,13
2	9,02	12,14	9,42
3	7,73	12,11	9,42
4	8,12	12,11	9,27
Berlin-Modell			
1	9,55	12,49	9,55
2	8,67	14,26	8,67
3	8,72	23,08	8,72
4	8,10	18,58	8,81

Die vorgestellten Co-Simulationen werden aktuell auf Einzelgebäuden angewendet. Die Kombination aus detaillierten Lastprofilen und entsprechend kleinen Rechenschrittweiten stellt vor allem das Untergrundmodell vor Probleme bezüglich der Rechenzeit, sofern ganze Quartiersmodelle berechnet werden sollen. Die Einschränkungen, die sich bei der Berechnung von 3D-Finite-Elemente-Methode (FEM)-Modellen von größeren Sondenfeldern in OGS ergeben, sind dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) bekannt und sollen in folgenden Projekten weiter bearbeitet werden.

Literatur

- Arias P, Bellouin N, Coppola E et al (2021) Technical summary. In: Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 33–144. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002> (type: Book Section)
- Bitterer R, Schieferdecker B (1999) Repräsentative VDEW-Lastprofile. Tech. rep., Verband der Elektrizitätswirtschaft, Frankfurt (Main)
- Blochwitz T, Otter M, Arnold M et al (2011) The functional mockup interface for tool independent exchange of simulation models. In: Clauß C (Hrsg) 8th international Modelica conference. Linköping University Press, Linköping Electronic Conference Proceedings, pp 105–114. <https://elib.dlr.de/74668/>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- BMWi (2015) Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand. Tech. rep., Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- BMWi (2021) Energieeffizienz in Zahlen – Entwicklung und Trends in Deutschland 2021. Tech. rep., Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi), Berlin

- Brennenstuhl M, Zeh R, Otto R et al (2019) Report on a plus-energy district with low-temperature DHC network, novel agrothermal heat source, and applied demand response. *Appl Sci* 9(23):5059. <https://doi.org/10.3390/app9235059>
- DIN EN 14511-2 (2019) Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 2: Prüfbedingungen. Tech. rep
- DIN EN 15316-3 (2017) Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen – Teil 3: Wärmeverteilungssysteme (Trinkwassererwärmung, Heizung und Kühlung). Tech. rep
- DIN V 18599-1 (2018) Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Tech. rep
- Erhorn H (2010) Energetische Quartiersplanung in Deutschland: wissenschaftliche Begleitung der Förderaktivität „Energieeffiziente Stadt“ – Schlussbericht Phase 1; EnEff: Stadt – Forschung für die energieeffiziente Stadt. Tech. rep., Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. <https://doi.org/10.2314/GBV:643917160>
- Formhals J, Welsch B, Hemmatabady H et al (2022) Co-simulation of district heating systems and borehole heat exchanger arrays using 3D finite element method subsurface models. *J Build Perform Simul* 15(3):362–378. <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2058088>
- Freudenau H, Siebert S, Bußkamp M et al (2021) Neue Stadtquartiere – Konzepte und gebaute Realität. Projektbericht 04/2021, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-04-2021.html;jsessionid=6B1A810184602A5A656753C4BF8D40B2.live21303>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Hu J, Doughty C, Dobson P et al (2020) Coupling subsurface and above-surface models for design of borefields and geothermal district heating and cooling systems. In: Proceedings, 45th workshop on geothermal reservoir engineering
- Häubi F, Roth U (1981) Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. <https://doi.org/10.5169/SEALS-74579>, medium: text/html, application/pdf Publisher: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
- Lauster M, Mans M, Remmen P et al (2016) Scalable design-driven parameterization of reduced order models using archetype buildings with TEASER
- Liebig S, Goebel J, Schröder C et al (2019) Socio-Economic Panel (SOEP), data from 1984–2018. Sozio-ökonomisches Panel (SOEP). Daten der Jahre 1984–2018. <https://doi.org/10.5684/SOEP-CORE.V35>
- Loga T, Diefenbach N, Knissel J et al (2005) Entwicklung eines vereinfachten statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Enderbericht, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
- Nytsch-Geusen C, Kreulitsch D et al (2018) GIS-basierte energetische Modellierung und Simulation von Stadtquartieren aus dem Bestand auf Basis von Modelica. *BauSim2018*
- Pietruschka D (2016) Vision 2020: die Plusenergiegemeinde Wüstenrot. Fraunhofer IRB, Stuttgart
- Rogatty W (2006) Wärme nach Maß. *IKZ-Haustechnik* 14
- Satke P (2022) Entwicklung und Analyse von Modellen für energetische Gebäude- und Anlagensimulationen mit Geothermie auf Quartiersebene. Master's thesis, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur, Leipzig. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:1189-qucosa2-782228>
- Schwan T, Unger R, Pipiorke J (2017) Aspects of FMI in building simulation, pp 73–78. <https://doi.org/10.3384/ecp1713273>
- Thiele B, Beutlich T, Waurich V et al (2017) Towards a standard-conform, platform-generic and feature-rich Modelica device drivers library. In: Kofránek J, Casella F (eds) Proceedings

- of the 12th international Modelica conference, Prague, pp 713–723. <https://doi.org/10.3384/ecp17132713>
- Tiller M (2014) Modelica by example. <https://mbe.modelica.university/>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Unger R, Schwan T, Mikoleit B et al (2012) „Green Building“ – modelling renewable building energy systems and electric mobility concepts using Modelica, pp 897–906. <https://doi.org/10.3384/ecp12076897>
- Viessmann (2011) Planungshandbuch Wärmepumpen. Tech. rep., Viessmann Deutschland GmbH
- Wieland A (2014) Projektentwicklung Nutzungsgemischter Quartiere. Springer Fachmedien, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-06903-2>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Benchmarks

6

Simon Richter, Jakob Randow, Haibing Shao, Katrin Lubashevsky, Steve Henker und Anke Bucher

In diesem Kapitel werden die im Rahmen von EASyQuart entwickelten Anwendungsbeispiele (Benchmarks) für OpenGeoSys (OGS) kurz vorgestellt. Diese Benchmarks betrachten beispielhaft Möglichkeiten der Simulation mit OGS und dienen auch der Qualitätssicherung in der Code-Entwicklung der Simulationsplattform. Im Speziellen werden drei Benchmarks vorgestellt. Diese betrachten unterschiedliche Themen. In Abschn. 6.1 werden Thermal-Response-Tests (TRT) betrachtet. Darauf folgt die Vorstellung einer Anwendungsstudie zu einem Erdwärmesondenfeld in Berlin (Abschn. 6.2). Abschließend wird im dritten Benchmark (Abschn. 6.3) die hydrodynamische Dispersion im Kontext der Simulation betrachtet.

S. Richter (✉) · J. Randow · K. Lubashevsky · A. Bucher
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: simon.richter@htwk-leipzig.de

J. Randow
E-mail: jakob.randow@htwk-leipzig.de

K. Lubashevsky
E-mail: katrin.lubashevsky@htwk-leipzig.de

A. Bucher
E-mail: anke.bucher@htwk-leipzig.de

H. Shao
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland
E-mail: haibing.shao@ufz.de

Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland

S. Henker
geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland
E-mail: thiel@geoenergie-konzept.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_6

6.1 Simulation von Thermal-Response-Tests

Ziel dieser Anwendungsstudie ist es, TRT in OGS-6 zu simulieren und die Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen der Messung abzugleichen. TRT dienen zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes, die für die Auslegung von Erdwärmesonden (EWS) benötigt werden (Bucher et al. 2018). Betrachtet werden hier drei TRT, die im Rahmen des Projektes „Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme (SAGS)“ am Geothermie-Testfeld des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) durchgeführt wurden. Die Tests fanden im Zeitraum 28.11. bis 12.12.2016 statt. Am Standort des UFZ finden sich vier EWS: Eine U-Sonde, zwei Doppel-U-Sonden und eine Koaxialsonde (Bucher et al. 2018). Testergebnisse liegen für die Doppel-U-Sonden (EWS 1 und EWS 2) und die Koaxialsonde (EWS 3) vor. Diese werden hier betrachtet. Daneben wird ein TRT an einer Doppel-U-Sonde (EWS Berlin) betrachtet, der für den in Abschn. 6.2 betrachteten Standort eines Sondenfeldes in Berlin durchgeführt wurde.

Die drei TRT am Testfeld des UFZ wurden im Rahmen einer studentischen Arbeit von Fenz (2017) bereits in OGS-5 simuliert. Dabei konnten die Ergebnisse der TRT mit guter Ergebnisqualität reproduziert werden. Neben dem Abgleich der Simulation in OGS-6 mit der Messung soll ein Vergleich der Simulationsergebnisse zwischen OGS-5 und OGS-6 erfolgen. Die Modelle zu den Sonden am Testfeld des UFZ wurden neu aufgebaut und die Berechnungen in OGS-5 deshalb und aufgrund von Unklarheiten in der Dokumentation wiederholt. Zum Abgleich zwischen den Simulationen und der Messung wird zunächst die Rücklauftemperatur des Kältemittels nach Durchlaufen der Sonde als Ergebnisgröße verwendet. Die Ergebnisse hierzu sind in Abschn. 6.1.2 zu finden. Des Weiteren erfolgt eine Auswertung der Wärmeleitfähigkeit nach VDI 4640 (2020) anhand der Rücklauftemperaturen, wie in Abschn. 6.1.3 beschrieben.

6.1.1 Datengrundlage und Modellierung

Für die TRT am Testfeld des UFZ wurden die Eingangsdaten für die Simulation zunächst weitestgehend von Fenz (2017) übernommen, um Vergleiche zu seiner Arbeit anstellen zu können. Diese Daten entstammen hauptsächlich den Messungen im Rahmen der TRT am realen Standort. Nach der Berechnung mit diesen Eingangsdaten wurden für einen zweiten Berechnungsdurchlauf in OGS-6 die Modellierung des geologischen Untergrundes angepasst und zudem Grundwasserströmungen berücksichtigt. Hierbei wurden vereinfachend rein horizontale Strömungen angenommen. Als Datengrundlage dienen hier Untersuchungen von Seibertz et al. (2016), welche durch Werte der VDI 4640 (2020) ergänzt wurden. Die Modellierung des geologischen Untergrundes erfolgte mittels Daten aus einer Kernansprache, welche im Rahmen der Bohrungen am UFZ-Testfeld durchgeführt wurde (Bucher et al. 2018). Zudem wurden die Materialparameter des Hinterfüllmaterials geändert. Aus Tab. 6.1 können die Spezifikationen der drei EWS entnommen werden. Alle weiteren Daten

Tab. 6.1 Spezifikationen der Erdwärmesonden am UFZ-Testfeld

Parameter	Einheit	EWS 1	EWS 2	EWS 3
<i>Sondenspezifikationen</i>				
Typ	–	2U	2U	CXC
Länge	m	21,4	22,8	21,5
Außendurchmesser	m	0,32	0,3	0,32
Rohrinnendurchmesser	m	0,0262	0,0262	0,056; 0,09
Rohrwandstärke	m	0,0029	0,0029	0,014; 0,0053
Abstand der Rohre	m	0,06	0,06	–
<i>Kältemittel</i>				
EWS-Vorlauftemperatur	°C			Siehe Abb. 6.2
Durchflussrate	m ³ s ⁻¹			Siehe Abb. 6.1
Spezifische Wärmekapazität	J kg ⁻¹ K ⁻¹			4182
Dichte	kg m ⁻³			998,2032
Wärmeleitfähigkeit	W m ⁻¹ K ⁻¹			0,5984
Dynamische Viskosität	kg m ⁻¹ s ⁻¹			0,001
<i>Hinterfüllmaterial</i>				
Dichte	kg m ⁻³			1600
Porosität	–			0
Spezifische Wärmekapazität	J kg ⁻¹ K ⁻¹			1735,16
Wärmeleitfähigkeit	W m ⁻¹ K ⁻¹			1,1

Tab. 6.2 Datengrundlage am Standort des UFZ-Testfelds

Parameter	Einheit	Wert
<i>Temperaturbedingungen</i>		
Geothermischer Gradient	K m ⁻¹	0,03
Referenztemperatur in 120m Tiefe	°C	13
Oberflächentemperatur	°C	Siehe Abb. 6.2
<i>Materialdaten des geologischen Untergrundes</i>		
Spezifische Wärmekapazität	J kg ⁻¹ K ⁻¹	1450 bis 1500
Dichte	kg m ⁻³	1950 bis 2000
Wärmeleitfähigkeit	W m ⁻¹ K ⁻¹	2,05 bis 3,27
Porosität	–	0%

sind in Tab. 6.2 und Abb. 6.1 und 6.2 zusammengefasst. Die zum ersten Berechnungsdurchlauf abweichenden Daten sind in Tab. 6.3 dargestellt.

Bei dem Modell zum TRT in Berlin (EWS Berlin) handelt es sich um eine vereinfachte und kleinere Variante des Modells zu dem Sondenfeld in Berlin, welches in Abschn. 6.2 beschrieben wird. Dort wurde der TRT an einer 99 m langen Doppel-

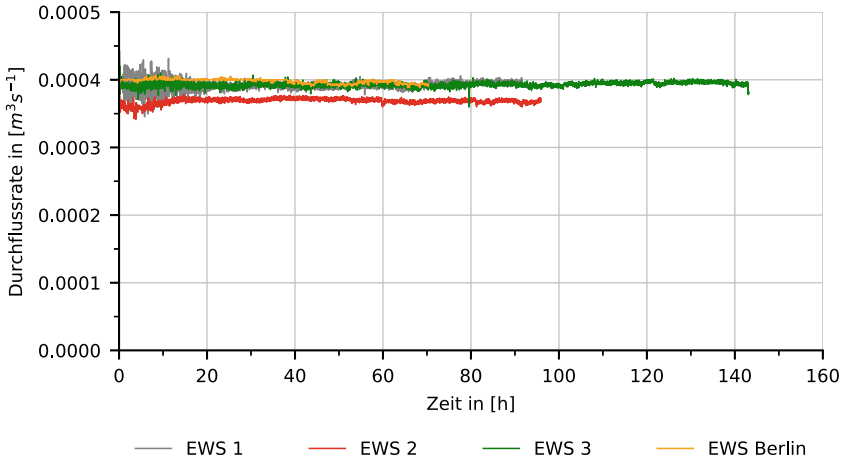


Abb. 6.1 Durchflussraten für das Kältemittel in den untersuchten TRT

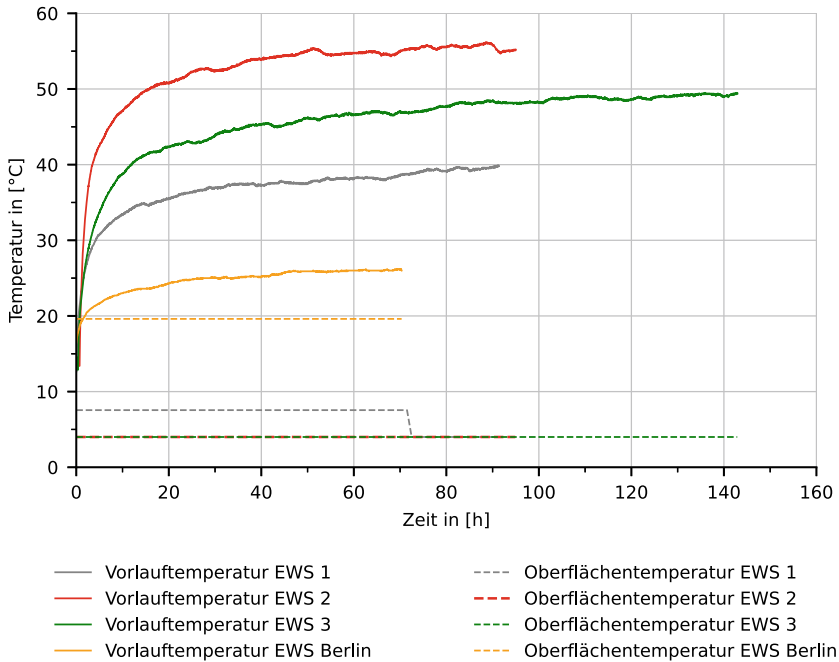


Abb. 6.2 Vorlauftemperaturen und Oberflächentemperaturen der untersuchten TRT (DWD Climate Center (CDC) 2018)

Tab. 6.3 Datenänderungen für den zweiten Berechnungsdurchlauf der Simulationen zu den TRT am UFZ-Testfeld

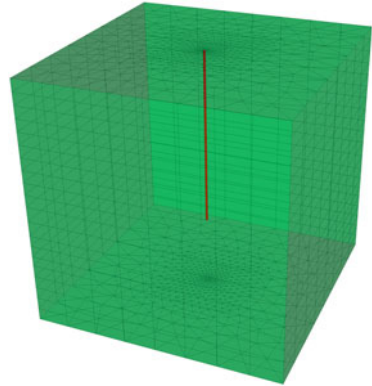
Parameter	Einheit	Wert
<i>Hinterfüllmaterial</i>		
Dichte	kg m^{-3}	2000
<i>Materialdaten des geologischen Untergrundes</i>		
Spezifische Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1000 bis 1500
Dichte	kg m^{-3}	1800 bis 2200
Porosität	–	5 % bis 25 %
<i>Grundwasserströmungen</i>		
Darcy-Geschwindigkeit	m s^{-1}	$8,2 \cdot 10^{-7}$ bis $1,1 \cdot 10^{-5}$

U-Sonde durchgeführt. Durchflussrate und Temperaturrandbedingungen dieser Untersuchung sind ebenfalls in Abb. 6.1 und 6.2 dargestellt.

Das Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) für die TRT an EWS 1 bis EWS 3 ist entsprechend der Arbeit von Fenz (2017) würfelförmig, mit einer Kantenlänge von 30 m. Die Diskretisierung des Modellbereiches wurde mit prismatischen Elementen realisiert, wie in Abb. 6.3 dargestellt. In Tiefenrichtung besitzen die Elemente eine Kantenlänge von 1,3 m bis 1,9 m. Die EWS wurde jeweils zentrisch im Modell platziert und wird durch Linienelemente repräsentiert. Sie ist umgeben von einem $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ großen Bereich feinerer Vernetzung mit einer maximalen horizontalen Elementkantenlänge von 1 m am Rand zum gröber vernetzten Bereich. Am äußeren Rand beträgt die maximale horizontale Elementkantenlänge 4 m. Die Modelle wurden mit dem *BHE-Setup-Tool* aus dem OGS Softwarezubehör erstellt (Shao et al. 2016). Im Modell wird dabei ein optimaler Knotenabstand um die Sonde berücksichtigt, welcher den realen Bohrlochdurchmesser repräsentiert (Diersch et al. 2011a). Hierfür wurde ein zu den Modellen von Fenz (2017) abweichender Bohrlochdurchmesser angegeben. Im zweiten Berechnungsdurchlauf wurde die Diskretisierung des Modells in Tiefenrichtung angepasst, sodass die Gesteinsschichten entsprechend der erwähnten Kernansprache und den vorliegenden Werten für Grundwasserströmungen definiert werden können. Hierbei ergaben sich Elementhöhen von 0,17 m bis 1,915 m.

Das Modell für EWS Berlin wurde vergleichbar zu den anderen Modellen aufgebaut und besteht in der hier verwendeten vereinfachten Variante ebenfalls aus rein horizontal verlaufenden geologischen Schichten, welche mit Elementkantenlängen von 0,7 m bis 6 m in vertikaler Richtung und einer maximalen Kantenlänge von 10 m in horizontaler Richtung vernetzt wurden. Zur Vollständigkeit wurde in den Modellen auch die Oberflächentemperatur durch eine Randbedingung mit den in Abb. 6.2 dargestellten Oberflächentemperaturen berücksichtigt. In einem solch kurzen Simulationszeitraum ist jedoch von einem geringen Einfluss durch die Oberflächentemperatur auszugehen. Für die Berechnung wurde in OGS die Simulationmethode

Abb. 6.3 OGS-6-Modell für den SAGS-TRT



Tab. 6.4 Simulierte Testdauer in [h] der TRT

	EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS Berlin
Testdauer	91	95	142	70

<TemperatureCurveFlowCurve> verwendet, bei der sowohl die Vorlauftemperatur als auch die Durchflussrate des Kältemittels als Kurve vorgegeben werden. In der transienten Berechnung wurde ein Zeitzinkrement von 60 s über die simulierte Testdauer vorgegeben, um Vergleichswerte im Detailgrad der Messwerte zu erhalten. Die simulierten Testdauern der einzelnen TRT können Tab. 6.4 entnommen werden.

6.1.2 Ergebnisse

Exemplarisch ist in Abb. 6.4 der Temperaturverlauf für EWS 1 aus den Berechnungen mit OGS-6 nach 72 h dargestellt. Hierfür wurde das Modell vertikal durch die Sonde und senkrecht zur Strömungsrichtung des Grundwassers geschnitten. In Abb. 6.4b sind Temperaturfahnen zu erkennen, die sich durch die Grundwasserströmungen in den unterschiedlichen Erdschichten bilden. In Abb. 6.5 sind die Ergebnisse für die Rücklauftemperaturen aus den Berechnungen mit OGS-6 den Ergebnissen der Messung gegenübergestellt. Für die TRT am Testfeld des UFZ beziehen sich die mit * gekennzeichneten Kurven der OGS-6-Varianten auf den zweiten Berechnungsdurchlauf. Außerdem erfolgt dort ebenfalls eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen aus OGS-5. Für EWS 1 und EWS 2 liefern OGS-5 und OGS-6* vergleichbare Ergebnisse. Für EWS 3 liegen hingegen die Ergebnisse von OGS-6* näher an der Messung. Interessant ist, dass im Vergleich zur Messung die Schwankung der Rücklauftemperatur in der Simulation den gleichen Verlauf wie in der Messung hat, außer bei der Untersuchung von EWS Berlin. Zu erwarten wäre, dass auch dort der Verlauf dem der Messung gleicht. Vor allem unterscheiden sich die Verläufe der Rücklauftemperatur zwischen 20 h und 30 h, zwischen 40 h und 55 h und gegen Ende der Temperaturk-

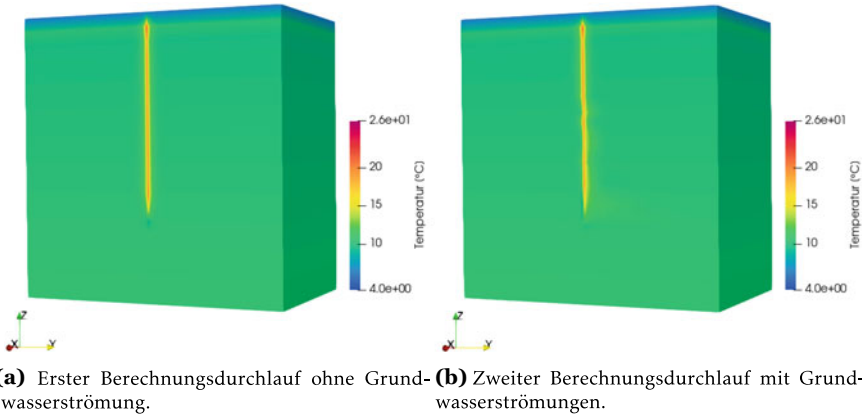
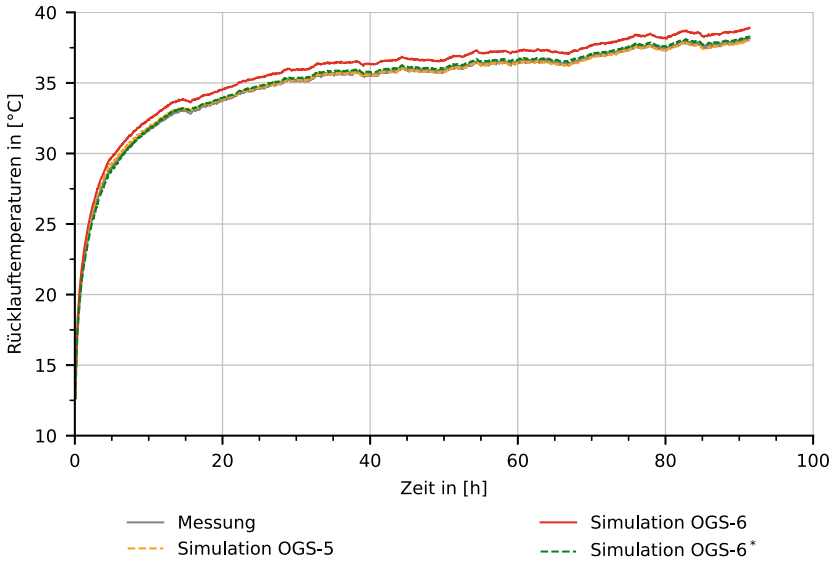
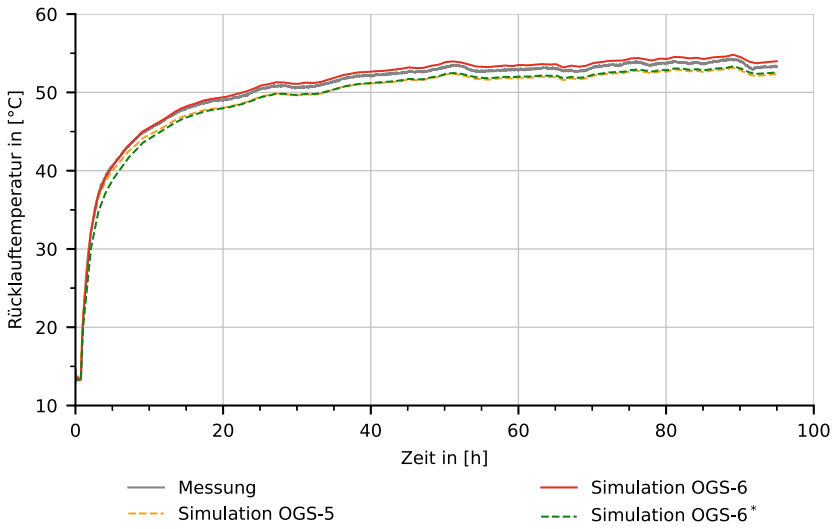


Abb. 6.4 Temperaturlausbreitung um die EWS aus der Berechnung mit OGS-6 nach 72 h am Beispiel der EWS 1

urve. Dort ist jeweils ein Anstieg der Rücklauftemperatur in der Messung zu sehen, der in der Simulation nicht in diesem Maß auftaucht. Da der Abstand zwischen diesen Bereichen ca. 24 h entspricht und die Messung Mitte Juni stattfand, besteht die Möglichkeit, dass die Messergebnisse durch Sonneneinstrahlung verfälscht wurden. Ein weiteres Indiz hierfür ist die in Abb. 6.6 dargestellte Heizleistung. Diese kann aus dem Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauftemperatur berechnet werden. In der Regel ist die eingebrachte Heizleistung über den TRT konstant, wie dies für EWS 1 bis EWS 3 der Fall ist (siehe Abb. 6.6). Die Abweichung zwischen Mess- und Simulationsergebnis, welche in den Temperaturkurven zu erkennen ist, ist ebenfalls in Tab. 6.5 dargestellt. Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Abweichung zwischen gemessener und simulierter Rücklauftemperatur. Für die Vergleichbarkeit sind jeweils Mittelwerte der Abweichungen für den Temperaturverlauf der ersten 91 h dargestellt, mit der Ausnahme von nur 70 h für die Betrachtung des TRT EWS Berlin. Die größte durchschnittliche Abweichung zwischen Simulation und Messung wurde in der OGS-6-Simulation der EWS 1 und der OGS-6*-Simulation von EWS 2 erreicht und lag bei 2,2 %. Die kleinste durchschnittliche Abweichung lag bei 0,05 % und wurde in der Berechnung mit OGS-6* an EWS 3 erreicht. Der Verlauf der Abweichungen ist für alle Simulationen unabhängig von der Sonde charakterisiert durch eine zu Beginn größere Abweichung. Die Abweichungen über den restlichen Verlauf der Simulation und deren Schwankung ist im Vergleich dazu geringer. Exemplarisch ist der Verlauf der Abweichungen in Abb. 6.7 zu EWS 1 für die Berechnung in OGS-5 und den zweiten Berechnungsdurchlauf in OGS-6 dargestellt. Bei den Abweichungen ist auffällig, dass von den Sonden am Testfeld des UFZ die Sonde EWS 2 in der finalen Variante OGS-6* des Simulationsmodells größere Abweichungen der Simulationsergebnisse zu den Messergebnissen zeigt. Dies spricht dafür, dass das Modell die reale Sonde und deren Standort weniger gut widerspiegelt. Da jedoch alle drei Sonden auf demselben Testfeld sind und die

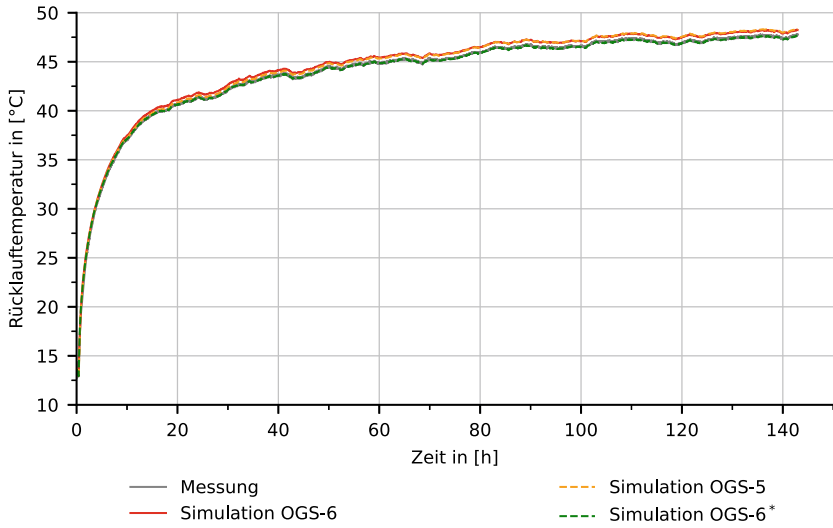


(a) Rücklauftemperaturen für EWS 1.

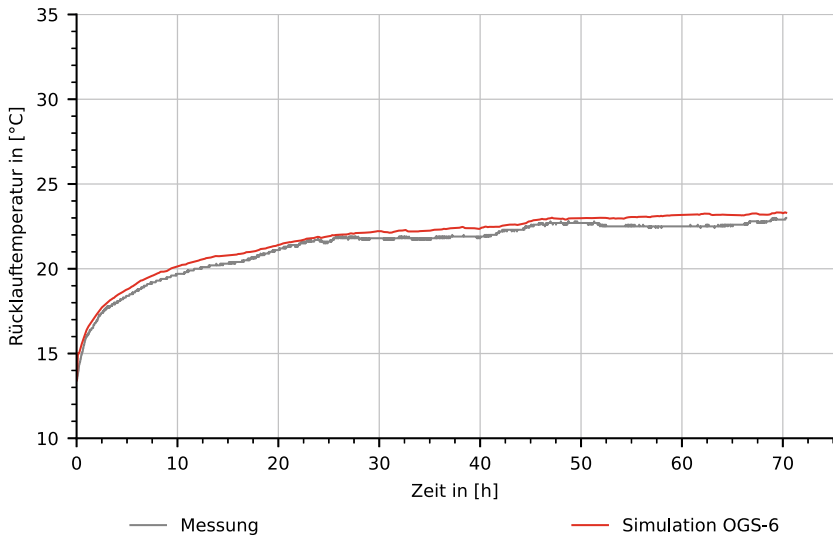


(b) Rücklauftemperaturen für EWS 2.

Abb. 6.5 Ergebnisse der gemessenen und der berechneten Rücklauftemperaturen für die vier TRT



(c) Rücklauftemperaturen für EWS 3.



(d) Rücklauftemperaturen für EWS Berlin.

Abb. 6.5 (Fortsetzung)

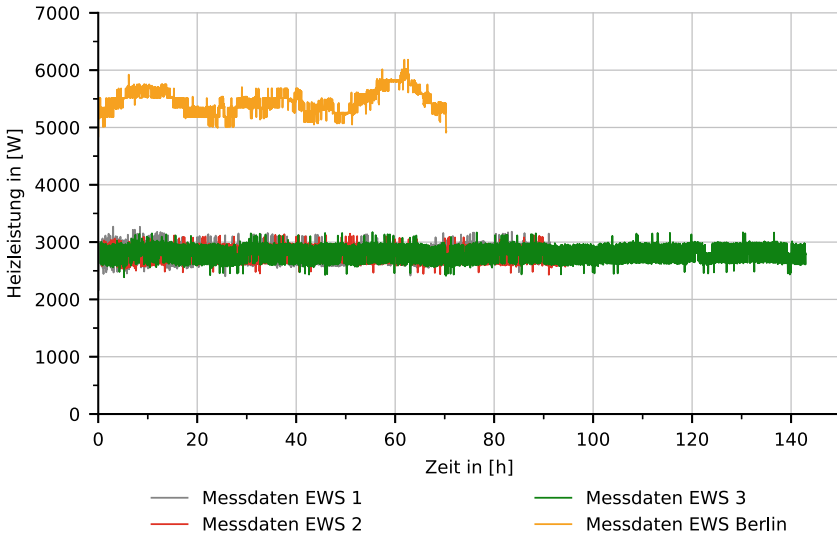


Abb. 6.6 Eingebraachte Heizleistung während der Messung für die TRT

Simulationsergebnisse von EWS 1 sowie auch EWS 3 für eine gute Repräsentation der Geologie durch das Simulationsmodell sprechen, besteht die Möglichkeit, dass die Abweichung nicht durch die geologische Modellierung begründet ist. Für Fehler in der Messung liegen ebenfalls keine Indizien vor. Daher wurden zwei Thesen untersucht. In der ersten Betrachtung wurde untersucht, ob möglicherweise eine fehlerhafte Verpressung die Ursache sein könnte. Hierfür wurde die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials im Simulationsmodell herabgesetzt auf $0,6 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$. In der zweiten Betrachtung wurde der ungewöhnlich große Bohrlochdurchmesser von 300 mm auf das in Deutschland gewöhnlich verwendete Maß von 152 mm geändert, um einen Dokumentationsfehler auszuschließen. Die Berechnung mit dem kleineren Bohrlochdurchmesser zeigte eine Verschlechterung der Ergebnisse, wodurch dies als Modellfehler ausgeschlossen werden konnte. Jedoch konnte mit der verringerten Wärmeleitfähigkeit eine mittlere Abweichung von $-0,11 \text{ K}$ und $-0,3 \%$ erreicht werden, welche im Bereich der Ergebnisse für EWS 1 und EWS 3 liegen. Die zugehörige Temperaturkurve für die Rücklauf­temperatur des Sondenfluides ist mit OGS-6** gekennzeichnet und in Abb. 6.8 dem Messergebnis gegenübergestellt.

6.1.3 Auswertung der Wärmeleitfähigkeit nach VDI 4640

Neben dem Vergleich der Ergebnisse auf Basis der Fluidtemperaturen in den Sonden werden hier mittlere Wärmeleitfähigkeiten entsprechend der Richtlinie VDI 4640 (2020) aus den Temperaturkurven betrachtet. Dabei wurde die Beschränkung auf eine Sonden­mindestlänge von 25 m vernachlässigt. Für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im Untergrund wird die sequenzielle Vorwärtsauswertung angewandt. Bei

Tab. 6.5 Mittelwerte der Abweichungen der berechneten zu den gemessenen Rücklauftemperaturen innerhalb der ersten 91 h der TRT

	EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS Berlin
OGS-5	0,1 %	-1,9 %	0,9 %	-
	0,01 K	-1,0 K	0,4 K	-
OGS-6	2,2 %	-0,5 %	0,7 %	2,0 %
	0,76 K	-0,2 K	0,3 K	0,42 K
OGS-6*	0,36 %	-2,2 %	0,05 %	-
	0,13 K	-1,05 K	0,001 K	-

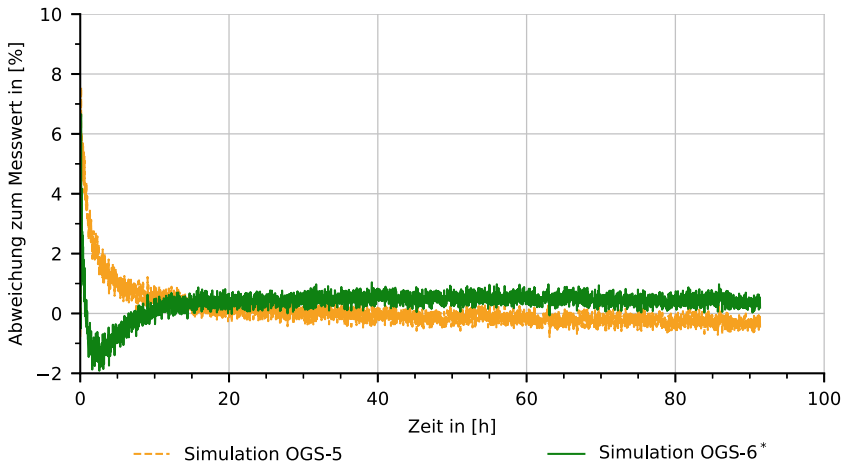


Abb. 6.7 Prozentuale Abweichung der Rücklauftemperatur für EWS 1 aus der Simulation mit OGS-5 und dem zweiten Berechnungsdurchlauf mit OGS-6 zur Messung

der sequenziellen Vorwärtsauswertung wird die Steigung der Regressionsgeraden für die Rücklauftemperatur betrachtet, welche über der logarithmischen Zeit aufgetragen ist. Exemplarisch ist die Rücklauftemperatur bei logarithmischer Zeitachse in Abb. 6.9 für EWS 1 dargestellt. Das Auswertintervall für die Bestimmung der Regressionssteigung beginnt bei der Startzeit und wird sequenziell vergrößert. Aus der ermittelten Steigung kann anschließend eine Wärmeleitfähigkeit abhängig vom Auswertintervall berechnet und eine Kurve gebildet werden. Der Wert der Wärmeleitfähigkeit wird an der Konvergenz dieser Kurve abgelesen. Die Kriterien für die Konvergenz nach VDI 4640 (2020) sind, dass die Änderung $\pm 5\%$ für einen Zeitraum von mindestens 20 h nicht überschreitet. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde für diese Auswertung eine Python-Software programmiert. Diese ermöglicht die automatisierte Auswertung von Messergebnissen aus TRT. In der Auswertung wird für eine vorgegebene Startzeit der Bereich ermittelt, welcher das definierte Konvergenzkriterium zuerst erfüllt.

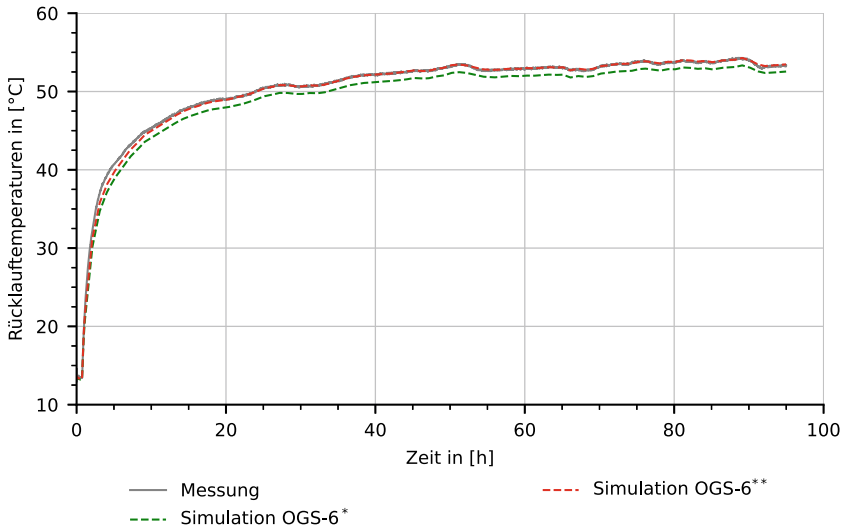


Abb. 6.8 Rücklauftemperaturen für EWS 2 aus Simulationsvarianten OGS-6* und OGS-6** (mit verringerter Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials) im Vergleich zu Messergebnissen

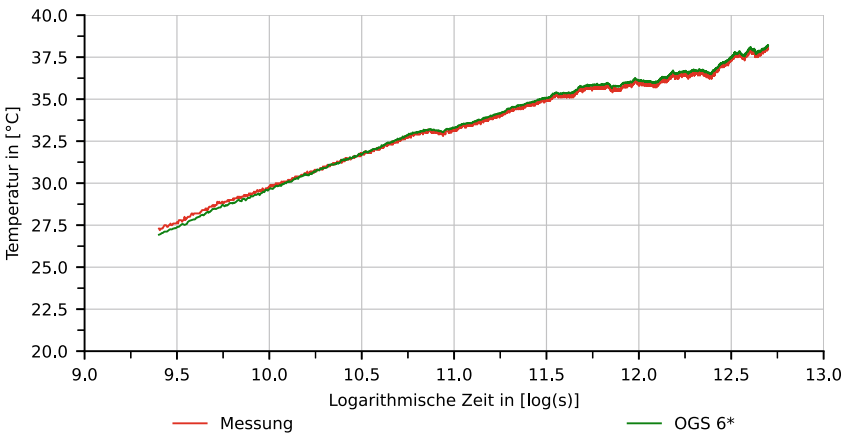


Abb. 6.9 Rücklauftemperaturen für EWS 1 bei logarithmischer Zeitachse

6.1.3.1 Ermittlung des Mindestzeitkriteriums und sequenzielle Rückwärtsauswertung

Für die Anwendung der sequenziellen Vorwärtsauswertung muss der Startpunkt der Auswertung (Mindestzeitkriterium) ermittelt werden. Hierfür gibt es zwei Wege. Prinzipiell soll das Mindestzeitkriterium aus einer sequenziellen Rückwärtsauswertung ermittelt werden. Dieses wird auch physikalisches Mindestzeitkriterium t_{phys} genannt. Bei der sequenziellen Rückwärtsauswertung wird ebenfalls eine Kurve für die Wärmeleitfähigkeit aus der Steigung der Regressionsgeraden der über der lo-

arithmischen Zeit aufgetragenen Rücklauftemperatur ermittelt. Abweichend zur Vorwärtsauswertung wird hier vom zeitlich gesehen letzten Ergebnis das Auswertintervall sequenziell bis $t = 0$ s vergrößert. Anhand der Konvergenz der Ergebnis­kurve werden das Mindestzeitkriterium und eine Wärmeleitfähigkeit bestimmt. In der [VDI 4640 \(2020\)](#) wird empfohlen, die Wärmeleitfähigkeit durch das Mindestzeitkriterium aus der Rückwärtsauswertung zu überprüfen. Ein weiterer Weg ist die Ermittlung als theoretisches Mindestzeitkriterium t_{theo} nach folgender Gleichung:

$$t_{theo} \geq \frac{5 r_b^2 c_{vs}}{\lambda_s}. \quad (6.1)$$

Für die Berechnung werden der Bohrlochradius r_b , die volumetrische Wärmekapazität c_{vs} und eine vorab angenommene Wärmeleitfähigkeit λ_s verwendet. Für die Auswertung der Wärmeleitfähigkeit sollen nach [VDI 4640 \(2020\)](#) das theoretische und das physikalische Mindestzeitkriterium erfüllt sein.

Abb. 6.10 zeigt die Ergebnisse der sequenziellen Rückwärtsauswertung für EWS 1. Bedingung für das Ablesen der Startzeit ist ebenfalls das zuvor genannte Konvergenzkriterium. Die Startzeit stellt den chronologisch ersten Zeitpunkt im Kurvenverlauf dar, zu dem das Konvergenzkriterium erfüllt ist. In Abb. 6.10 liegt dieser Zeitpunkt bei 9,17 h für die Kurve aus den Messergebnissen und bei 9,85 h bei der Kurve für die Simulationsergebnisse.

Neben der Bestimmung des Mindestzeitkriteriums mittels der Rückwärtsauswertung wurden hier ebenfalls die theoretischen Mindestzeitkriterien nach Gl. (6.1) betrachtet. Erfahrungen aus der Praxis zufolge liegt der Bohrlochdurchmesser in Deutschland gewöhnlich bei $d_{BHE} = 152$ mm. Bei den hier betrachteten Sonden EWS 1 bis EWS 3 beträgt dieser laut Dokumentation zwischen 300 mm und 320 mm. Dadurch ergibt sich ein höheres Mindestzeitkriterium als für gewöhnliche

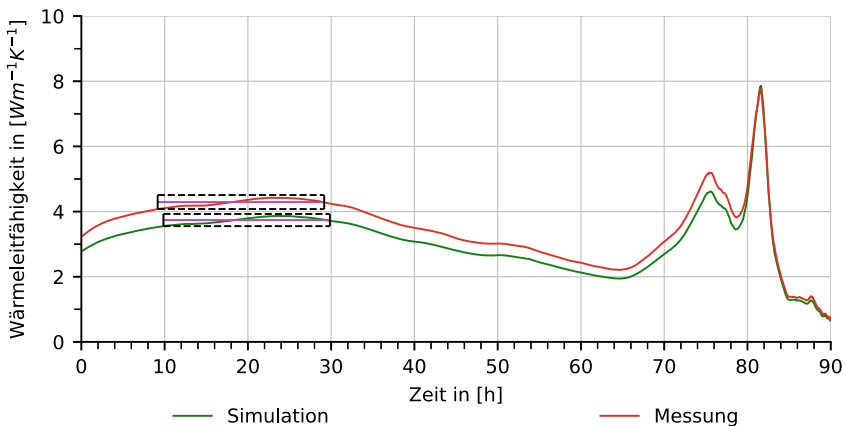


Abb. 6.10 Ergebnisse der Rückwärtsauswertung an EWS 1 nach [VDI 4640 \(2020\)](#) für gemessene und berechnete Rücklauf­temperaturen. Der gestrichelte Bereich kennzeichnet die Wärmeleitfähigkeit, für die die Kurve das Toleranzband von $\pm 5\%$ über eine Dauer von 20 h nicht verlässt und die Konvergenzbedingung erfüllt

Tab. 6.6 Startzeiten in [h] für die sequenzielle Vorwärtsauswertung nach VDI 4640 (2020)

	EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS Berlin
t_{phys} (Messwerte)	9,17	–	6,97	–
t_{phys} (Simulationswerte)	9,85	–	6,85	15,9
t_{theo} mit d_{BHE} laut Dokumentation	14,92	21,87	21,51	7,67
t_{theo} mit $d_{BHE} = 0,152\text{ m}$	3,37	5,62	4,85	7,67

Sonden. In der VDI 4640 (2020) ist nicht angegeben, ob die Gleichung für Durchmesser dieser Größe ebenfalls gültig ist. Daher wurde hier, neben dem theoretischen Mindestzeitkriterium mit dem vorliegenden Bohrlochdurchmesser, auch ein theoretisches Mindestzeitkriterium für $d_{BHE} = 152\text{ mm}$ betrachtet. Die entsprechend der Mindestzeitkriterien ermittelten Startzeitpunkte für die Vorwärtsauswertung können Tab. 6.6 entnommen werden.

6.1.3.2 Sequenzielle Vorwärtsauswertung

In der sequenziellen Vorwärtsauswertung wurden unterschiedliche Startzeitpunkte betrachtet. Exemplarisch ist in Abb. 6.11 die Vorwärtsauswertung für EWS 1, bei Verwendung des theoretischen Mindestzeitkriteriums unter Berücksichtigung eines Bohrlochdurchmessers von $d_{BHE} = 0,152\text{ m}$ dargestellt. Die Werte in Tab. 6.7 wurden von den Firmen, welche die Tests durchgeführt haben, für die Wärmeleitfähigkeiten ermittelt. In Tab. 6.8 sind die im Rahmen dieser Untersuchung ausgewerteten

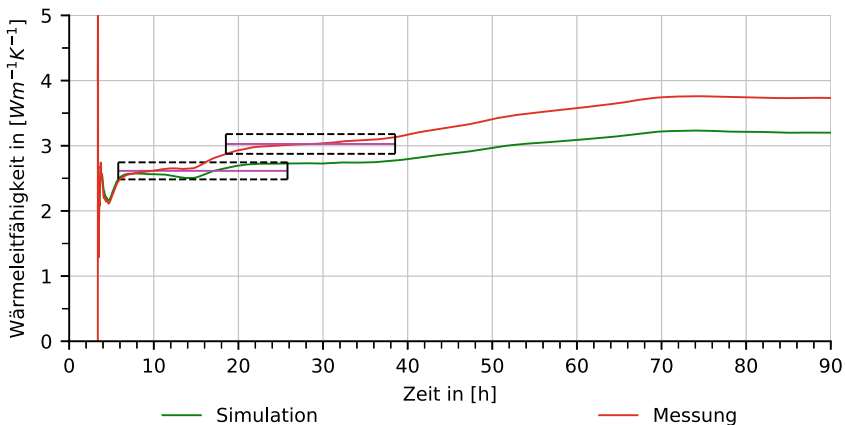


Abb. 6.11 Ergebnisse der Vorwärtsauswertung für EWS 1 nach VDI 4640 (2020) für gemessene und berechnete Rücklauftemperaturen mit theoretischem Mindestzeitkriterium nach angepasstem Bohrlochdurchmesser. Der gestrichelte Bereich kennzeichnet die Wärmeleitfähigkeit, für die die Kurve das Toleranzband von $\pm 5\%$ über eine Dauer von 20h nicht verlässt und die Konvergenzbedingung erfüllt

Tab. 6.7 Wärmeleitfähigkeit in $[W m^{-1} K^{-1}]$ nach Auswertung der TRT durchführenden Firma für die Messergebnisse

EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS Berlin
3,27	2,05	2,275	2,5

Tab. 6.8 Wärmeleitfähigkeit in $[W m^{-1} K^{-1}]$ aus sequenzieller Vorwärtsauswertung nach [VDI 4640 \(2020\)](#) für verschiedene Mindestzeitkriterien

		EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS Berlin
Rückwärtsauswertung	Messung	4,29	–	2,64	–
	Simulation	3,74	–	2,50	2,43
t_{phys}	Messung	4,11	–	2,24	–
	Simulation	3,12	–	2,06	2,20
t_{theo} mit d_{BHE} laut Dokumentation	Messung	4,44	3,34	2,48	2,48
	Simulation	3,85	3,50	2,30	2,04
t_{theo} mit $d_{BHE} = 0,152$ m	Messung	3,03	1,94	2,08	2,48
	Simulation	2,61	2,02	2,05	2,04

Wärmeleitfähigkeiten für alle vier Sonden zusammengefasst. Findet sich kein Wert in der Tabelle, so bedeutet dies, dass kein entsprechender Konvergenzbereich ermittelt werden konnte. Wie an den Ergebnissen zu sehen ist, wurden durch die Software sowohl für die Messung als auch für die Simulation andere Wärmeleitfähigkeiten ermittelt als durch die Firmen, welche die Tests durchgeführt haben. Lediglich für EWS Berlin wurde für die Messergebnisse rund der gleiche Wert berechnet. Untersuchungen zeigten, dass sich dies in der Wahl des Startzeitpunktes begründet. Daher wurde die Wärmeleitfähigkeit für die Untersuchungen abhängig vom Startzeitpunkt ausgewertet. Die Ergebnisse hierzu sind exemplarisch für EWS 1 in [Abb. 6.12](#) dargestellt. In der Grafik sind außerdem die Startzeiten nach theoretischem und nach physikalischem Mindestzeitkriterium aus der Rückwärtsauswertung gekennzeichnet. Da nach [VDI 4640 \(2020\)](#) für die Durchführung des TRT eine Mindestdauer von 48 h vorgeschrieben ist, ist zudem der Zeitpunkt gekennzeichnet, ab dem diese durch den Startzeitpunkt unterschritten wird. An der Grafik wird deutlich, dass die Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit insgesamt vom Startzeitpunkt abhängig sind, jedoch nicht bei jedem TRT in gleichem Maße. Zwischen dem Startpunkt nach theoretischem Mindestzeitkriterium bis zur Begrenzung durch die Mindestdauer schwankt die Wärmeleitfähigkeit wie in [Tab. 6.9](#) dargestellt. Dort wird ersichtlich, dass sich für die Auswertung von EWS Berlin die geringsten Schwankungen ergeben. Die größten Schwankungen sind bei EWS 1 vorzufinden.

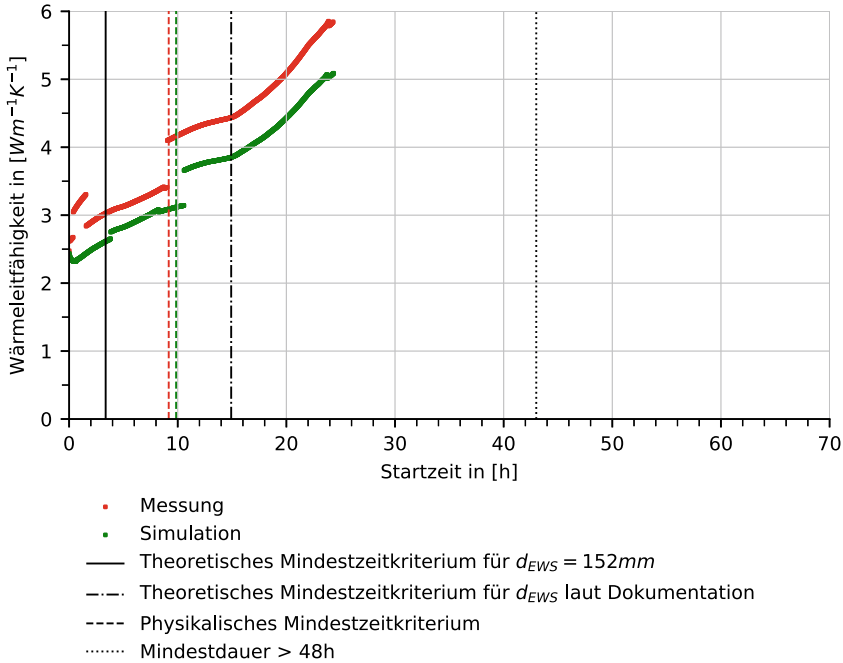


Abb. 6.12 Startzeitabhängige Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit für EWS 1

Tab. 6.9 Spannweite der Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit $\Delta\lambda_s$ in $[W m^{-1} K^{-1}]$ abhängig vom Startzeitpunkt zwischen theoretischem Mindestzeitkriterium und Mindestdauer des TRT

	EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS Berlin
Messung	2,81	2,32	0,95	0,18
Simulation	2,48	2,32	0,81	0,39

6.1.4 Diskussion

Im Rahmen des Benchmarks konnten vier TRT simulativ wiederholt werden. Gegenüber den Ergebnissen der älteren Programmversion OGS-5 konnten mit OGS-6 vergleichbare und bessere Ergebnisse erzielt werden. Beim Abgleich mit den Messergebnissen konnten die Modelle verbessert werden. Im schlechtesten Fall der vier untersuchten Sonden lag die mittlere Abweichung der Rücklauf­temperatur zwischen Simulation und Messung bei 2%. Zu den Schwankungen der Abweichung bei Beginn der Simulation (siehe Abb. 6.7) bemerkt Fenz (2017) in seiner Arbeit ungenaue Angaben für spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials der EWS als möglichen Grund. In Testrechnungen mit unterschiedlichen Parameterwerten für das Hinterfüllmaterial, welche hier nicht weiter ausgeführt wurden, konnten diese Parameter nicht als wesentliche Ursache für die anfänglich höhere

Abweichung identifiziert werden. Des Weiteren wurde jede Sonde in einem separaten Modell betrachtet. Gegenseitige Einflüsse der einzelnen Sonden untereinander wurden nicht berücksichtigt und können ebenfalls Ursache für Abweichungen sein. Vor dem Hintergrund, dass es sich bei den numerischen Simulationen immer um eine Näherung und keine exakte Widerspiegelung der Realität handelt, sind diese Abweichungen als gering zu bewerten.

Die Untersuchungen zur Auswertung der Wärmeleitfähigkeit durch die sequenzielle Vorwärtsauswertung haben gezeigt, dass das Ergebnis abhängig von der Wahl des Startpunktes ist. Demgegenüber steht, dass für die Ermittlung des Startpunktes, bei Verwendung des theoretischen Mindestzeitkriteriums nach Gl. (6.1), bereits im Voraus Werte für die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische volumetrische Wärmekapazität angenommen werden müssen, die letztlich wieder das Ergebnis beeinflussen. Da in der Simulation die hier betrachteten Modelle zu den TRT an EWS 1 bis EWS 3 bereits mit einer konstanten Wärmeleitfähigkeit erstellt wurden, ist der Vergleich zu den Ergebnissen der sequenziellen Vorwärtsauswertung hier auf den ersten Blick recht einfach. Bei den Wärmeleitfähigkeiten im Simulationsmodell handelt es sich um die Werte in Tab. 6.7. Im Vergleich zu den Werten in Tab. 6.8 wird ersichtlich, dass die Wärmeleitfähigkeit in ähnlichen Bereichen liegt, jedoch je nach Sonde und gewähltem Startzeitpunkt mehr oder weniger vom Zielwert abweicht. Teilweise kann eine Begründung für die Abweichung sicherlich in der vorhandenen Grundwasserströmung vermutet werden. Dagegen ist bei einer Grundwasserströmung ein größerer Wert für die Wärmeleitfähigkeit zu erwarten als der in der Realität vorhandene. Einige Werte aus den sequenziellen Auswertungen weichen jedoch auch nach unten vom Zielwert ab.

Prinzipiell gibt die VDI 4640 (2020) jedoch einige Bedingungen vor, die für die Auswertung der TRT nach diesem Verfahren erfüllt sein sollen und in den hier betrachteten TRT nur teilweise erfüllt sind. Daher sind die Ergebnisse zur Auswertung der Wärmeleitfähigkeit nur bedingt gültig. Zu den Bedingungen der VDI 4640 (2020) gehört eine Mindestlänge der Sonden von 25 m, welche für die Sonden EWS 1 bis EWS 3 um wenige Meter nicht erfüllt ist. Eine weitere Einschränkung für die Auswertung der Wärmeleitfähigkeit nach VDI 4640 (2020) gibt es bezüglich Grundwasserströmungen. Nach VDI 4640 (2020) ist die Auswertung nur bei überwiegend konduktivem Wärmetransport möglich. Bei zu großem konvektivem Anteil ergibt sich keine richtige Konvergenz. In allen hier betrachteten Fällen sind Grundwasserströmungen vorhanden und ein Einfluss dadurch ist daher nicht auszuschließen. Dennoch konnten in der Auswertung in den meisten Fällen entsprechende Bereiche gefunden werden, in denen die Konvergenzbedingung erfüllt ist. Außerdem soll nach VDI 4640 (2020) eine konstante Heizleistung während des TRT verwendet werden. Wie in Abschn. 6.1.2 erwähnt, ist dies für die Sonde EWS Berlin aufgrund der Sonneneinstrahlung nur bedingt erfüllt.

Klar ist, dass die Simulation eines TRT die Messung nicht ersetzen kann. Jedoch kann damit in gewisser Weise ein Modellabgleich mit der Realität erfolgen. Im Planungsprozess einer größeren Geothermieanlage erfolgt der TRT gewöhnlich an einer Pilotbohrung. Die Messergebnisse aus dem TRT werden anschließend bei der Planung der gesamten Geothermieanlage aus mehreren Sonden verwendet. Erfolgt

die Planung der Gesamtanlage aus mehreren Sonden mittels Simulationen, kann ein einfacher Abgleich des geologischen Modells mit Messdaten erfolgen, indem der TRT, wie hier, simulativ wiederholt wird.

6.2 Erdwärmesondenfeld in Berlin

Im Rahmen der Validierung von Daten von Demonstrationsstandorten wurden verschiedene Modelle untersucht, welche das Ziel hatten, einen systematischen Vergleich von OGS und FEFLOW vorzunehmen. Nachdem erste einfache Modelle gezeigt haben, dass die beiden Simulationsprogramme durchaus übereinstimmende Resultate liefern können, wurde ein möglichst komplexes Modell verwendet, um anhand verschiedener Kriterien FEFLOW und OGS zu vergleichen. Für diesen Zweck eignete sich ein Simulationsmodell einer öffentlichen Einrichtung in Berlin, für die bereits hoch aufgelöste Parameter und detaillierte Resultate aus FEFLOW vorhanden waren. Anhand der vorliegenden Daten wurde analog ein Modell für OGS aufgesetzt, mit identischen Parametern sowie Anfangs- und Randbedingungen modelliert und numerisch simuliert. Eine detaillierte Darstellung der Untersuchung erfolgt in [Randow et al. \(2022\)](#). Die zentralen Erkenntnisse des Papers sollen im Folgenden zusammengefasst werden.

6.2.1 Datengrundlage und Simulationsmodell

Das Modellgebiet hat eine Größe von ca. $1100\text{ m} \times 800\text{ m} \times 175\text{ m}$ und die Grenzen in Grundwasserflussrichtung stimmen mit bekannten Grundwassergleichen überein. Das in FEFLOW aufgesetzte Netz wurde in OGS importiert, sodass der Einfluss der räumlichen Vernetzung, die in über 3 Mio. Elemente diskretisiert ist, vernachlässigbar ist. Die Simulation startet mit einer beginnenden Heizperiode zum 1. September und verwendet ein Maximum von Fünf-Tages-Zeitschritten. Abhängig von den Ergebnissen einer Iteration ist die zeitliche Diskretisierung teilweise jedoch feiner angewendet worden. In verschiedenen Analysen soll der Einfluss des numerischen Parameters der Zeitschrittweite untersucht werden. Daher wird analog zum Modell das in FEFLOW verwendete Zeitschrittschema exportiert und identisch für die Simulation von OGS genutzt.

Mithilfe geologischer Voruntersuchungen konnte das numerische Modell der geothermischen Anlage umfassend aufgesetzt werden. Für die Bestimmung der verschiedenen Parameter, welche für das Modell berücksichtigt werden sollen, wurde u. a. ein TRT durchgeführt. So konnte beispielsweise die ungestörte Untergrundtemperatur von $11,6^\circ\text{C}$ ermittelt werden. Mithilfe der sequenziellen Vorwärtsauswertung (vgl. [VDI 4640 2020](#) bzw. Abschn. [6.1.3](#)) konnte außerdem die mittlere Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrunds zu $2,5\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ bestimmt werden, welche einen entscheidenden Einfluss für die Wärmeextraktion hat.

6.2.1.1 Modellparameter

Mit den Ergebnissen der geologischen Untersuchungen, einigen bekannten Parametern und einem groben Aufbau des Sondenfeldes wurde eine analytische Berechnung mit Earth Energy Designer (EED) durchgeführt. Auf Grundlage des Wärmebedarfs des Gebäudes sowie dem daraus resultierenden erdseitigen Energiebedarf konnte die notwendige Gesamtlänge des SONDENSYSTEMS von 1584 m ermittelt werden, was 16 Sonden zu je 99 m Länge entspricht. Die VDI 4640 (2020) empfiehlt bei Sondenfeldern einen Abstand von mindestens 6 m zwischen den einzelnen Bohrungen. Li et al. (2012) weisen darauf hin, dass diese Distanz allerdings entsprechend der Grundwassergeschwindigkeiten angepasst werden sollte. Außerdem verweisen sie auf eine reihenweise Anordnung der Sonden senkrecht zur Strömungsrichtung, welche in Abhängigkeit der bebauungsbedingten Möglichkeiten des Grundstücks umgesetzt wurde. Abb. 6.13 zeigt das numerische Modell und die Lage der Sonden im lokalen Koordinatensystem.

Der Gesamtbedarf an Wärme für das Gebäude $Q_{Building}$ wurde zu 126 MWh bestimmt. Da eine Wärmepumpe genutzt wird, um die geothermische Energie im Gebäude nutzbar zu machen, kann die erdseitig zu extrahierende Wärmemenge bestimmt werden durch (vgl. Hein et al. 2016)

$$Q_{BHE}^{heating} = Q_{Building} \left(1 - \frac{1}{COP} \right). \tag{6.2}$$

Der Leistungszahl der Wärmepumpe - eng. Coefficient of Performance (COP) wird mit $COP = 4,6$ in der Berechnung von EED berücksichtigt, sodass sich die erdseitige Wärmemenge zu $Q_{BHE}^{heating} = 98,6$ MWh ergibt. Die extrahierte Wärme richtet sich

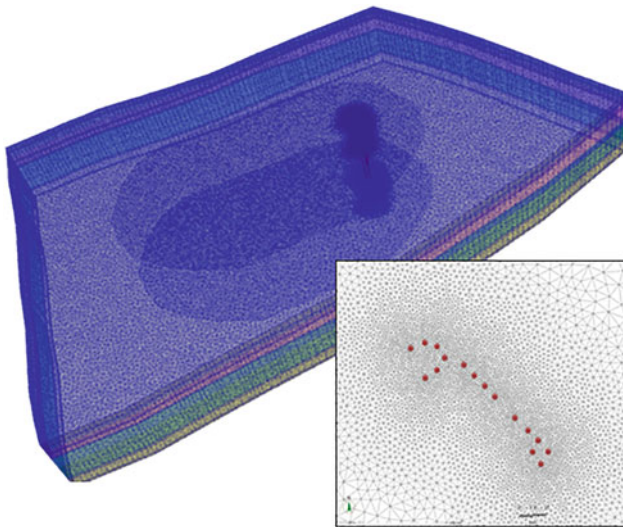


Abb. 6.13 Numerisches Modell und Lage der Sonden

nach dem jeweiligen Bedarf und ist monatlich in Abhängigkeit der relativen Heizbedarfe aufgelöst. Während im Winter die größten Wärmemengen benötigt werden, kann sich die Anlage im Sommer teilweise abschalten, sodass sich der geologische Untergrund thermisch regenerieren kann. Die Verteilung ist in Tab. 6.10 zu finden. Das erdgekoppelte Wärmepumpensystem teilt den erdseitigen Wärmebedarf in beiden Softwares gleichmäßig auf, sodass alle Sonden die jeweils gleiche Leistung erbringen. Für die Simulation wird weiterhin angenommen, dass das Rohrsystem verlustfrei arbeitet. Die durch die Wärmeextraktion aus dem Untergrund resultierende Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Sonden ergibt sich zu:

$$T_{out}(t) - T_{in}(t) = \frac{Q_{BHE}^{heating}(t)}{\rho_{rf} c_{rf} \dot{V}_{rf}} \tag{6.3}$$

Anhand von Gl. (6.3) und den Werten aus Tab. 6.10 und 6.11 kann beispielsweise für Januar (mit 31 Tagen) eine resultierende Temperaturdifferenz von $T_{out} - T_{in} = 0,950$ K ermittelt werden. Durch diesen Zusammenhang ergibt sich für jeden Monat eine Temperaturdifferenz, welche als Zielwert für die Genauigkeit der Simulation verwendet wird und die generierten Resultate von FEFLOW und OGS vergleichbar macht.

Durch die umfangreichen Vorbetrachtungen und -untersuchungen konnten zahlreiche Parameter sehr exakt in das Simulationsmodell integriert werden. Eine Übersicht findet sich in Tab. 6.11.

Tab. 6.10 Monatlicher erdseitiger Wärmebedarf

Monat	Relativer Wärmeanteil	Absoluter monatlicher Wärmebedarf des Sondenfelds [kWh]	Absoluter monatlicher Wärmebedarf je Sonde [kWh]	Temperaturdifferenz ($T_{out}(t) - T_{in}(t)$) pro Sonde nach Gl. (6.3) [K]
Jan	0,212	-20.900	-1306,25	0,950
Feb	0,167	-16.500	-1031,25	0,830
Mär	0,137	-13.500	-843,75	0,614
Apr	0,043	-4240	-265	0,199
Mai	0,016	-1580	-98,75	0,072
Jun	0,003	-300	-18,75	0,014
Jul	0	0	0	0
Aug	0	0	0	0
Sep	0,012	-1180	-73,75	0,055
Okt	0,082	-8090	-505,625	0,368
Nov	0,139	-1370	-856,25	0,643
Dez	0,189	-1860	-1162,5	0,845
Total	1	-98.600	-6162,5	

Tab. 6.11 Parameter im Simulationsmodell

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Sondentyp	—	2U	—
Sondenlänge	L_{BHE}	99	m
Bohrlochdurchmesser	d_{BHE}	0,16	m
Rohrabstand	x_p	0,07	m
Durchmesser der Sondenrohre	d_{po}	0,032	m
Wandstärke der Sondenrohre	t_p	0,003	m
Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre	λ_{gr}	0,42	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials	λ_p	2,0	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Ungestörte Untergrundtemperatur	T_s	11,6	$^{\circ}\text{C}$
Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds	λ_s	<i>tiefenaufgelöst</i>	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Vol. Wärmekapazität des Untergrunds	c_{vs}	<i>tiefenaufgelöst</i>	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$
Vol. Wärmekapazität des Kältemittels	$\rho_{rf} c_{rf}$	4,0	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$
Dichte des Kältemittels	ρ_{rf}	1052	kg m^{-3}
Wärmeleitfähigkeit des Kältemittels	λ_{rf}	0,48	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Dynamische Viskosität des Kältemittels	μ_{rf}	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
Durchflussrate je Sonde	\dot{V}_{BHE}	$4,63 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

6.2.1.2 Anfangs- und Randbedingungen

Zu Beginn der Simulation entsprechen die Temperatur des geologischen Untergrunds sowie die Fluidtemperaturen der im TRT ermittelten ungestörten Untergrundtemperatur von $11,6^{\circ}\text{C}$. Dieser Wert wird zudem als Dirichlet-Randbedingung für die Temperatur vom Anstrom des Grundwasserleiters genutzt. Allerdings haben Testsimulationen ergeben, dass für dieses Modell eine Randbedingung mit einer Oberflächentemperatur die Simulationsergebnisse vernachlässigbar beeinflussen würde, weshalb auf solche verzichtet wurde. Die terrestrische Wärmestromdichte am Standort von $0,042 \text{ W m}^{-2}$ wurde als Neumann-Randbedingung berücksichtigt.

6.2.2 Ergebnisse

Auf Grundlage der vorangegangenen geologischen Untersuchungen und der dadurch ermittelten Parameter des Untergrunds konnten zahlreiche Simulationen durchgeführt werden, um den Einfluss numerischer und physikalischer Parameter zu untersuchen. Weiterhin stand der Vergleich der beiden Simulationssoftware FEFLOW und OGS und deren Berechnungsmethoden im Mittelpunkt.

6.2.2.1 Temperaturentwicklung des Fluids

In Abb. 6.14 ist die Langzeitentwicklung der mittleren Fluidtemperatur der 16 EWS zu sehen. OGS nutzt für die Berechnung der Temperatur die Rücklauftemperatur

des aktuellen Zeitschritts (T_{out}^n), während FEFLOW aus Vereinfachungsgründen den Wert des vorherigen Zeitschritts (T_{out}^{n-1}) verwendet. Weiterhin wird in der Abb. eine OGS-Simulation mit Fünf-Tages-Zeitschritten und eine FEFLOW-Simulation mit Ein-Tages-Zeitschritten verglichen, da weitere Untersuchungen ergeben haben, dass diese Zeitschritte in beiden Softwares die besten Ergebnisse generieren (vgl. Abb. 6.14). In den ersten fünf Jahren ist der typische, vergleichsweise starke Temperaturabfall durch den Betrieb des Erdwärmesondenfeldes zu erkennen. Nach einigen Jahren stellt sich ein quasistatischer Zustand zwischen Extraktion im Winter und Regeneration im Sommer ein. Es ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse der beiden Programme zwar aufgrund der Berechnungsmethodik voneinander unterscheiden, allerdings lediglich in einem geringen Maß. Die Unterschiede in der Berechnung und in den Ergebnissen werden im Folgenden mit weiteren Analysen untersucht.

Nach 25 Jahren hat sich durch den Betrieb der EWS eine charakteristische Temperaturfahne ausgebildet. Wie in Abb. 6.15 zu sehen, befindet sich die größte Temperaturdifferenz im Vergleich zur uniformen Anfangstemperatur in der direkten Umgebung der Sonden. Mit größerer Entfernung nehmen die Auswirkungen ab, bis der Untergrund in einem bestimmten Abstand schließlich ohne Einfluss bleibt. Die Kontur der Temperaturfahne ist maßgeblich durch die herrschende Grundwasserströmung beeinflusst. In den Schichten mit einer größeren Darcy-Geschwindigkeit ist der konvektive Wärmetransport deutlich zu erkennen und die Fahne mit einer Temperatur von mindestens $11,2^\circ\text{C}$ erstreckt sich über 324 m. Die Grundwasserströmung sorgt durch den zusätzlichen Wärmetransport dafür, dass sich das Gebiet um die Sonden konstant regenerieren kann, was die Leistung des Systems verbessert. Die Isotherme mit einer Temperatur bis $11,0^\circ\text{C}$ hat eine deutlich kleinere Ausprägung und ragt nicht über die Grenzen des rot umrahmten zu betrachtenden Grundstücks

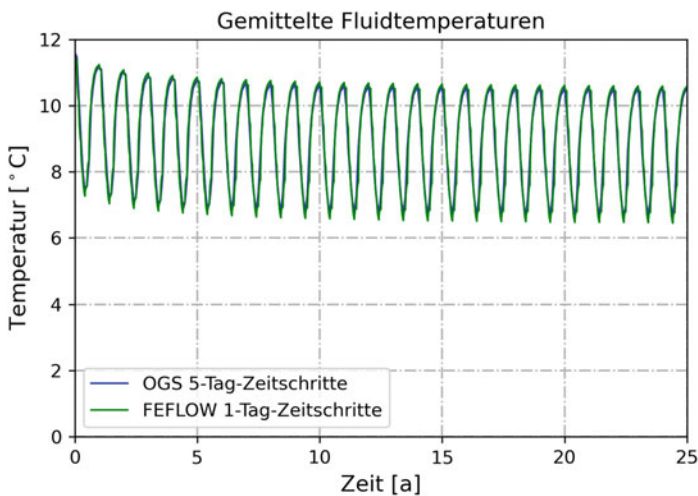


Abb. 6.14 Langzeit-Temperaturentwicklung der mittleren Fluidtemperatur über 25 Jahre in OGS und FEFLOW

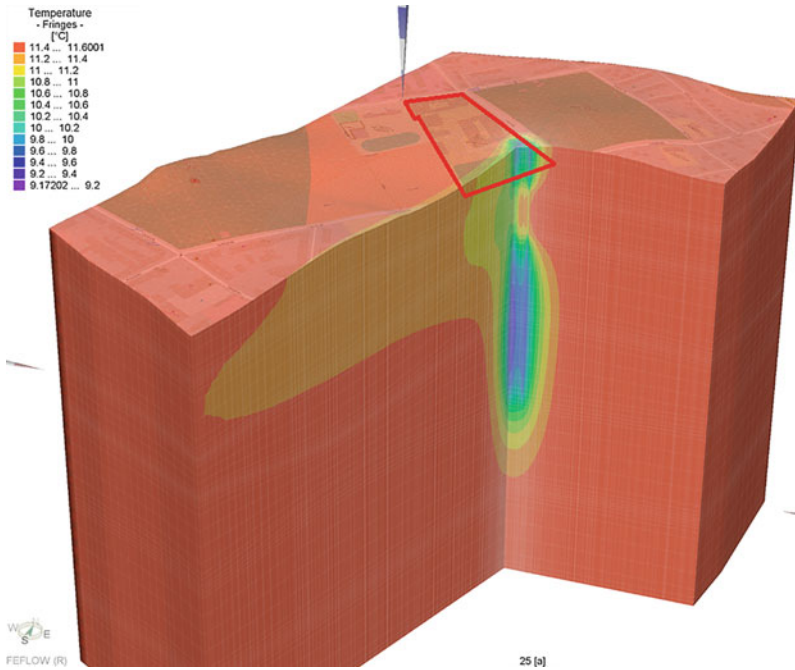


Abb. 6.15 Schnittansicht des 3D-Berlin-Modells mit Temperaturfahne nach 25 Jahren (simuliert mit FEFLOW Version 7.1)

(vgl. Abb. 6.15). Die Größe der Temperaturfahne spielt in einigen Bundesländern eine entscheidende Rolle beim Genehmigungsprozess, da die Temperaturdifferenz nach einer bestimmten Betriebsdauer definierte Werte nicht überschreiten darf. In diesem Fall konnte anhand der Simulation bewiesen werden, dass nach 25 Jahren die Differenz an den Grenzen des Grundstücks deutlich geringer als die behördlich geforderten 3 K ist. Eine Diskussion zu den regulatorischen Rahmenbedingungen des Genehmigungsprozesses von EWS folgt in Abschn. 6.2.3. Die minimale Temperatur im Untergrund nach 25 Jahren Betrieb der Anlage beträgt 9,17°C und liegt in direkter Nähe zu den Sonden in tieferen Schichten, wo der Wärmetransport vor allem konduktiv erfolgt. Oberhalb fördert der positive konvektive Einfluss des Grundwassers die Temperaturverteilung und im unteren Bereich kann die Sonde zusätzlich Wärme aus tieferen Schichten extrahieren.

Einfluss der Zeitschrittweiten

In FEFLOW wird die Rücklauf­temperatur des vorherigen Zeitschritts als Rand­bedingung für die Berechnung der aktuellen Temperaturen verwendet. OGS hingegen sucht nach einem passenden Wertepaar aus Vor- und Rücklauf­temperatur. Um das Verhalten von FEFLOW in OGS nachzubilden, wurde dort ein zweites Szenario erstellt, welches ebenfalls diese Annahme anwendet. Dadurch sind FEFLOW und OGS Szenario 2 eher sensitiv gegenüber einer größeren Zeitschritteinteilung, da hier generell ein Wert des vorherigen Zeitschritts für die Berechnung verwendet wird. Überdies löst FEFLOW das lineare Gleichungssystem nicht iterativ, sondern lediglich einmal, während bei OGS die Berechnung in beiden Szenarien so oft wiederholt wird, bis die Resultate in einem gewissen Toleranzband liegen. Die Sensitivität gegenüber den Zeitschrittweiten, die sich durch eine mehr oder weniger grobe zeitliche Diskretisierung in den drei Szenarien ergibt, ist in den Abb. 6.16, 6.17 und 6.18 deutlich zu erkennen. Da die Vor- und Rücklauf­temperatur durch den Wärmebedarf ohnehin in starker Abhängigkeit zueinander stehen, wurden hier lediglich die Rücklauf­temperaturen abgebildet, um die Ergebnisse der Simulationen zu vergleichen.

Abb. 6.16 Gemittelte Rücklauf­temperaturen der Sonden im ersten Betriebsjahr, simuliert mit OGS (mit T_{out}^n)

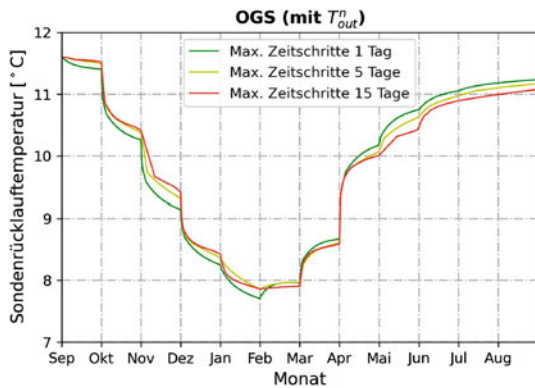


Abb. 6.17 Gemittelte Rücklauf­temperaturen der Sonden im ersten Betriebsjahr, simuliert mit OGS (mit T_{out}^{n-1})

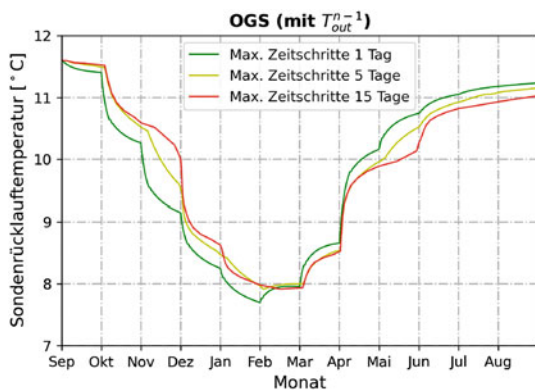
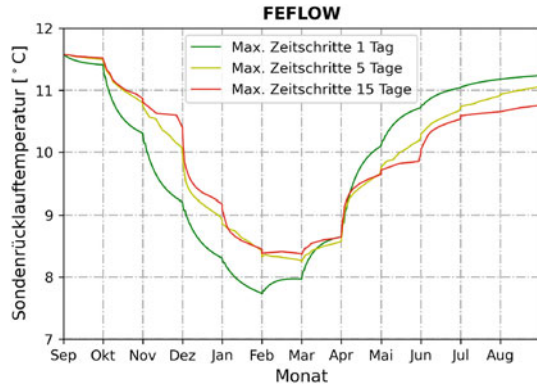


Abb. 6.18 Gemittelte Rücklauftemperaturen der Sonden im ersten Betriebsjahr, simuliert mit FEFLOW



Wird zunächst das (ursprüngliche) OGS-Szenario 1 in Abb. 6.16 betrachtet, zeigt sich ein sehr resistentes Verhalten gegenüber einer größeren zeitlichen Diskretisierung, die andererseits eine deutliche Verringerung der benötigten Simulationszeit mit sich bringt. Sogar mit 15-Tages-Zeitschritten können vergleichsweise gute Ergebnisse generiert werden, sodass die maximale Abweichung zwischen der feinsten und größten Einteilung der Zeitschritte lediglich 0,28 K beträgt. In Abb. 6.17 ist OGS-Szenario 2 abgebildet. Während die Kurve mit einer Ein-Tages-Diskretisierung sehr ähnlich zu Szenario 1 ist, weichen die Graphen der fünf- und vor allem der 15-Tages-Zeitschritte merklich davon ab. Die maximale Abweichung zwischen den drei Simulationen von Szenario 2 ergibt sich zu 0,87 K. Eine leichte Abhängigkeit von der zeitlichen Diskretisierung ist erkennbar. Noch deutlicher ist diese Sensitivität in den Ergebnissen von FEFLOW in Abb. 6.18 zu sehen. Hier hat neben der Annahme, die Rücklauftemperatur des letzten Zeitschritts zu verwenden, außerdem die nicht-iterative Methodik Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnung. Verglichen mit den anderen beiden Szenarien weichen die Ergebnisse hier am stärksten voneinander ab und das Maximum zwischen Ein- und 15-Tages-Zeitschritten erreicht 1,21 K. Dass die ursprüngliche Simulation mit FEFLOW Zeitschritte mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Tagen nutzt, lässt die Diskussion aufkommen, dass an dieser Stelle entweder kürzere oder längere Zeitschritte sinnvoll wären. Mit 15-Tages-Zeitschritten würde die Abweichung nicht sehr viel stärker steigen. Die Simulationsdauer würde allerdings sehr stark abnehmen. Andererseits würde eine Simulation mit Ein-Tages-Zeitschritten deutlich genauere Ergebnisse bergen. Nutzer von FEFLOW sollten demnach die zeitliche Diskretisierung in ihren Modellen je nach den Anforderungen an Zeit und Präzision abwägen.

6.2.3 Diskussion

In diesem Benchmark wurde eine Geothermieanlage mit 16 Sonden betrachtet, welche zum Heizen und Kühlen eines öffentlichen Gebäudes in Berlin verwendet wird. Um einen langjährigen Betrieb vorhersagen zu können, wurden zwei aussagekräftige

tige Modelle erstellt; eines mit der etablierten Software FEFLOW und eines mit der Open-Source-Lösung OGS, welche anhand der gleichen Parameter aufgebaut wurden.

Anhand der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass beide Simulationen einen sehr ähnlichen Langzeit-Temperaturverlauf haben. Die Grundwasserströmung sowie die Dispersion haben dabei den größten Einfluss auf den Wärmetransport. Ob und auf welche Art die Randbedingung der Oberflächentemperatur im Modell berücksichtigt wird, hat allerdings eine untergeordnete Relevanz. Vergleichbare Ergebnisse wurden bei der Gegenüberstellung der Software für OGS mit Fünf-Tages- und für FEFLOW mit Ein-Tages-Zeitschritten erreicht. Dies liegt an der Berechnungsmethode in FEFLOW, welche als Vereinfachung die Rücklauftemperatur des vorherigen Zeitschritts für die Berechnung der Temperaturen des aktuellen Zeitschritts verwendet und daher sensitiver auf eine gröbere zeitliche Diskretisierung reagiert. Nutzer müssen daher anhand der Zeitschritte die Genauigkeit der generierbaren Ergebnisse gegenüber der Berechnungsdauer abwägen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse des Benchmarks, dass trotz der Unterschiede in der Berechnungsmethodik zwischen den Softwares sowohl FEFLOW als auch OGS zufriedenstellende und vergleichbare Simulationsergebnisse für die Analyse von Langzeit-Wärmetransportprozessen produzieren können.

Anhand der generierten Ergebnisse können verschiedene Diskussionspunkte behandelt werden. Zum einen können die Unterschiede in den verwendeten Softwares, deren Berechnungsmethodik und die Diskrepanz zwischen Simulationszeit und Ergebnisgenauigkeit thematisiert werden. Andererseits sollen an dieser Stelle die regulatorischen Rahmenbedingungen über die Installation von EWS diskutiert werden. In Deutschland unterliegen die Gesetze diesbezüglich den einzelnen Bundesländern, welche unterschiedliche Vorgaben und Auflagen besitzen. Konkret soll der hier verwendete Standort in Berlin vor dem Hintergrund der aktuellen Gesetzgebung diskutiert werden.

In diesem Benchmark wurden zwei numerische Softwares verglichen, welche für die Simulation von Stoff- und Wärmetransport im geologischen Untergrund unter Berücksichtigung von Grundwasserströmung genutzt werden. FEFLOW ist in diesem Gebiet ein etabliertes, kommerzielles Tool. Verschiedene Analysen in der Arbeit deuten allerdings darauf hin, dass mit der Open-Source-Software OGS mindestens gleich gute Ergebnisse erzielt werden. Beispielsweise wurden in der Langzeitsimulation über 25 Jahren die Ergebnisse von OGS mit Fünf-Tages-Zeitschritten gegen die Resultate von FEFLOW mit Ein-Tages-Zeitschritten verglichen, weil hier eine gröbere zeitliche Diskretisierung keine vergleichbaren Ergebnisse hätte generieren können. Je nach Anwendung können allerdings beide Programme zufriedenstellende und aussagekräftige Resultate liefern.

Bei genauerer Betrachtung der Berechnungsmethoden zeigen sich einige Unterschiede zwischen FEFLOW und OGS. Der Einflussreichste ist dabei die nicht-iterative Lösung des Gleichungssystems für jeden Zeitschritt. Darüber hinaus wird für dessen Lösung die Rücklauftemperatur des vorherigen Zeitschritts verwendet, was aber einen vergleichsweise geringeren Einfluss auf die Genauigkeit hat. Beide Maßnahmen führen allerdings zu deutlich geringeren Simulationszeiten im Vergleich

zu OGS. Daher kann die verminderte Präzision hingenommen werden, da numerische Simulationen ohnehin immer eine Abwägung zwischen Dauer und Genauigkeit der Simulation sind, welche vom Nutzer anhand der numerischen Parameter je nach Anwendungsfall angepasst werden müssen.

Abgesehen von der Präzision bietet FEFLOW derzeit einen deutlichen Vorteil in Hinsicht auf die Berechnungsdauer. Für eine Simulation mit Fünf-Tages-Zeitschritten werden hier 114 h benötigt, während für die OGS-Simulation mit gleichen numerischen Parametern 244 h für eine Betriebsdauer von 25 Jahren aufgebracht werden müssen. OGS wird derzeit allerdings weiterentwickelt, um die Simulationsdauer deutlich zu verringern.

Im Bundesberggesetz wird Geothermie als bergfreier Bodenschatz definiert (§ 3 BBergG 1982), was bedeutet, dass es auf privatem Grund genutzt werden darf. Generell bildet die Grundlage für den Genehmigungsprozess das Wasserrecht, da bei der Installation von Geothermieanlagen das Grundwasser einen besonderen Schutz genießt. Für Geothermieanlagen mit einer Leistung über 30 kW wie in diesem Benchmark in Berlin müssen unter Umständen noch weitere Regularien herangezogen werden. Welche Gesetze gelten, ist abhängig von den Temperaturänderungen an den Grundstücksgrenzen nach einer bestimmten Zeitspanne infolge der geothermischen Nutzung. Übersteigt die Temperaturdifferenz an einem benachbarten Grundstück einen festgelegten Wert, wechselt die Gesetzgebung vom Wasserrecht zum Bergrecht und für den betroffenen Bereich muss eine Genehmigung zum „Abbau“ der geothermischen Energie beantragt werden. Aus diesem Grund wird die Temperaturentwicklung im Untergrund zuvor mit numerischen Simulationen analysiert. Daher ist es wichtig, dass diese Vorhersage möglichst genau mit einer guten Datengrundlage durchgeführt wird. Aufgrund des Föderalismus in Deutschland gibt es allerdings keine einheitliche Rechtsprechung für den Genehmigungsprozess von Erdwärmeanlagen und die Rahmenbedingungen unterscheiden sich in den Bundesländern teilweise deutlich.

Dieser Benchmark bezieht sich auf ein reales Projekt in Berlin. Im deutschen Vergleich gelten hier vergleichsweise weniger restriktive Gesetze. Nach einer Betriebsdauer von 25 Jahren liegt die zulässige Temperaturänderung an der Grenze zu Nachbargrundstücken bei 3 K. Wie in Abb. 6.15 zu sehen, liegt die Untergrundtemperatur an den Grenzen bei ca. 11,2 °C und damit deutlich im zugelassenen Bereich. Weiterhin liegt die minimale Temperatur im gesamten Modell bei 9,17 °C, was in direkter Umgebung um die Sonden ist, sodass die Grenzen mit großer Toleranz eingehalten werden können. Allerdings würde die gleiche Anlage in Hessen unter das Bergrecht fallen. Der Grund dafür sind die dort geltenden, deutlich verschärften Genehmigungsgrundlagen. Nach einer Betriebsdauer von 50 Jahren darf hier keine Temperaturänderung an den Grundstücksgrenzen erfolgt sein, um nicht unter das Bergrecht zu fallen. Dieser Zielwert birgt das Problem, dass somit so gut wie jede Geothermieanlage mit mehr als 30 kW unter das Bergrecht fällt, da Schwankungen beispielsweise auch durch die Ungenauigkeit der Messgeräte aufgenommen werden könnten.

Die Komplexität des Genehmigungsprozesses für die Installation von EWS zum Heizen und Kühlen in Deutschland variiert mitunter stark. Obwohl alle Bundesländer sich auf das Bundesberggesetz als Grundlage beziehen, resultiert ihre abweichende Interpretation in regional unterschiedlichen Gesetzgebungen. Die in diesem Benchmark betrachtete Geothermieanlage wird in Berlin mit dem Wasserrecht behandelt, während in Hessen das deutlich striktere Bergrecht gelten würde. Im Sinne der beabsichtigten Wärmewende in Deutschland sollte es das Ziel sein, eine einheitliche Gesetzgebung zum Installationsprozess von EWS in ganz Deutschland zu erreichen.

6.3 Dispersivitätsparameter in OpenGeoSys

Zur Simulation des Stofftransportes in Grundwasserleitern gibt es in OGS neben der Darcy-Geschwindigkeit die Dispersivitätsparameter. Diese dienen zur Beschreibung der hydrodynamischen Dispersion im Grundwasserleiter. In der Literatur sind einige Abhandlungen über dieses Phänomen und die Schwierigkeit, angemessene Werte zu definieren, zu finden (Gillbricht und Radmann 2017; Molina-Giraldo et al. 2011; Wagner et al. 2012). Nach Wagner et al. (2012) darf die Dispersion bei einer detaillierten Betrachtung der Temperaturentbreitung in Simulationen zur oberflächennahen Geothermie nicht vernachlässigt werden. Für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen im Rahmen des EASyQuart-Projektes (siehe auch Kap. 4), wurde dieser Benchmark erstellt, um einen Eindruck vom Einfluss dieses Parameters zu gewinnen. Hierfür wurden verschiedene Dispersivitätswerte, unter ansonsten identischen Modellbedingungen, simuliert. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich des Einflusses auf die Temperaturentbreitung um eine EWS und auf deren Rücklauftemperatur betrachtet. In Abschn. 6.3.1 wird auf die Grundlagen zur hydrodynamischen Dispersion eingegangen. Abschn. 6.3.2 beinhaltet eine kurze Beschreibung des Modells. Abschließend werden in Abschn. 6.3.3 und 6.3.4 die Ergebnisse betrachtet und diskutiert.

6.3.1 Grundlegendes zur hydrodynamischen Dispersion

Dispersion ist ein Parameter, der in der Simulation verschiedene Phänomene des Stofftransportes in Grundwasserleitern zusammenfasst. Dazu zählen zum Beispiel die Diffusion und die Heterogenität des geologischen Untergrundes (Gillbricht und Radmann 2017). Bei der Dispersion handelt es sich des Weiteren um eine skalierende Größe, deren Wert mit zunehmender Ausbreitung des betrachteten Stofftransportes zunimmt (Himmel und Schäfer 2010). In OGS wird sie durch einen Wert für die longitudinale Dispersivität α_L in Strömungsrichtung und einen Wert für die transversale Dispersivität α_T quer zur Strömungsrichtung charakterisiert. Diese Dispersivitätsparameter werden auch als Vermischungslängen bezeichnet (Himmel und Schäfer 2010). Aus den Dispersivitätswerten und der Darcy-Geschwindigkeit werden die

Dispersionskoeffizienten D_L und D_T bestimmt (Kobus et al. 1992):

$$D_L = v_f \cdot \alpha_L, \quad (6.4)$$

$$D_T = v_f \cdot \alpha_T. \quad (6.5)$$

Oft wird folgende Beziehung angenommen (Molina-Giraldo et al. 2011):

$$\alpha_T = 0, 1 \cdot \alpha_L. \quad (6.6)$$

Wagner et al. (2012) schreiben jedoch, dass nach ihrem Vergleich von Messungen aus einem Modellversuch mit numerischen Simulationen diese Annahme nicht immer korrekt ist. Ebenso bemerken Gillbricht und Radmann (2017), dass es sich dabei um keinen begründeten Zusammenhang handelt. Aufgrund der unterschiedlichen Ursachen ist das Verhältnis zwischen der longitudinalen und der transversalen Dispersivität abhängig von den Bedingungen am Standort. Dennoch ist in der Regel die transversale Dispersion beträchtlich kleiner als die longitudinale (Keim und Lang 2008). Soweit keine Werte bekannt sind, schlagen Keim und Lang (2008) ein Verhältnis 1:5 bis 1:10 vor, ähnlich wie Gl. (6.6). Allgemein kann die transversale Dispersion in vertikaler Richtung für gewöhnlich vernachlässigt werden. Sie beruht im Wesentlichen auf Diffusionsprozessen, deren Einfluss gering ist. Die horizontale transversale Dispersion ist vor allem eine Folge der Instationarität durch Änderungen der Fließrichtung der Grundwasserströmung, welche u. a. jahreszeitlich bedingt ist. Daraus folgt nach Gillbricht und Radmann (2017), dass Gl. (6.5) unbegründet ist, da der direkte Zusammenhang mit der Darcy-Geschwindigkeit sich in der Heterogenität des Grundwasserleiters begründet. Bei der longitudinalen Dispersion ist hingegen die Heterogenität des Grundwasserleiters der tragende Mechanismus (Gillbricht und Radmann 2017). Aufgrund der Heterogenität durch z. B. Sand- oder Kieslinsen und der damit einhergehenden Variation der hydraulischen Leitfähigkeit entwickeln sich Geschwindigkeitsunterschiede (Himmel und Schäfer 2010). Eine vergleichsweise schwache Rolle spielen die Diffusion und die korngerüstbedingte Dispersion für die longitudinale Dispersion.

In die Berechnungen im Rahmen der Simulation mit OGS gehen die Dispersivitäten durch den Tensor der thermischen und hydrodynamischen Dispersion Λ ein, welcher nach Gl. (6.7) bestimmt wird (Diersch et al. 2011b):

$$\Lambda = [\varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s] \mathbf{I} + \rho_f c_f \left[\alpha_T \|\mathbf{v}_f\| \mathbf{I} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{\mathbf{v}_f \otimes \mathbf{v}_f}{\|\mathbf{v}_f\|} \right], \quad (6.7)$$

mit:

- ε Porosität,
- ρ_f Dichte des Grundwassers,
- c_f spezifische Wärmekapazität des Grundwassers,
- λ_f Wärmeleitfähigkeit des Grundwassers,
- λ_s Wärmeleitfähigkeit des Gesteins,
- \mathbf{v}_f Vektor der Darcy-Geschwindigkeit,
- \mathbf{I} Einheitsmatrix.

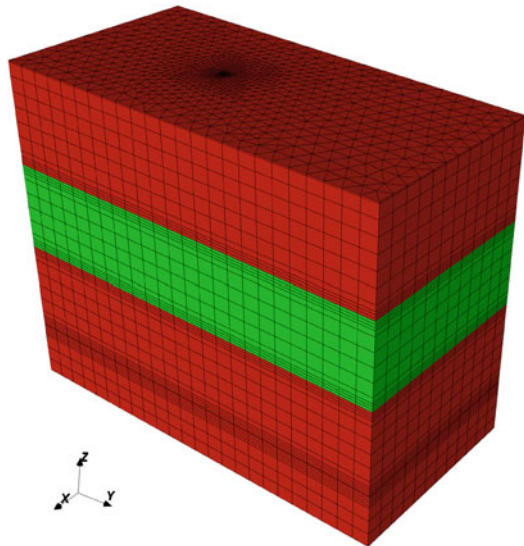
Der vordere Teil der Gleichung beinhaltet die Wärmeleitfähigkeit der festen und flüssigen Bestandteile des porösen Mediums und berücksichtigt damit die Wärmeausbreitung durch Wärmeleitung. Der zweite Teil des Tensors im hinteren Teil der Gleichung bezieht sich auf die hydrodynamische Dispersion im Grundwasserleiter. Der Anteil der Dispersion in Strömungsrichtung wird durch die longitudinale Dispersivität bestimmt. Der transversale Anteil hingegen wirkt in den beiden Koordinatenrichtungen quer zur Strömungsrichtung.

Die Schwierigkeit, die Dispersion in Simulationen einzubeziehen, liegt in der Definition angemessener Werte. Bereits 1970 wurden von [Lenda und Zuber \(1970\)](#) Werte abhängig von der Gesteinsart veröffentlicht. In einer Untersuchung von [Keim und Lang \(2008\)](#) werden Werte abhängig von der Länge des betrachteten Bereiches angegeben. [Gillbricht und Radmann \(2017\)](#) schreiben, dass sinnvolle Werte jedoch nur durch Kalibrierung eines Modells mit Messwerten oder durch bereits bekannte Werte eines ähnlich aufgebauten Grundwasserleiters erlangt werden können. Sie beschreiben die Dispersivität auch als Anpassungsparameter in der Modellierung ([Gillbricht und Radmann 2017](#)).

6.3.2 OGS-Modell

Für die Untersuchung wurde ein vereinfachtes FE-Modell verwendet. Im Modellbereich herrscht eine horizontale Grundwasserströmung in einer Tiefe von 35 m bis 65 m unter Geländeoberkante (GOK). Das Modell ist quaderförmig aufgebaut, mit einer Ausprägung in Richtung der Grundwasserströmung, wie in [Abb. 6.19](#) dargestellt. Der Modellbereich umfasst eine Breite von 70 m, eine Länge von 140 m und

Abb. 6.19 OGS-Modell für die Untersuchung der Dispersivitätsparameter mit einem vom Grundwasser durchströmten Bereich (Grün)



hat eine Tiefe von 115 m. Die Sondenlänge liegt bei 95 m. In horizontaler Richtung beträgt die maximale Elementkantenlänge 6 m und in vertikaler Richtung 5 m. Im Bereich um die Sonde, die Sondenspitze und die Übergänge in den vom Grundwasser durchströmten Bereich wurde hingegen feiner vernetzt. Im Modell herrscht zum Beginn der Simulation eine konstante Untergrundtemperatur von 11 °C. Es wurde ein Jahr mit einer konstanten Entzugsleistung von -2375 W simuliert. Weitere Eckdaten der Modellierung können Tab. 6.12 entnommen werden.

Um die Auswirkungen der Dispersion zu betrachten, wurden sechs verschiedene Dispersivitätswerte zwischen $\alpha_L = 0$ m und $\alpha_L = 5$ m simuliert und der Einfluss auf die Temperaturfahne und die Rücklaufemperatur einer Doppel-U-Sonde betrachtet. Dabei wurde zu Versuchszwecken das Verhältnis aus Gl. (6.6) für die transversale Dispersivität angewendet. Die Wertekonstellationen sind in Tab. 6.13 dargestellt. Außerhalb des vom Grundwasser durchströmten Bereiches, sind die Dispersivitäten $\alpha_L = \alpha_T = 0$ m. Aufgrund der festen Beziehung wird auf die Nennung beider Dispersivitätswerte im Folgenden verzichtet und nur noch der Wert für α_L erwähnt.

Tab. 6.12 Eckdaten des OGS-Simulationsmodells

Parameter	Einheit	Wert
<i>Spezifikationen der Erdwärmesonde</i>		
Bohrlochdurchmesser	m	0,152
Außendurchmesser Sondenrohr	m	0,032
Entzugsleistung	W	-2375
Durchflussraten	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$
<i>Geologischer Untergrund</i>		
Spezifische volumetrische Wärmekapazität	$\text{MJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1,7
Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	2,5
Porosität	–	12,5 %
Darcy-Geschwindigkeit*	ms^{-1}	$1,5 \cdot 10^{-7}$

*Nur im vom Grundwasser durchströmten Bereich

Tab. 6.13 Konstellation der Dispersivitätswerte für die Untersuchung

	α_L	α_T
1.	0 m	0 m
2.	0,1 m	0,01 m
3.	0,5 m	0,05 m
4.	1 m	0,1 m
5.	2,5 m	0,25 m
6.	5 m	0,5 m

6.3.3 Ergebnisse

Abb. 6.20 zeigt den Einfluss auf die Rücklauftemperatur in der EWS. In der Grafik wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der Dispersivitätswerte einen stetigen Anstieg der Fluidtemperatur zur Folge hat.

Abb. 6.21 zeigt den Einfluss auf den Verlauf der Rücklauftemperatur zum Zeitpunkt von einem Jahr Simulation. Die Temperaturdifferenz zwischen der Simulation mit $\alpha_L = 0$ m und $\alpha_L = 5$ m beträgt nach einem Jahr $\Delta T = 1,93$ K in der Rücklauftemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit.

Um die Auswirkung auf die Temperaturfahne zu betrachten, wurde der Abstand von der Sonde bis zur Ausdehnung der Temperaturänderung in und entgegen der Strömungsrichtung gemessen. Exemplarisch sind die Temperaturfahnen der Simulation mit $\alpha_L = 0$ m und $\alpha_L = 5$ m in Abb. 6.22 dargestellt. Dabei zeigen die Abb. 6.22a und c auf der linken Seite einen vertikalen Schnitt durch die Sonde, senkrecht zur Strömungsrichtung des Grundwassers im Modell und die Abb. 6.22b und d auf der rechten Seite eine zweidimensionale Fläche eines horizontalen Schnittes bei 50 m unter der GOK. In den Darstellungen sind isotherme Flächen bzw. isotherme Linien im Modell für die Temperaturen nach einem Jahr Simulation abgebildet. Die Flächen zeigen den Temperaturbereich von 10 °C bis 10,9999 °C in zehn gleichen Schritten. Die äußerste Fläche zeigt eine Temperatursenkung um 10^{-4} K der Anfangstemperatur von 11 °C. Um die Ausmaße der Temperatureausbreitung vergleichen zu können, wird dies hier als Grenze der Ausbreitung betrachtet. Auch die Temperatureausbreitung quer zur Strömungsrichtung nimmt durch die Erhöhung der Dispersivitätswerte

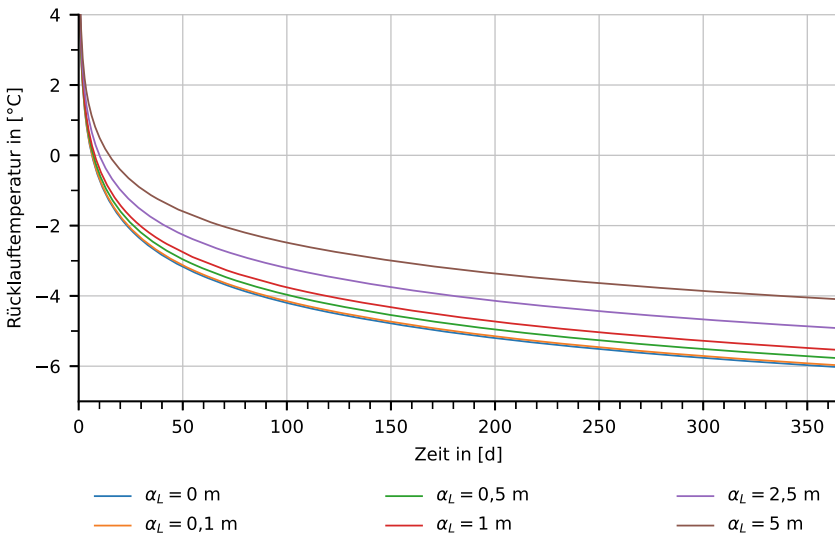


Abb. 6.20 Einfluss verschiedener Dispersivitätswerte auf den Verlauf der Rücklauftemperatur aus der EWS

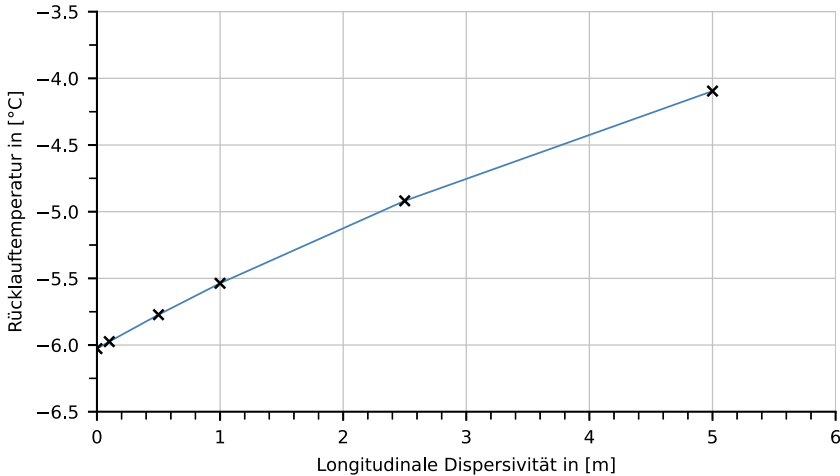


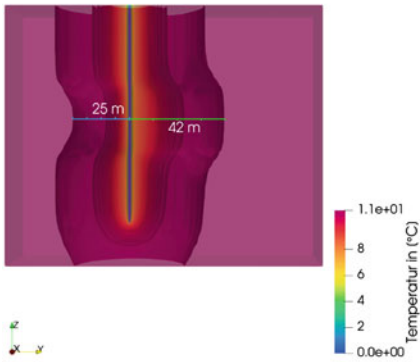
Abb. 6.21 Einfluss verschiedener Dispersivitätswerte auf die Rücklauftemperatur aus der EWS nach einem Jahr

zu. Da die gesamte Änderung der Ausbreitung kleiner als die Elementkantenlänge ist, wurde dort auf eine detaillierte Auswertung verzichtet.

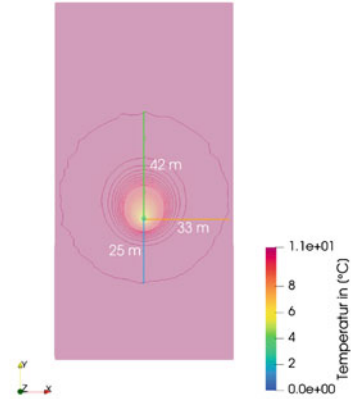
Eine zusammenfassende Darstellung des Zusammenhangs zwischen Dispersivität und Ausbreitung der Temperaturfahne in Strömungsrichtung ist in Tab. 6.14 und Abb. 6.23 dargestellt. An den Ergebnissen wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der Dispersivität zu einer stetigen Vergrößerung der Temperaturfahne in und gegen die Strömungsrichtung zur Folge hat. Dabei ist der Einfluss in und gegen die Strömungsrichtung identisch.

6.3.4 Diskussion und Fazit

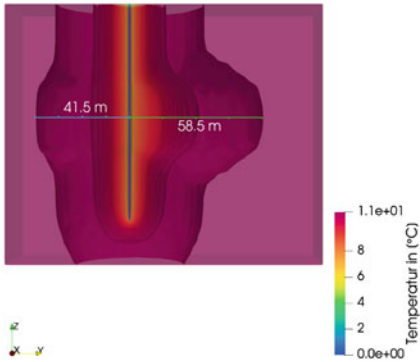
In diesem Benchmark konnte ein Eindruck vom Einfluss der Dispersivitätsparameter gewonnen werden. Es wurden sechs Varianten von Dispersivitätswerten simuliert und hinsichtlich des Einflusses auf die Temperaturausbreitung um eine EWS und deren Rücklauftemperatur ausgewertet. Durch Erhöhung der Dispersivität zeigte sich sowohl ein Anstieg der Rücklauftemperatur als auch eine Vergrößerung der Temperaturfahne. Bei Betrachtung der Ergebnisse zur Temperaturausbreitung gilt es zu berücksichtigen, dass Ablesefehler beim Messen der Längen nicht ausgeschlossen werden können. Außerdem handelt es sich bei der ausgewerteten Temperaturgrenze um interpolierte Temperaturen zwischen Knoten des FE-Netzes. In diesem Zusammenhang kann der Einfluss der Dispersion auf die Temperaturausbreitung in Abb. 6.23 als annähernd linear betrachtet werden. Abb. 6.21 zeigt ebenfalls einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen Rücklauftemperatur und Dispersivität. Bereits die Erhöhung der Dispersivität von $\alpha_L = 0$ m auf $\alpha_L = 5$ m zeigt eine Temperaturerhöhung von $\Delta T = 1,93$ K in der Rücklauftemperatur. Wird in Betracht gezogen, dass auch



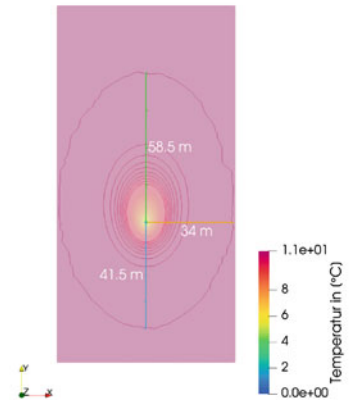
(a) Vertikaler Schnitt (3D-Ansicht) bei $\alpha_L = 0$ m.



(b) Horizontaler Schnitt (2D-Ansicht) bei $\alpha_L = 0$ m.



(c) Vertikaler Schnitt (3D-Ansicht) bei $\alpha_L = 5$ m.



(d) Horizontaler Schnitt (2D-Ansicht) bei $\alpha_L = 5$ m.

Abb. 6.22 Temperatursausbreitung bei den Dispersivitätswerten $\alpha_L = 0$ m und $\alpha_L = 5$ m

höhere Dispersivitätswerte möglich sind, ist dieser Einfluss nicht zu vernachlässigen. Es darf dabei jedoch nicht vergessen werden, dass der Einfluss der Dispersion direkt vom Betrag der Darcy-Geschwindigkeit abhängig ist, wie Gl. (6.7) zeigt. Zudem ist in den Betrachtungen fast ein Drittel der Sonde im Bereich mit Grundwasserströmung. Daher ist zumindest das konkrete Ausmaß des ausgewerteten Einflusses der hydrodynamischen Dispersion in der Simulation spezifisch für diese Untersuchung.

Vor dem Hintergrund der anfangs beschriebenen Schwierigkeit der Bestimmung angemessener Dispersivitätswerte, ist der Parameter daher vor allem bei größeren Darcy-Geschwindigkeiten mit Bedacht einzusetzen. Im Kontext der Auslegung von EWS ergibt sich nach den hier gewonnenen Erkenntnissen eine konservativere energetische Auslegung durch Unterschätzen der Dispersivitätswerte. Hinsichtlich der

Tab. 6.14 Länge der Temperaturlausbreitung ausgehend von der EWS in und gegen die Strömungsrichtung und abhängig von der longitudinalen Dispersivität

α_L	Länge der Temperaturlausbreitung	
	Entgegen der Strömungsrichtung	In Strömungsrichtung
0 m	25 m	42 m
0,1 m	25,5 m	42,5 m
0,5 m	27,5 m	44,5 m
1 m	29,5 m	46,5 m
2,5 m	34 m	51 m
5 m	41,5 m	58,5 m

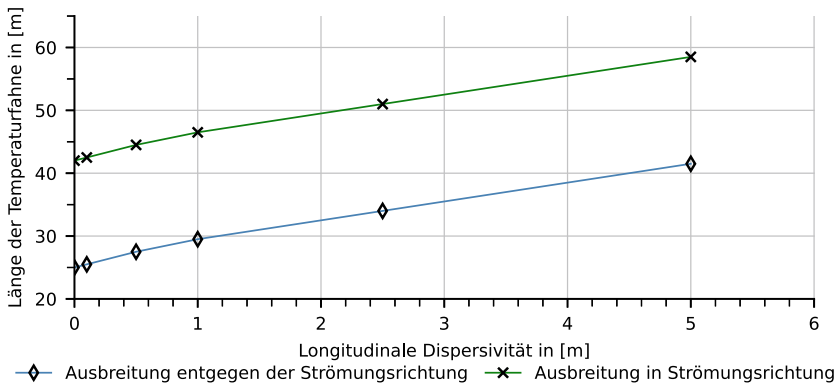


Abb. 6.23 Länge der Temperaturlausbreitung ausgehend von der EWS in und gegen die Strömungsrichtung und abhängig von der longitudinalen Dispersivität

Positionierung einer EWS und der Einhaltung von Grenzen der Temperaturlausbreitung ist hingegen eine Überschätzung des Dispersionseinflusses der konservativere Weg in der Auslegung.

Literatur

Bucher A, Görke UJ, Vienken T et al (2018) Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme. Tech. Rep. 1/2018, Leipzig

Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011a) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 1. Fundamentals. Computers & Geosciences 37:1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.003>

Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011b) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. Computers & Geosciences 37(8):1136–1147. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.002>

- DWD Climate Center (CDC) (2018) Historische monatliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer etc.) für Deutschland. Version v007
- Fenz A (2017) Numerische Simulation von Thermal Response Tests mit Analyse der Ergebnisse. Projektarbeit Master, Studentische Master-Projektarbeit HTWK Leipzig
- Gillbricht CA, Radmann KJ (2017) Mythos Dispersion – wieso Modelle die Wirklichkeit nicht abbilden. *altlasten spektrum* (1):4. <https://doi.org/10.37307/j.1864-8371.2017.01.04>
- Hein P, Zhu K, Bucher A et al (2016) Quantification of exploitable shallow geothermal energy by using Borehole Heat Exchanger coupled Ground Source Heat Pump systems. *Energy Convers Manag* 127:80–89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.097>
- Himmel M, Schäfer W (2010) Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich. Tech. Rep. 12, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Recklinghausen
- Keim B, Lang U (2008) Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen – Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen in Baden-Württemberg. Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg A310-1, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Geothermie/5_Prinzipstudie_zur_Berechnung_von_Temperaturfeldern.pdf. Zugegriffen: 30. Apr. 2021
- Kobus H, Schäfer G, Spitz K et al (1992) Dispersive Transportprozesse und ihre Modellierung. Universität Stuttgart. <https://doi.org/10.18419/OPUS-536>
- Lenda A, Zuber A (1970) Tracer dispersion in groundwater experiments. IAEA, International Atomic Energy Agency (IAEA)
- Li T, Zhu J, Zhang W (2012) Arrangement strategy of ground heat exchanger with groundwater. *Trans Tianjin Univ* 18(4):291–297. <https://doi.org/10.1007/s12209-012-1906-3>
- Molina-Giraldo N, Bayer P, Blum P (2011) Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions. *Int J Therm Sci* 50(7):1223–1231. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.004>
- Randow J, Chen S, Lubashevsky K et al (2022) Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization: a case study in Berlin. *Geotherm Energy* 10(1):1. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00211-9>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.013>
- Shao H, Hein P, Sachse A et al (2016) Geoenergy modeling II: shallow geothermal systems. SpringerBriefs in Energy, Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45057-5>
- VDI 4640 (2020) Thermische Nutzung des Untergrundes. Tech. rep
- Wagner V, Blum P, Bisch G et al (2012) Bestimmung der thermischen Dispersivität im Kontext der oberflächennahen Geothermie. In: Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Modelle, Analysen und Anwendungen, Schweizerbart, Dresden, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, vol 78, p 18
- § 3 BBergG (1982) Bergfreie und grundeigene Bodenschätze. Tech. rep. https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/_3.html. Zugegriffen: 24. Nov. 2022

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Karsten Rink, Rüdiger Grimm, Nele Hastreiter, Paula Kroll,
Paul Remmler, Haibing Shao und H. Konstanze Zschoke

Nachdem in den vergangenen Kapiteln ausführlich die Abläufe bei der Erkundung, dem Monitoring sowie der Simulation des Untergrundes und der Haustechnik beschrieben wurden, werden nun in Abschn. 7.1 Möglichkeiten zur Verwendung der

K. Rink (✉) · N. Hastreiter · P. Remmler · H. Shao
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland
E-mail: karsten.rink@ufz.de

N. Hastreiter
E-mail: nele.hastreiter@ufz.de

P. Remmler
E-mail: paul.remmler@ufz.de

H. Shao
E-mail: haibing.shao@ufz.de

R. Grimm · H. K. Zschoke
geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland
E-mail: grimm@geoenergie-konzept.de

H. K. Zschoke
E-mail: zschoke@geoenergie-konzept.de

N. Hastreiter
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, TU München Campus Straubing, Straubing, Deutschland

P. Kroll
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: Paula.Kroll@stud.htwk-leipzig.de

H. Shao
Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_7

erhobenen und generierten Daten für die Entwicklung eines prototypischen Informationssystems dargestellt. Die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse für die Gestaltung eines Entscheidungshilfesystems wird in Abschn. 7.2 für den gesamten Prozess von der Grundlagenplanung und Machbarkeitsprüfung über die einzelnen Planungs- und Genehmigungsschritte bis zur Objektbetreuung nach der Implementation beschrieben. Abschn. 7.3 zeigt auf, in welchem Maße sich gesetzliche Vorgaben derzeit für die Anlagenplanung in Deutschland zwischen den einzelnen Bundesländern unterscheiden und gibt Empfehlungen zur Anpassung ebendieser regulativen Rahmenbedingungen. Schließlich gibt Abschn. 7.4 einen kompakten Überblick über die innerhalb von EASyQuart verwendeten Konzepte für die Datenhaltung von Monitoring- und Erkundungsdaten sowie für die im Rahmen des Projekts entwickelten Algorithmen und Werkzeuge.

7.1 Visuelle Daten- und Modellintegration

Für die Beantwortung von Forschungsfragen innerhalb des EASyQuart-Projektes wird eine große Menge von heterogenen Daten aus verschiedenen Forschungsbereichen wie der Hydrologie, Geologie, Geotechnik oder Haustechnik erhoben, gesammelt oder generiert. Diese Daten stammen aus einer Vielzahl von Quellen und unterscheiden sich in ihrer Struktur, Auflösung sowie räumlicher und zeitlicher Ausdehnung. Beispiele für verwendete Daten sind etwa Messreihen von Temperatursensoren, Bodenkarten, aber auch Finite-Elemente-Gitter für die numerische Simulation von Prozessen. Diese Daten müssen zunächst in einen einheitlichen Kontext überführt werden und – sofern dies möglich ist – sollten Inkonsistenzen zwischen Datensätzen korrigiert werden. Beispiele für zu diesem Zweck entwickelte und genutzte Werkzeuge und Techniken werden in Abschn. 7.1.1 vorgestellt. Abschn. 7.1.2 beschreibt, wie im Anschluss an die Datenintegration Konzepte für eine 3D-Darstellung der einzelnen Datensätze umgesetzt und diese in ein visuelles Versorgungsinformationssystem überführt werden. Hier können Datensätze geeignet miteinander verknüpft und Interaktionsmöglichkeiten für die virtuelle Erkundung und Analyse der Daten implementiert werden. Die entwickelten Konzepte und Workflows für die Integration und Visualisierung von Daten werden dann beginnend mit Abschn. 7.1.3 anhand von drei Fallstudien beschrieben, die im Rahmen von EASyQuart implementiert wurden.

7.1.1 Datenintegration

Mithilfe etablierter Software ist es in der Regel nicht möglich, derartige Datensammlungen in einem gemeinsamen Kontext darzustellen und zu evaluieren. Domainspezifische proprietäre Software ist meist auf das Einlesen weniger Datenformate limi-

tiert (beispielsweise das `fem`-Format in FEFLOW¹ oder AutoCADs `dxf`-Format²). Eine Reihe von Software mit dem Fokus auf breite Anwendbarkeit – etwa Geoinformationssysteme wie QGIS³ oder Visualisierungsframeworks wie ParaView⁴ – unterstützen zwar ein breites Spektrum an Dateiformaten, sind aber dennoch aufgrund ihrer breiten Nutzung in bestimmten Forschungsdomänen und bezüglich der dort etablierten Darstellungsformen limitiert. So stellt etwa QGIS Geometrien oder Rasterdaten in einer 2D-Layerhierarchie dar. 3D-Darstellungen sind innerhalb von Geoinformationssystemen in der Regel nicht trivial und speziell dafür entwickelte Dateiformate werden oft nicht unterstützt. Umgekehrt liegt der Fokus von ParaView auf der Darstellung triangulierter 3D-Objekte, Vektorfelder und der Anwendung typischer Visualisierungstechniken für Daten in den Ingenieurwissenschaften. Der Import von Geometrie- oder Rasterdaten ist zwar prinzipiell möglich, die vorhandenen Visualisierungstechniken und unterstützten Dateiformate sind aber meist nicht dafür ausgelegt. Simulationsergebnisse physikalischer Prozesse oder aus der Haustechnik werden von beiden nicht unterstützt. Hierfür wird in der Regel die für die Simulation verwendete Software benötigt bzw. es müssen abstrakte Daten (etwa Zeitreihen) mittels selbst erstellter Konversions- oder Modellierungsroutinen in einem räumlichen Kontext dargestellt werden.

Zu diesem Zweck wird im Department Umweltinformatik des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) bereits seit einigen Jahren ein Softwareframework entwickelt, das mithilfe modularer und generalisierter Workflows heterogene Datensammlungen in einem einheitlichen geografischen Kontext darstellt. Als Teil der Simulationssoftware OpenGeoSys (OGS) (Kolditz et al. 2012) wurde der OGS Data Explorer als visuelles Werkzeug für den Import, die Konversion, die Vor- und Nachverarbeitung sowie die Darstellung von Daten aus den Umweltwissenschaften entwickelt (Rink et al. 2013, 2014). Dieses Werkzeug sowie weitere innerhalb von OGS entwickelte Kommandozeilentools erlauben sowohl das Einlesen einer großen Bandbreite generischer und offener Datenformate als auch einiger proprietärer Formate (siehe Abb. 7.1) sowie die Gestaltung komplexer Workflows für die Verarbeitung strukturell heterogener Daten. Dabei erfolgt automatisch eine Konversion für die Repräsentation der Daten im 3D-Raum. Da die Struktur der unterstützten Formate sehr heterogen ist, kann diese trivial sein oder eine ganze Reihe von Annahmen und komplexen Transformationen erfordern. So werden beispielsweise Daten in Geoinformationssystemen typischerweise zweidimensional repräsentiert (etwa QGIS oder NASA Earth Explorer⁵). Dennoch ist eine Darstellung im 3D-Raum meist unkompliziert, etwa bei der Konversion geometrischer (Poly-)Linien von 2D nach 3D durch Hinzufügen einer z -Koordinate oder die Triangulierung von 2D-Flächen für die Darstellung im 3D-Raum. Der Data Explorer erlaubt aber insbesondere auch den Import von Ergebnissen einer ganzen Reihe bekannter Simu-

¹ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>

² <https://www.autodesk.de/products/autocad/>

³ <https://www.qgis.org>

⁴ <https://www.paraview.org/>

⁵ <https://earthexplorer.usgs.gov>

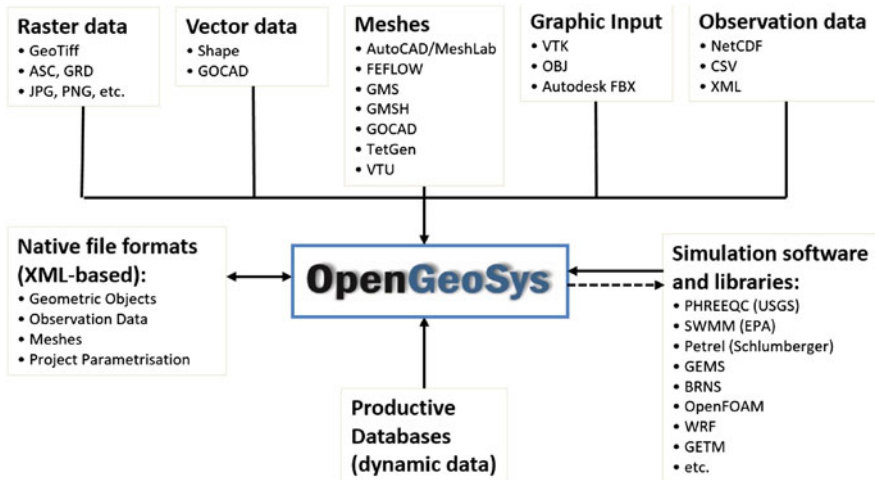


Abb. 7.1 Schnittstellen des OGS Softwareframeworks für den Datenimport

lationscodes (z. B. FEFLOW, OpenFOAM⁶, GETM⁷ etc.) in einem gemeinsamen räumlichen Kontext mit GIS-Daten oder 3D-Modellen. Während Software für die Simulation von hydrologischen Prozessen im Untergrund (z. B. OGS oder FEFLOW) typischerweise eine dreidimensionale Modelldomäne definiert, die mittels der Finite-Elemente-Methode diskretisiert wird, gestaltet sich die Umwandlung der Daten aus anderer Software schwieriger. Beispiele hierfür sind etwa abstrakte Kanalnetzwerke in Ergebnissen des Storm Water Management Modells der amerikanischen Environmental Protection Agency⁸ oder die Ergebnisse von Prozesssimulationen in der Haustechnik (z. B. SimulationX⁹ oder TRNSYS¹⁰), wo für die Modellierung lediglich abstrakte Darstellungen parametrisiert werden, ähnlich Schaltkreisen in der Elektrotechnik.

7.1.2 Datenvisualisierung

Der OGS Data Explorer wurde – ähnlich wie Geoinformationssysteme oder ParaView – primär für die Vor- und Nachbearbeitung von Daten sowie deren Evaluierung konzipiert. Das Programm sowie einige zugehörige Kommandozeilenwerkzeuge können daher für eine Reihe verschiedener Aufgaben verwendet werden, wie etwa die Konvertierung und Darstellung von Daten, den Aufbau numerischer Mo-

⁶ <https://www.openfoam.com/>

⁷ <https://getm.eu/>

⁸ <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

⁹ <https://www.simulationx.com>

¹⁰ <https://www.trnsys.com>

delle sowie für die Aufbereitung der Daten für komplexe Visualisierungsstudien. Informationssysteme, wie das im Rahmen dieses Projekts angestrebte Versorgungsinformationssystem, erfordern jedoch eine interaktive Präsentation von Inhalten in Echtzeit, bei der Objekte in einem geografischen Kontext eingebettet sind und mit zusätzlichen Informationen verknüpft werden können.

Daher wurde ein zum OGS Data Explorer kompatibles Framework aufsetzend auf der Softwareplattform Unity¹¹ entwickelt und im Rahmen von EASyQuart erweitert. Unity ist eine 3D-Engine für die Erstellung und Präsentation interaktiver 3D-Inhalte in Echtzeit, etwa für Computerspiele, animierte Filme oder Anwendungen in der Architektur oder Automobilindustrie. Die im Department Umweltinformatik des UFZ entwickelte Erweiterung von *Unity* erlaubt die Einbindung von geo- und umweltwissenschaftlichen Daten in komplexe und interaktive 3D-Szenen. Das umfasst zum einen den direkten oder (über den OGS Data Explorer) indirekten Import von Daten bzw. geeigneten 3D-Repräsentationen als auch die Berücksichtigung spezieller Herausforderungen bei der Verwendung heterogener Umweltdaten, wie etwa die Georeferenzierung in speziellen Geokoordinatensystemen, die im direkten Konflikt zu in der Computergrafik üblichen Koordinatendarstellungen stehen. Eine Reihe weiterer Aspekte, die es zu beachten gilt, umfassen etwa die Voraussetzung, dass alle innerhalb eines Projekts verwendeten Datensätze das gleiche geografische Koordinatensystem verwenden oder dass Datensätze innerhalb eines Projekts teilweise eine sehr unterschiedliche räumliche Ausdehnung haben, was zu Problemen bei einer gemeinsamen Darstellung führen kann. So umfasst etwa die Domäne eines numerischen Simulationsmodells in der Regel die gesamte Ausdehnung der Modellregion (etwa das untersuchte Quartier), während Infrastrukturobjekte (z. B. Temperaturmessstellen oder Rohrleitungen) eine im Vergleich um Größenordnungen geringere Ausdehnung haben und daher auf geeignete Art in einer 3D-Darstellung hervorgehoben werden müssen, um überhaupt sichtbar zu sein.

Die hier verwendete Erweiterung des *Unity*-Frameworks wurde ursprünglich für die Darstellung von Datensammlungen in hydrologischen Forschungsprojekten entwickelt (Rink et al. 2018; Yan et al. 2019) und fortlaufend erweitert, mit dem Ziel, Umweltinformationssysteme für ausgewählte Untersuchungsgebiete zu entwickeln (Rink et al. 2020, 2021). Eine im Rahmen dieses erweiterten Frameworks erstellte Anwendung erlaubt nicht nur die Darstellung aller für ein Untersuchungsgebiet relevanten Daten in einem einheitlichen geografischen Kontext, sie beinhaltet auch eine Reihe von Funktionen, um die Daten auf geeignete Weise präsentieren und Informationen bereitstellen zu können. So ist es beispielsweise möglich, eine Reihe von Ansichtspunkten (*Viewpoints*) zu erstellen, die eine definierte Auswahl von Daten aus einem vordefinierten Blickwinkel zeigen. Das ermöglicht es zum einen, dass Anwendern automatisch aussagekräftige bzw. relevante Ansichten der Daten angezeigt und geeignet dargestellt werden können. Zum anderen können diese Ansichtspunkte in einer definierten Reihenfolge hintereinander geschaltet werden, sodass eine Präsentation der räumlichen Daten des Untersuchungsgebietes entsteht,

¹¹ <https://unity.com/>

in der interessante Aspekte nach und nach visualisiert und ggf. vertieft werden können. Für jeden dieser Punkte kann spezifiziert werden, welche Datensätze sichtbar sind und welche ausgeblendet werden sollen, sodass stets eine geeignete Darstellung der zu betrachtenden Daten, Prozesse oder Ereignisse garantiert werden kann. Darüber hinaus können Zeitschritte gemessener bzw. simulierter Daten animiert dargestellt oder detaillierte oder ergänzende Daten mit 3D-Objekten verknüpft werden. Diese Funktionalität erlaubt es beispielsweise, auf einen Datensensor innerhalb der Szene zu klicken und eine Zeitreihe der gemessenen Daten abzurufen oder ein Bohrloch auszuwählen und ein Bild des Bohrlochprofils oder eine PDF-Datei mit Details zur Bohrung abzurufen (Graebling et al. 2022). Die Art der so verlinkten Inhalte ist dabei frei konfigurierbar und kann ebenso Webseiten, Videos oder PDF-Dateien umfassen.

Im Rahmen von EASyQuart wurde dieses Framework dahingehend erweitert, dass Daten und Prozesse, wie sie die typischerweise in der Geotechnik oder Haus-technik bzw. generell bei der Darstellung von Energiesystemen relevant sind, in das System eingebunden und visualisiert werden können. Im Laufe des Projekts wurden dabei Visualisierungsstudien basierend auf Daten für drei Standorte in Deutschland dargestellt und für einen davon eine umfassende Anwendung in Form eines Informationssystems entwickelt.

7.1.3 Fallstudie 1: Berlin-Weißensee

Für ein Gebiet im Berliner Stadtteil Weißensee wurde zunächst eine Reihe von GIS-Daten zusammengeführt, auf deren Grundlage im Folgenden verschieden aufgelöste FEM-Gitter für den oberflächennahen geologischen Untergrund erstellt wurden. Die GIS-Daten, 3D-Modelle und Simulationsergebnisse wurden schließlich in einer Visualisierungsstudie zusammengeführt.

Nach der Projektion aller verfügbaren Daten in ein einheitliches Koordinatensystem (in diesem Fall die für Berlin relevante UTM-Zone 33N) wurde anhand der gegebenen Modellgebietsbegrenzung zunächst mittels GMSH (Geuzaine und Remacle 2009) eine Diskretisierung des zu betrachtenden Gebietes in 2D durchgeführt. Bei der Generierung des Gitters wurden bereits die Grundstücksgrenze sowie die Positionen der Bohrlöcher für die Erdwärmesonden (EWS) mit einbezogen (Abb. 7.2). Dies ist relevant für eine spätere Simulation physikalischer Prozesse mittels der Finite-Elemente-Methode, wie sie von OGS oder FEFLOW durchgeführt wird. Basierend auf Höheninformationen des digitalen Geländemodells der Region sowie gegebener Werte für die Grenzen stratigrafischer Schichten im Untergrund wurden zunächst die Schichtgrenzen in 2D modelliert und dann daraus ein 3D-Prismengitter erstellt. Zur Vermeidung numerischer Fehler bei einer anschließenden Simulation wurde die Auflösung des Gitters im Folgenden weiter erhöht und beispielsweise die gegebenen fünf stratigrafischen Schichten in über 60 Unterschichten unterteilt. Darüber hinaus wurde die Auflösung des Gitters in der Nähe der Erdwärmesonden adaptiv so verfeinert, dass die hier lokalisierten Dreiecke eine sehr viel kürzere Kantenlänge aufweisen als beispielsweise an den Rändern des Modellgebietes (Abb. 7.3). Zur Einbettung aller

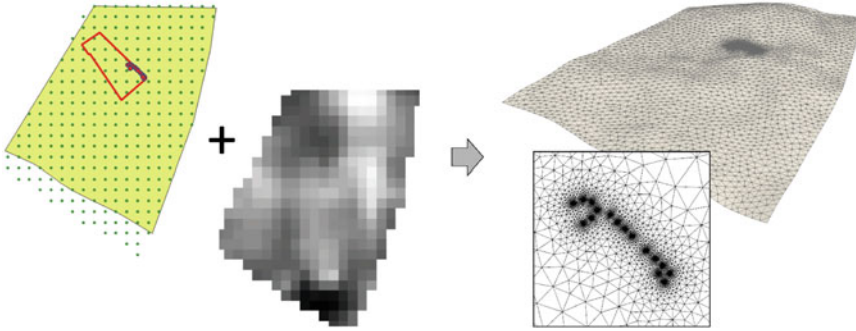


Abb. 7.2 Erstellung eines Oberflächengitters für den Standort in Berlin-Weißensee

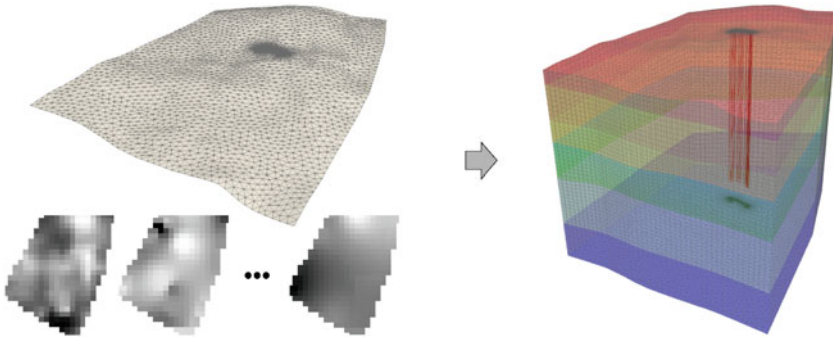


Abb. 7.3 Extrudierung des 2D-Gitters mittels stratigraphischer Schichtinformation in ein 3D-Modell des Untergrundes. Die z-Koordinaten wurden zur besseren Sichtbarkeit der Details um den Faktor 3 überhöht

geografischen Informationen, Simulationsergebnisse und modellierten 3D-Objekte in den geografischen Kontext wurde eine 3D-Oberfläche des umgebenden Gebietes in Berlin generiert und mit einem Luftbild texturiert, sodass die Modellregion sowie das betrachtete Grundstück visuell räumlich leicht einzuordnen sind (Abb. 7.4).

Für die korrekte Modellierung der Erdwärmesonden wurden existierende Datenverarbeitungswerkzeuge innerhalb von OGS um Funktionalitäten erweitert, die die Integration von Linienelementen in ein existierendes 3D-Gitter erlaubt. Diese Linienelemente repräsentieren in der numerischen Modellierung die Sonden und dienen der Zuweisung von Anfangsbedingungen und der Berechnung von Temperaturwerten der Sondenparameter. Eine ausführliche Darstellung der durchgeführten Simulation sowie der Vergleich der Ergebnisse von OGS und FEFLOW wurden von [Randow et al. \(2022\)](#) in der Fachzeitschrift *Geothermal Energy* veröffentlicht. Details zu einem aus dieser Studie abgeleiteten Benchmark finden sich in Abschn. 6.2 in diesem Buch.

Innerhalb der Visualisierungsstudie wurde eine Reihe von Annahmen bezüglich der geeigneten Repräsentation der darzustellenden Daten und Prozesse getroffen.

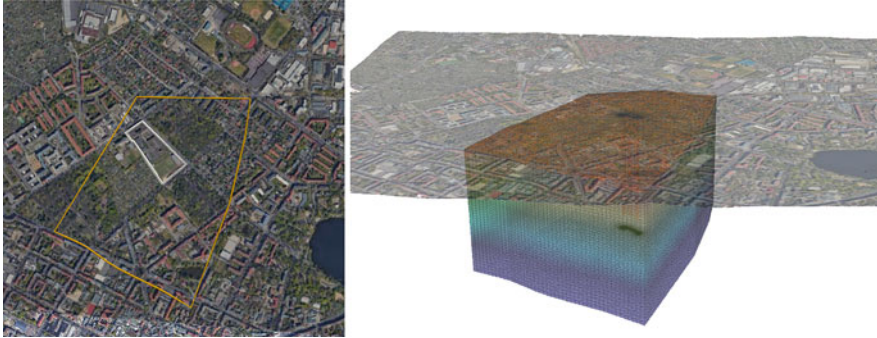


Abb. 7.4 Einbettung der 3D-Modelle in den geografischen Kontext

So wurden für die Visualisierung der OGS-Simulationsergebnisse eine Informationsreduktion vorgenommen und eine Darstellung der Temperaturveränderung im Untergrund mittels einiger weniger Isotemperaturflächen gewählt (vgl. Abb. 7.6). Dies ermöglicht eine intuitive und verifizierbare Beurteilung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Temperaturveränderungen unter verschiedenen Bedingungen. Darüber hinaus wird der Grundwasserfluss im Modellgebiet mittels räumlich gleichverteilter Glyphen repräsentiert. Konkret wurden hier für die Darstellung Pfeile gewählt, deren Ausrichtung den Fluss des Grundwassers repräsentiert und deren Größe und Farbe mit der Fließgeschwindigkeit in Metern pro Jahr korrespondiert. Die Kombination der beiden dargestellten Prozesse – Temperaturveränderung und Grundwasserfluss – zeigt nun deutlich, wie sich eine Temperaturfahne entlang der Grundwasserfließrichtung entwickelt. Diese Darstellung zeigt insbesondere auch, wie gering die Temperaturveränderung außerhalb der verwendeten Grundstücksgrenzen ist. Die in Abb. 7.6 dargestellten Isotemperaturflächen liegen bei $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eine stärkere Abkühlung des Bodens erfolgt nur in der unmittelbaren Umgebung der Erdwärmesonden und wird hier durch eine Einfärbung der Sonden entsprechend ihrer Temperatur repräsentiert.

Neben der Simulation des Untergrundes mittels OGS wurde auch beispielhaft eine Simulation der Haustechnik für ein Schulgebäude am untersuchten Standort durchgeführt. Hier wurden mittels SimulationX Temperatur und Volumenströme für das Gebäude sowie die verwendete Anlage simuliert (analog zum Quartiersmodell aus Abschn. 5.1.6) und mit dem OGS-Modell, in dem u. a. die Parameter der Erdwärmesonden simuliert werden, mittels eines Python-Skriptes gekoppelt. Für den simulierten Zeitraum eines Jahres wurden relevante Parameter in äquidistanten Zeitpunkten ausgetauscht, sodass beide Modelle ihre Berechnungen basierend auf dem Verlauf der jeweils anderen Simulation durchführen. Abschn. 5.2.1 beschreibt diese Kopplung der beiden Simulationscodes im Detail.

Da SimulationX lediglich eine Parametrisierung der zu simulierenden Systemkomponenten benötigt, war es notwendig, diese für die Darstellung des Gesamtsystems separat zu modellieren. Abb. 7.5 zeigt die verwendete 3D-Modellierung der Anlagentechnik, bestehend aus Wärmesonden (blau), Wärmespeicher (violett) sowie

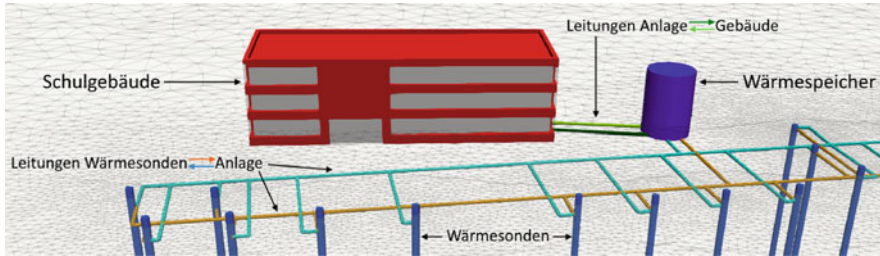


Abb. 7.5 3D-Modellierung der Anlagentechnik, bestehend aus Wärmesonden (blau), Wärmespeicher (violett), Schulgebäude (rot) sowie den verbindenden Leitungen

den verbindenden Leitungen und einem Schulgebäude (rot) als zu beheizendes Gebäude. Alle Komponenten sind georeferenziert und konsistent mit den verwendeten geowissenschaftlichen Daten sowie dem OGS-Simulationsmodell. Das Schulgebäude hat die Abmessungen des tatsächlichen Gebäudes und ist diesem auch in der 3D-Repräsentation nachempfunden. Der Wärmespeicher wurde hier – entgegen der tatsächlichen Bauweise – außerhalb des Gebäudes modelliert, um die Temperaturverläufe möglichst anschaulich darstellen zu können. Alle modellierten Objekte werden im Folgenden verwendet, um den zeitlichen Verlauf der simulierten Temperaturveränderungen darzustellen, indem sich die Objektfarben entsprechend einer für alle Daten einheitlichen Temperaturfarbtabelle verändern (siehe Abb. 7.6).

Alle beschriebenen Daten sind in einer interaktiven 3D-Szene integriert und können somit in Relation zueinander betrachtet werden. Ein Benutzer kann sich frei im 3D-Raum der Szene bewegen und Kameraposition, Darstellungswinkel, Zoom etc. anpassen. Ebenso kann die Transparenz aller Datensätze individuell angepasst werden. Darüber hinaus steht die in Abschn. 7.1.2 beschriebene Funktionalität des Frameworks hier vollständig zur Verfügung. So kann etwa in einem Ansichtspunkt die topografische Oberfläche mit dem Satellitenbild der Region in einer Ansicht von oben dargestellt werden. Beim Übergang zur nächsten Ansicht wird diese Oberfläche sukzessive ausgeblendet, um den Grundwasserfluss im modellierten Gebiet zu betrachten (Abb. 7.7). Ein Kameraschwenk in eine isometrische Ansicht und ein Zoom auf das Grundstück ermöglichen den Fokus auf die simulierten Temperaturveränderungen im Untergrund sowie eine virtuelle Kamerafahrt in die Umgebung der Erdwärmesonden, etwa zur Einschätzung der Temperaturentwicklung im Kontext der geologischen Strukturen sowie der ebenfalls dargestellten Grundstücksgrenze.

7.1.4 Fallstudie 2: Offenbach-Kaiserlei

Der für die Visualisierungsstudie für Berlin-Weißensee verwendete Workflow wurde auch für die Darstellung eines Bauprojekts im Offenbacher Stadtteil Kaiserlei verwendet. Aufgrund eines unerwarteten Baustopps während der Projektlaufzeit und der daraus resultierenden Nichtherausgabe weiterer angefragten Daten konnte die

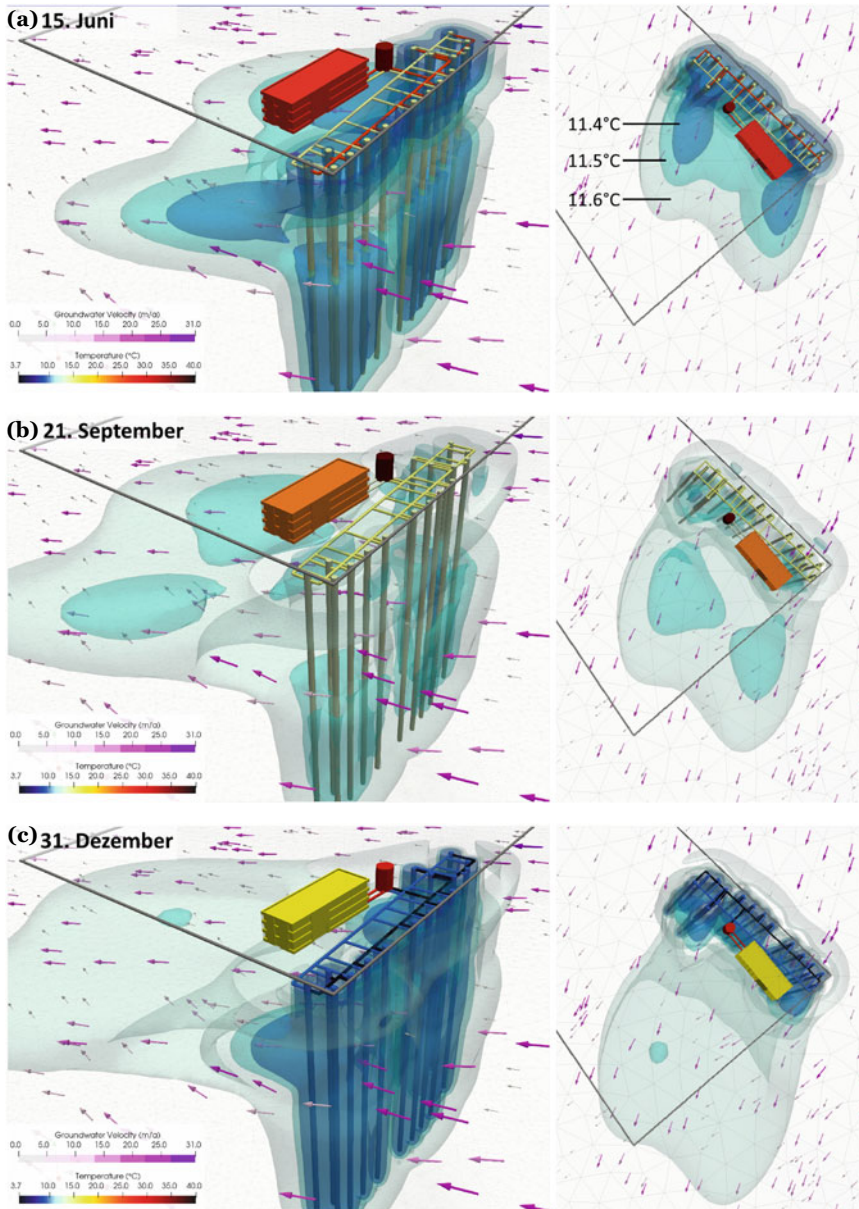


Abb. 7.6 Visualisierung der Ergebnisse der gekoppelten Simulation von OGS und SimulationX. Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen in einem Schulgebäude, der zugehörigen Anlage, Wärmesonden und den verbindenden Leitungen via SimulationX sowie von Grundwasserfluss und Temperatur im Untergrund via OGS an drei ausgewählten Tagen. Die Transferfunktion der Temperaturdarstellung ist zur besseren Vergleichbarkeit konstant über alle Zeitschritte und dargestellten Komponenten. Die zur Illustration der Temperaturveränderung visualisierten Isothermflächen liegen bei 11,4°C, 11,5°C und 11,6°C (siehe auch Abb. (a) rechts)

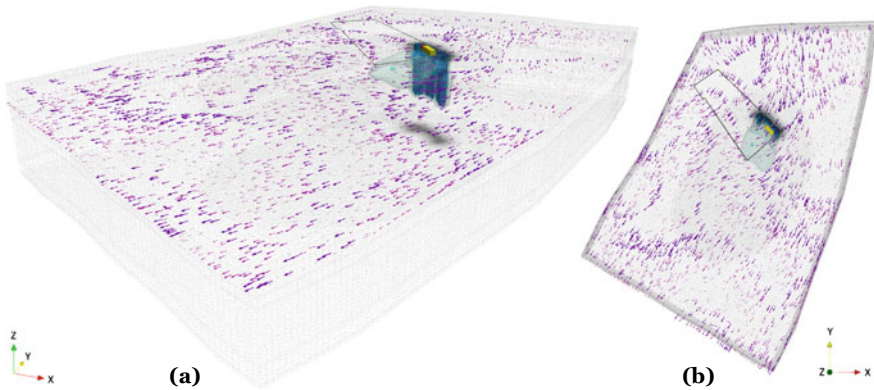


Abb. 7.7 Übersicht über die gekoppelten Simulationsergebnisse. Während die Temperaturentwicklung im Gebäude und der Anlagentechnik in Abb. 7.6 im Detail dargestellt werden, kann mithilfe dieser Gesamtansicht der Grundwasserfluss und der Effekt der geothermischen Nutzung des Untergrundes eingeschätzt werden

Visualisierung dieser Fallstudie im Verlauf des Projekts leider nicht fortgesetzt werden. Sie soll hier aber zur Darstellung der einfachen Übertragbarkeit der verwendeten Methoden dennoch kurz vorgestellt werden.

Analog zur ersten Studie wurde auch hier zunächst eine Reihe von GIS-Daten in eine 3D-Szene integriert (siehe Abb. 7.8): Basierend auf einem digitalen Geländemodell wurde eine triangulierte Oberfläche des Untersuchungsgebietes erstellt und die Höheninformationen für das Bewilligungsfeld (rot), die Grundstücksgrenzen (grün) sowie die 2D-Koordinaten der Positionen der Wärmetauscher entsprechend angepasst. Für eine intuitive geografische Einordnung wurde in diesem Fall eine Karte von OpenStreetMap¹² unter Verwendung des monochromen Darstellungsmodus verwendet (Abb. 7.8a). Für ein Modell des Untergrundes wurden sowohl die geologischen Schichten als auch die Bohrlöcher für die Wärmetauscher in 3D modelliert. Die Farben der Bohrlöcher korrespondieren dabei mit den Gebäuden, die sie versorgen sollen. Sie haben eine Tiefe von 100 m für den nordöstlichen Abschnitt des Quartiers und 125 m für die restlichen Gebäude (Abb. 7.8b). Als zusätzlicher Datensatz lagen für dieses Untersuchungsgebiet noch Informationen über die Grundwassergleichen vor. Für eine erste Darstellung des Grundwasserflusses wurden daraus Isoflächen erstellt und in den Grundwasserleiter des Untersuchungsgebietes eingepasst (Abb. 7.8c). Schließlich wurden mithilfe von bereitgestellter Dokumentation noch die geplanten Gebäudegrundrisse mittels QGIS digitalisiert und daraus 3D-Modelle der Gebäude erstellt. Die verwendeten Farben der Gebäude und Bohrlochpositionen korrespondieren dabei, sodass auf den ersten Blick ersichtlich ist, welche Erdwärmesonden welches Gebäude mit Energie versorgen (Abb. 7.8d).

¹² <https://www.openstreetmap.org>, ©OpenStreetMap-contributors.

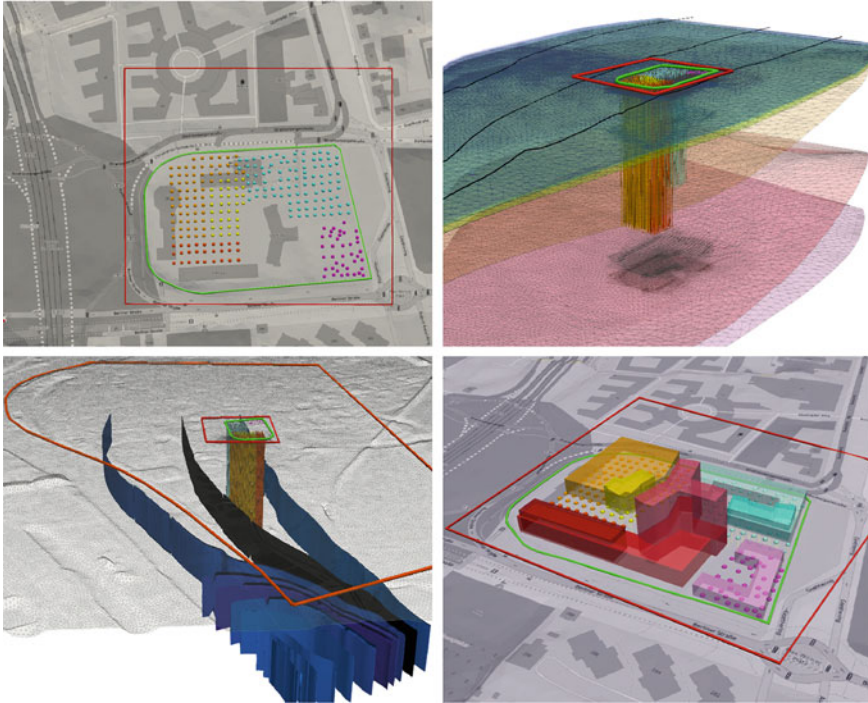


Abb. 7.8 Datenrepräsentation für Standort in Offenbach. Für die Darstellung wurden alle Datensätze dreifach überhöht dargestellt

7.1.5 Fallstudie 3: Kiel-Wik

Für die Implementation einer Visualisierungsstudie, in der die vollständige Methodik zur Entwicklung und Nutzung virtueller Versorgungsinformationssysteme angewandt wird, wurde exemplarisch eine umfangreiche Datensammlung für das Bundesland Schleswig-Holstein genutzt, die weitestgehend durch das 2021 abgeschlossene BMWi-Vorhaben ANGUSII¹³ zur Verfügung gestellt wurde.

Um die simulierten Szenarien in einen geeigneten Kontext einzubetten, wird für den Benutzer zunächst die Energieinfrastruktur des Landes Schleswig-Holstein mit dem Fokus auf die Gewinnung erneuerbarer Energien dargestellt. Eingebildet werden dafür alle derzeit betriebenen Solarparks, Biomassekraftwerke, sowie On- und Offshore-Windparks. Die vorliegenden Daten werden wie in den vorangegangenen Studien auf eine triangulierte topologische Oberfläche des Bundeslandes projiziert und durch leicht identifizierbare Farben dargestellt. Zusätzlich werden diese Infrastrukturobjekte durch 3D-Modelle, etwa von Windturbinen, ersetzt, wenn der Benutzer sich den entsprechenden Positionen nähert (siehe Abb. 7.9). Zusätzlich wird das

¹³ <https://www.angus2.de>

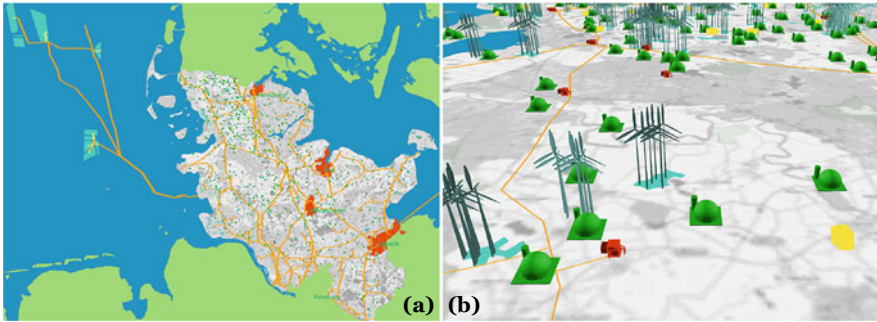


Abb. 7.9 **a** Überblick über Energiesysteme im Bundesland Schleswig-Holstein. Dargestellt werden Solarparks (gelb), Biogasanlagen (grün), Windparks (blau), Umspannstationen (rot) sowie Starkstromleitungen (orange). Als Textur wird hier eine monochrome Karte verwendet, die eine räumliche Orientierung ermöglicht, ohne die Wahrnehmung der restlichen Datensätze zu stören. **b** Detaillierte isometrische Ansicht der Region nahe Hennstett und dem Fluss Eider. Die eingeblendeten Energieinfrastrukturanlagen werden automatisch als 3D-Modelle dargestellt, wenn der Benutzer nahe an die Oberfläche heranzoomt

Stromnetz des Bundeslandes dargestellt, sodass ein Eindruck von der existierenden Vernetzung und eine gegebenenfalls notwendige Anpassung gewonnen werden kann. Zur geografischen Orientierung wird die Oberfläche wieder mit einer Karte texturiert. Verwendet wird in diesem Fall eine monochrome Karte von OpenStreetMap¹⁴, sodass gerenderte Informationen zur Infrastruktur weiterhin gut sichtbar und identifizierbar bleiben. Darüber hinaus werden die Städte Hamburg, Lübeck, Neumünster und Kiel mit ihrer tatsächlichen Ausdehnung eingeblendet. Da die Landeshauptstadt Kiel im Rahmen der Studie näher betrachtet wird, wurde für das urbane Gebiet ein eigenes 3D-Modell bestehend aus einer detailliert triangulierten Oberfläche sowie einer hochaufgelösten Textur erstellt.

Neben der Darstellung der existierenden Energieinfrastruktur liegt der zweite Fokus der Anwendung auf der Speicherung der gewonnenen Energie. Hierfür wurden die Ergebnisse von zwei numerischen Simulationen als interaktive Animationen georeferenziert in der Szene eingebettet. Die erste Simulation beschreibt einen Gasspeicher (Compressed Air Energy Storage (CAES)) in den tiefen Gesteinsschichten des Mittleren Buntsandsteins und Oberen Keuper etwa einen Kilometer unter der Geländeoberkante (Gasanzade et al. 2021). Die entsprechenden Gesteinsschichten werden hier ebenso dargestellt wie ein Modell des verwendeten Kraftwerks und die neun Bohrlöcher, die das Kraftwerk mit dem in einer antiklinalen Struktur lokalisierten Speicher verbinden (Abb. 7.10). Simuliert wurden hier zwei Szenarien: Ein adiabatischer Aufbau mit drei Kompressions- und zwei Expansionsphasen mit einem Wärmetauscher im Kraftwerk, wie er bereits in McIntosh, Alabama (USA), umgesetzt wurde, sowie ein adiabatischer Aufbau mit jeweils drei Kompressions-

¹⁴ <https://www.openstreetmap.org>, ©OpenStreetMap-contributors.

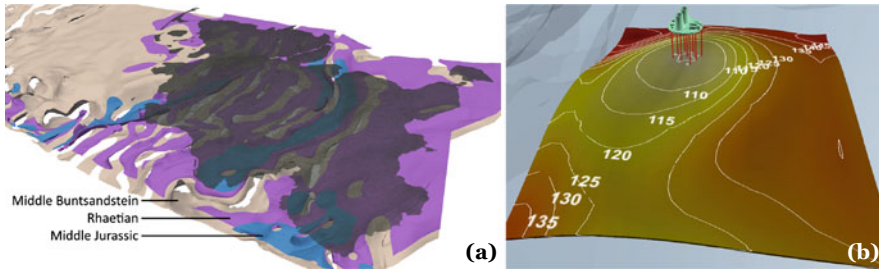


Abb. 7.10 **a** Visualisierung der geologischen Schichten unter Schleswig-Holstein und der Nordsee. Das Bundesland ist zur besseren Orientierung als semitransparente Oberfläche dargestellt. **b** Ergebnis eines CAES-Simulationsergebnisses mit einem adiabatischen Kraftwerk und neun Brunnen oberhalb der antiklinalen Struktur während des Ablassens von Druckluft. Alle dargestellten Datensätze wurden zur besseren Sichtbarkeit um den Faktor fünf überhöht

und Expansionsphasen. Beide Set-ups sind für zukünftige Energiesysteme geeignet, die zu einem hohen Anteil aus erneuerbarer Energie gespeist werden (d. h. zu 76–100 %). Die mittels einer Turbine erzeugte Energie, die beim Ablassen der Druckluft freigesetzt wird, beträgt dabei bis zu 115 MWh.

Die zweite Simulation beschreibt einen Grundwasserspeicher (High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES)) unter der Stadt Kiel. Das Modell ist Teil einer größeren Studie zur Analyse von HT-ATES-Systemen und ihrer Rolle bei der Wärmeversorgung von urbanen Räumen (siehe [Kabuth et al. 2017](#) und <https://www.angus-projekt.de>). Die Kapazität ist ausreichend, um kurze Intervalle bis hin zu saisonalen Schwankungen bei der Bereitstellung von Wärme auszugleichen, sodass derartige Systeme dazu beitragen können, den Gesamtanteil von erneuerbaren Energien zu steigern. Die für diese Simulation verwendete Modellstruktur basiert auf dem Untergrund eines Stadtteils von Kiel und besteht aus wechselnden Schichten von Sand und Tongestein. Das ATES-System besteht aus vier Brunnendoubletten, bestehend aus jeweils einem Kalt- und Warmwasserbrunnen. Die Brunnen haben hier eine Tiefe von 100 m, die beiden Brunnen einer Doublette haben einen Abstand von 300 m und die Doubletten haben einen Abstand von 100 m zueinander. Um Wärme zu speichern, wird Wasser mit Umgebungstemperatur über den Kaltwasserbrunnen extrahiert, mittels eines Wärmetauschers erwärmt und dann über den Warmwasserbrunnen wieder in den Grundwasserleiter injiziert. Für die Nutzung der gespeicherten Wärme wird das erwärmte Wasser über den Warmwasserbrunnen extrahiert und mittels einer Wärmepumpe auf das Temperaturlevel des kommunalen Wärmenetzes gebracht. Die vier hier simulierten Brunnendoubletten erreichen dabei eine Speicherrate von bis zu 12 MW und eine Kapazität von 25 GWh. Die Temperaturveränderungen im Untergrund wurden über zehn Jahre simuliert und werden in der Visualisierungsstudie – wie in [Abb. 7.11](#) dargestellt – mithilfe animierter Isothermenflächens repräsentiert.

Um die Simulationsergebnisse zur Energiespeicherung in den Kontext zur tatsächlich benötigten Wärme zu stellen, wurden schließlich noch Daten, welche die jährliche Wärmebedarfsverteilung zeigen, in die Studie integriert. Detaillierte Daten zum gemessenen Wärmebedarf sind in der Regel nicht verfügbar bzw. fallen

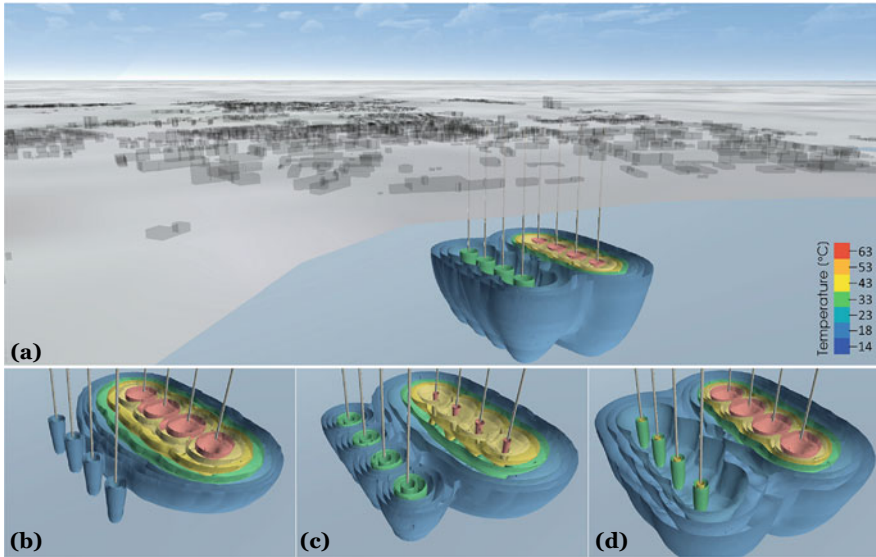


Abb. 7.11 Visualisierung von Simulationsergebnissen eines ATEs-Systems. **a** Wärmeveränderungen in Relation zu dem Stadtteil von Kiel, für dessen Versorgung das System konzipiert ist. **b–d** Ausgewählte Zeitschritte, die die Temperaturveränderungen im Untergrund basierend auf den durchgeführten Injektions- und Extraktionszyklen des Wassers in/aus dem Aquifer zeigen. Konkret dargestellt werden **b** der November des ersten Jahres (vier Monate nach Inbetriebnahme), **c** der Januar des dritten Jahres (18ter Monat der Simulation) und **d** der Oktober des achten Jahres (99ster Monat der Simulation)

unter den Datenschutz. Sie können jedoch mittels verfügbarer Geodaten modelliert werden. Dazu gehören beispielsweise 3D-Gebäudemodelle, Zensusdaten etc. Derartige Karten, die die Verteilung des Wärmebedarfs zeigen, wurden im Rahmen des ANGUSII-Projekts von [Schwanebeck et al. \(2021\)](#) sowohl für Schleswig-Holstein ($\text{MWh}/(\text{km}^2 \times \text{a})$) als auch für die Stadt Kiel ($\text{MWh}/(\text{ha} \times \text{a})$) erstellt und publiziert. Sie werden im Rahmen dieser Visualisierungsstudie als Textur auf der topografischen Oberfläche dargestellt. Dies ermöglicht eine Einordnung der Daten bei gleichzeitiger Sichtbarkeit der (animierten) ATEs-Simulation und des für den untersuchten Stadtteil dargestellten Gebäudebestandes¹⁵, der etwa 3500 Gebäude umfasst und ebenfalls vollständig in 3D modelliert wurde (siehe [Abb. 7.12](#)).

Das Ergebnis dieser Visualisierungsstudie zeigt die integrierte Darstellung von über 30 strukturell heterogenen Datensätzen in einem einheitlichen geografischen Kontext. Die Anwendung kann interaktiv erkundet werden und Zusatzinformationen in Form von verlinkten Inhalten können mittels Eingabegeräten aufgerufen werden. Das erstellte System kann somit zur Information verschiedener Zielgruppen (z. B.

¹⁵ Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein, 3D-Gebäudemodell LoD1, 2019.

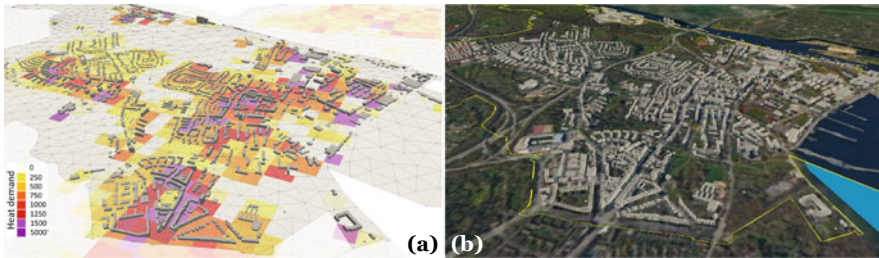


Abb. 7.12 Darstellung der Gebäude für einen Stadtteil von Kiel. **a** zeigt die triangulierte Geländeoberfläche der Stadt Kiel. Die Einfärbung der Oberfläche entspricht dem Wärmebedarf in $\text{MWh}/(\text{ha} \times \text{a})$. Zusätzlich dargestellt werden 3D-Modelle des gesamten Gebäudebestandes des betrachteten Stadtteils. **b** 3D-Modelle der Gebäude im Kontext eines Luftbildes der Stadt Kiel (Google, GeoBasis-DE/BKG ©2009). Die in gelb dargestellte Linie markiert die Grenze des betrachteten Stadtteils

Entscheidungsträger, Wissenschaftler, interessierte Öffentlichkeit) genutzt werden. Eine ausführliche Beschreibung der hier zusammengefassten Inhalte wurden von [Rink et al. \(2022\)](#) in der Fachzeitschrift *Geothermal Energy* veröffentlicht. Die verwendeten Methoden zu Konversion, Integration und Visualisierung der Daten wurden allgemeingültig implementiert, sodass sie für die Erstellung weiterer Visualisierungsprojekte basierend auf einer ähnlichen Datenbasis genutzt werden können.

7.2 Gestaltung eines Entscheidungshilfesystems

Für die Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems müssen zunächst alle Prozesse und Einflussgrößen, die in einen Planungsprozess einer Erdwärmeanlage eingehen, betrachtet werden. Im Folgenden werden alle Planungsschritte dargelegt. Diese sind zusätzlich in [Tab. 7.1](#) zusammengefasst.

Zu Beginn eines Projektes wird geprüft, ob eine Erdwärmenutzung eine sinnvolle Alternative zu konventionellen Systemen sein kann und der Primärenergiebedarf wird berechnet. In diesen Prozess fließen u. a. Informationen zu bestehender Infrastruktur, klimatische Daten, Nutzungsangaben und Materialdaten ein. Diese Überprüfung erfolgt meist durch Planer für TGA oder Energieplaner. Wurde in diesem Schritt entschieden, dass eine Nutzung oberflächennaher Geothermie in Betracht gezogen werden sollte, wird im nächsten Schritt die Machbarkeit am Standort geprüft. Dazu zählt eine Vorprüfung der Genehmigungsfähigkeit, die Klärung der Geologie, Hydrogeologie und Hydrologie, eine Auswertung der Bedarfsplanung und eine Plausibilitätsprüfung der Daten. Dies erfolgt anhand von öffentlich zur Verfügung stehenden Daten bzw. in Rücksprache mit der Unteren Wasserbehörde, dem Geologischen Dienst und in manchen Fällen auch dem zuständigen Bergamt. Auf Grundlage der verfügbaren Daten werden eine Voreinschätzung der hydrogeologischen Standortbedingungen durchgeführt, eine Abschätzung der relevanten geothermischen Un-

Tab. 7.1 Planungsschritte geothermischer Anlagen

Lfd.Nr.	Beschreibung	Daten	Datenquellen	Regularien
1	<p>Grundlagenermittlung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prüfen, ob Geothermie eine sinnvolle Alternative zu konventionellen Systemen sein kann. Berechnung des Primärenergiebedarfs. 	<ul style="list-style-type: none"> • geometrische Gebäudedaten • Materialdaten • klimatische Daten • Nutzungangaben 	TGA-Planung	<p>GEG</p> <p>DIN V 18599 DIN V 4701 DIN V 4108</p>
2	<p>Machbarkeit prüfen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auswertung der Bedarfsplanung • Vorprüfen der Genehmigungsfähigkeit • Klärung Geologie, Hydrogeologie, Hydrologie durch Recherche und Auswertung von öffentlichen Datenbanken und Planungsunterlagen sowie -karten • Plausibilitätsprüfung von Daten • Zusammenstellung und Voreinschätzung der hydrogeologischen Standortbedingungen auf der Grundlage der verfügbaren Daten und Unterlagen • Ermittlung Projektrisikofaktoren (z. B. Altlasten, Kampfmittel, Leitungen, Altbergbau) • Ermittlung Erkundungsbedarf • Abschätzung relevanter geothermischer Untergrundparameter 	<ul style="list-style-type: none"> • geologische Karten • hydrologische Karten • Bohrprofile • Karten von Naturschutzgebieten • Altbergbau • Wasserschutzgebiete • Altlasten • Kampfmittel • Anfrage zu Restriktionen der Bohrtiefe 	<p>Staatliche Geologische Dienste Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Umweltbundesamt</p> <p>Bergbehörde Wasserbehörde</p>	<p>Bundesberggesetz (BBergG) Wasserhaushaltsgesetz (WHG)</p> <p>Landeswassergesetze</p> <p>Standortauswahlgesetz (StandAG)</p>

(Fortsetzung)

Tab. 7.1 (Fortsetzung)

Lfd.Nr.	Beschreibung	Daten	Datenquellen	Regularien
3	<p>Vorplanung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variantendiskussion und Vorschlag technisch machbarer Vorzugslösungen • Vordimensionierung der Geothermieanlage und der diesbezüglichen Tiefbauarbeiten • Planung und Begleitung von weiteren Erkundungsarbeiten (z. B. TRT, Geophysik) • Einschätzen der Randbedingungen (z. B. Platzangebot am Standort) • Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/Kostenschätzung • Abstimmung mit fachlich Beteiligten • Errichtung einer Pilotbohrung in der später vorgesehenen Konfiguration inkl. Ausbau zur Erdwärmesonde und Hinterfüllung mit thermisch verbessertem Material • Durchführung geothermischer Testarbeiten (TRT, Temperaturprofilmessungen) an der ersten Bohrung 	<ul style="list-style-type: none"> • energetische Daten • Wärmeleitfähigkeit • Grundstücksplan • Eingangswerte der Kostenschätzung • Temperaturprofil 	<p>TGA – Planung</p> <p>TRT</p> <p>Architekt</p> <p>Erfahrungswerte; Berechnung Vordimensionierung</p> <p>Temperaturprofilmessung</p>	<p>Leitfäden der Länder</p> <p>VDI 4640</p>
4	<p>Entwurfsplanung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nachweis des thermischen Leistungsvermögens des Untergrundes bzw. der geothermischen Anlage durch Berechnungen auf Basis der Datensammlungen aus den vorherigen Planungsphasen 	<ul style="list-style-type: none"> • Update der Vorplanung mit verfeinertem Detaillierungsgrad der Planung 	<p>TGA – Planung</p>	<p>Leitfäden der Länder</p>

(Fortsetzung)

Tab. 7.1 (Fortsetzung)

Lfz.Nr.	Beschreibung	Daten	Datenquellen	Regularien
	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgabe von Anzahl und Dimension der geothermischen Bauwerke • Umsetzung des Konzeptes in Arbeitsschritte, Kostenberechnung • Konzeption eines Messprogramms zur Betriebsoptimierung der Wärmepumpenanlage und Erfüllung ggf. erforderlicher behördlicher Auflagen zum Temperaturmonitoring im Untergrund 		Architekt	VDI 4640
5	<p>Genehmigungsplanung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verhandlung mit Behörden (z. B. Wasserbehörde, Bergbehörde) • Erarbeiten von Anträgen auf Ausnahmen und Befreiungen • Erarbeiten der wasserrechtlichen und bergrechtlichen Antragsunterlagen • Erarbeiten und Einreichen der Bohranzeige • Bearbeiten von Anforderungen der Genehmigungsbehörden (z. B. Betriebsplanverfahren) • Modellierung des Wärmeaustausches/der Temperaturverteilung im Sondenfeld zur Bewertung der nachbarschaftlichen Beeinflussung (erforderlich für Berücksichtigung von Grundwassereinfluss, Temperaturniveau für Heiz- und Kühlbetrieb), mögliches Simulationsprogramm: FEFLOW 	<ul style="list-style-type: none"> • bundeslandabhängige Anträge Bsp.: Auszüge aus Karten 	Landesämter; vorangegangene Schritte	Landeswassergesetze Bundesberggesetz (BBergG) Wasserhaushaltsgesetz (WHG) Standortauswahlgesetz (StandAG) VDI 4640 DVGW W120-2

(Fortsetzung)

Tab. 7.1 (Fortsetzung)

Lfd.Nr.	Beschreibung	Daten	Datenquellen	Regularien
6	<p>Ausführungsplanung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durcharbeiten der Ergebnisse der vorhergehenden Arbeitsschritte zur ausführungsfähigen Lösung • Einarbeitung von Auflagen und Hinweisen aus den Genehmigungsverfahren • Festlegung der Bohransatzpunkte, Darstellung mit Vermaßung und Bezugspunktfestlegung • Abstimmung mit beteiligten Gewerken (insbesondere Haustechnik, Tiefbau, Freiflächen) • Festlegung der Abmessungen und Parameter sowie des Vorgehens bei der Umsetzung der Errichtung der Anlage (z. B. Anschluss der Geothermieysteme, Verteilsysteme) • Fortschreiben der Ausführungsplanung während der Ausführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflagen und Nebenbestimmungen aus Genehmigungen • detaillierterer Grundstückssplan 	<p>Genehmigungsunterlagen</p> <p>Architekten</p>	
7	<p>Örtliche Bauüberwachung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Begleitung der Bohrarbeiten (z. B. Einweisung des Bohrrtrupps, operative Entscheidungen zum Ausbau und Bohrungsabbruch, ggf. Mitwirken bei Abnahmen geothermischer Anlagen) • Auswertung von Erkenntnissen aus den Bohrarbeiten • Überprüfung der Einhaltung der Leistungsbeschreibung, der Vorschriften und der allgemein anerkannten Regeln der Technik 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflagen und Nebenbestimmungen aus Leitfäden oder Genehmigungen 	<p>Leitfäden</p> <p>Genehmigungsunterlagen</p>	<p>DVGW W120-2</p>

(Fortsetzung)

Tab. 7.1 (Fortsetzung)

Lfd.Nr.	Beschreibung	Daten	Datenquellen	Regularien
	<ul style="list-style-type: none"> • Mitwirken bei der Mängelfeststellung, Mitwirken beim überwachen der Mängelbeseitigung • Mitwirken bei der Rechnungsprüfung 			
8	<p>Objektbetreuung und Dokumentation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mängelfeststellung, überwachen der Mängelbeseitigung vor Fristablauf für Mängelansprüche • Objektbegehung zur Mängelfeststellung vor Ablauf der Verjährungsfrist • Mitwirkung bei der Freigabe von Sicherheitsleistungen • Prüfung der Revisionsunterlagen des Bohrunternehmens auf Vollständigkeit und Einreichung der Dokumentation bei den zuständigen Behörden • Umsetzung und Durchführung von Messprogrammen (Monitoring) • Begleitung der Einregulierphase (z.B. hydraulischer Abgleich), ggf. Anpassung aufgrund geänderter Nutzerverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflagen und Nebenbestimmungen aus Leitfäden oder Genehmigungen 	<p>Leitfäden der Länder</p> <p>Genehmigungsunterlagen</p>	<p>VDI 4640</p> <p>Leitfäden der Länder</p>

tergrundparameter vorgenommen und mögliche Projektrisikofaktoren, wie Altlasten, Kampfmittel oder Altbergbau, ermittelt. In diesem Schritt wird bereits der Erkundungsbedarf beurteilt und mögliche Nebenbestimmungen, wie Bohrtiefenbegrenzungen oder die Nutzung von Wasser als Wärmeträgerfluid z. B. in Naturschutzgebieten abgefragt.

Bei einem positiven Ergebnis der Machbarkeitsstudie beginnt die Vorplanung. Auf Grundlage des vom TGA-Planer übermittelten Energiebedarfs des Gebäudes bzw. der Gebäude wird beispielsweise mittels der Software Earth Energy Designer (EED) eine Vordimensionierung der Geothermieanlage einschließlich einer Variantendiskussion und einem Vorschlag einer technisch umsetzbaren Vorzugslösung durchgeführt. Nach Festlegung einer anvisierten Bohrtiefe für das Gesamtsondenfeld wird der Genehmigungsprozess für eine Pilotbohrung für geophysikalische Erkundungen angeschoben. Dieser erfolgt in den meisten Bundesländern über ein jeweiliges Online-Portal, über welches die eingereichten Unterlagen direkt den zuständigen Behörden übermittelt werden. Die Genehmigung der Pilotbohrung kann einen Zeitraum von wenigen Wochen bis zu mehreren Monaten benötigen, je nachdem wie viele Behörden einbezogen werden müssen. Nach Erhalt des wasserrechtlichen Bescheides zur Errichtung der Probebohrung und der erfolgreichen Errichtung ebendieser durch ein DVGW W120-2 zertifiziertes Bohrunternehmen inklusive EWS und Hinterfüllung mit empfohlener Weise thermisch verbessertem Material werden geothermische Testarbeiten (Thermal-Response-Test (TRT), Temperaturprofilmessung) und gegebenenfalls weitere geophysikalische Untersuchungen an der ersten Bohrung durchgeführt. Aus dem Bescheid für die Pilotbohrung können gegebenenfalls Informationen für die weitere Planung gezogen werden. So kann z. B. auf eine Bohrtiefenbegrenzung, eine Einschränkung der Erdwärmesondenanlage auf einen bestimmten Bereich des Grundstückes oder den Bedarf von sulfatbeständigem Material hingewiesen werden. Auch die Vorgabe von zusätzlichen geophysikalischen Messungen oder der Verwendung von magnetisch dotiertem Material inklusive Nachweisführung kann diesem Genehmigungsbescheid entnommen werden.

Nach Beendigung und Auswertung der TRT-Messung wird mit den neu gewonnenen Erkenntnissen zu effektiver Wärmeleitfähigkeit und Untergrundtemperatur die bisherige Planung angepasst und ein Nachweis des thermischen Leistungsvermögens des Untergrundes geführt. In diesem Planungsschritt wird gegebenenfalls die Bohrtiefe der EWS auf Basis der Erkenntnisse aus der Pilotbohrung angepasst. So kann es z. B. zu einer Verkürzung der ursprünglich geplanten Länge der EWS bei Auftreten von artesisch gespanntem Grundwasser oder geologischen Besonderheiten, wie instabilen Aufrüftungszonen, kommen. Eine Verlängerung der geplanten EWS-Länge nach Errichten der Pilotbohrung ist eher unüblich. Nach Berechnung der Anzahl und Dimension des Erdwärmesondenfeldes erfolgt eine erste Kostenberechnung anhand von marktüblichen Preisen. Ebenfalls in dieser Planungsphase erfolgt die Konzeption eines Messprogramms zur Betriebsoptimierung der Wärmepumpenanlage und zur Erfüllung möglicher behördlicher Auflagen zum Anlagen- und Temperaturmonitoring im Untergrund. Nach Fertigstellung der Entwurfsplanung erfolgt die Antragstellung für eine Genehmigung für das Gesamtsondenfeld.

Die Genehmigungsplanung umfasst Gespräche und Verhandlungen mit den zuständigen Behörden (z. B. Wasserbehörde, Bergbehörde) im Namen des Bauherren sowie das Erarbeiten von Anträgen auf Ausnahmen und Befreiungen. Die Hauptaufgabe liegt hierbei in der Erarbeitung von wasserrechtlichen und bergrechtlichen Antragsunterlagen sowie dem Einreichen der Bohranzeige. Bei Quartieren und größeren Geothermieanlagen sowie in Gebieten mit bereits bestehenden Erdwärmeanlagen wird oftmals eine thermohydrodynamische Modellierung von der Genehmigungsbehörde gefordert. Dabei handelt es sich um eine 3D-Modellierung der Temperaturverteilung im Sondenfeld zur Bewertung der nachbarschaftlichen Beeinflussung. Dies ist für die Berücksichtigung des Grundwassereinflusses erforderlich. In den meisten Fällen wird dafür die Software FEFLOW verwendet.

Bereits während das Genehmigungsverfahren für das Gesamtsondenfeld läuft, wird mit der Ausführungsplanung begonnen. Es findet eine Festlegung der Bohrsatzpunkte sowie eine Vermaßung und Bezugspunktfestlegung derselben statt. Besonders in dieser Phase kommt es zu intensiven Abstimmungen mit den beteiligten Gewerken, insbesondere der TGA-Planung, dem Tiefbau und dem Außenflächenplaner. Dabei wird vor allem nach Kollisionspunkten mit anderen Gewerken gesucht und diese beseitigt. Es werden Abmessungen und Parameter für Rohrleitungen und Verteilerbauwerke festgelegt. Zudem wird das Vorgehen für die Umsetzung der Errichtung der Anlage festgelegt und mit dem Bauzeitenplan abgestimmt. Sobald die Genehmigungsunterlagen mit allen Anlagen zur Verfügung stehen, werden mögliche Auflagen und Hinweise in die Planung aufgenommen und umgesetzt. Anschließend werden alle für die Errichtung der Geothermieanlage erforderlichen Leistungen ausgeschrieben. Nach einer Prüfung und Auswertung aller erhaltenen Angebote sowie gegebenenfalls einer Plausibilitätsprüfung und Bietergesprächen wird durch den Bauherren ein Bohrunternehmen vertraglich gebunden. Während der Errichtung des Sondenfeldes empfiehlt es sich, örtliche sowie – falls gefordert – geologische Bauüberwachungen durchzuführen. Dabei erfolgt eine Begleitung der Bohr- und Ausbaurbeiten. Während dieser können operative Entscheidungen bis hin zum Bohrungsabbruch nötig werden. Hauptaufgaben sind die Auswertung von Erkenntnissen aus den Bohrarbeiten, die Überprüfung der Einhaltung der Leistungsbeschreibung, der Vorschriften und den allgemein anerkannten Regeln der Technik. Bei möglichen Mängeln findet eine Mängelfeststellung und anschließend eine Überwachung der Beseitigung dieser statt. Zum Schluss wird die geothermische Anlage abgenommen und es wird eine Rechnungsprüfung sowie eine Prüfung der Revisionsunterlagen des Bohrunternehmens auf Vollständigkeit durchgeführt. Bei Vollständigkeit wird die Dokumentation bei den zuständigen Behörden eingereicht. Vor Inbetriebnahme, aber auch bei Veränderungen im Nutzerverhalten, wird eine Einregulierung (z. B. hydraulischer Abgleich) des Systems durchgeführt. Diese wird durch eine fachkundige Person begleitet.

Während des Betriebs der Anlage wird z. B. in Berlin die Betreuung des Objektes durch einen Betriebsbeauftragten gefordert. Dieser setzt das mit der Behörde abgestimmte Monitoringkonzept um und führt das Messprogramm sowie eine Auswertung desselben durch. Die Ergebnisse werden, falls gefordert, den zuständigen Behörden, aber auf jeden Fall dem Betreiber der Anlage in regelmäßigen Abständen

übergeben. Für den Fall, dass während des Betriebes Mängel auftreten, werden diese festgestellt und es findet eine Überwachung der Mängelbeseitigung statt.

Besonders in den frühen Konzeptstudien und Planungsphasen werden Daten benötigt, die durch die Staatlichen Geologischen Dienste, den Deutschen Wetterdienst, Wasser- und Bergbehörden sowie das Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt werden. In den einzelnen Bundesländern herrschen teilweise große Unterschiede in den frei verfügbaren Daten und dem Zugriff auf dieselben. Zum Teil kann online auf die gesuchten Daten zugegriffen werden, teilweise muss eine Anfrage auf Daten in einem bestimmten Gebiet oder einen speziellen Datensatz gestellt werden. Letzteres führt zu Mehrarbeit bei den zuständigen Behörden und zu manchmal erheblichem Zeitverzug in der Bearbeitung eines Projektes. Zu begrüßen ist hier die Erdwärmekampagne „Geothermie für die Wärmewende“ ([BMWK Pressemitteilung 2022](#)) des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), in welcher mit einer Datenkampagne die Verbesserung der Datenlage insbesondere für die oberflächennahe Geothermie durchgeführt werden soll. Der Projektpartner geoENERGIE Konzept bearbeitet gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der Georg-August-Universität Göttingen im Forschungsprojekt WärmeGut „Flankierung des Erdwärmepumpen-Rollouts für die Wärmewende durch bundesweite, einheitliche Bereitstellung von Geoinformationen zur oberflächennahen Geothermie in Deutschland“ genau diese Fragestellung.

Wie in Abschn. 4.1 dargelegt, hat die Kenntnis über die ungestörte Untergrundtemperatur T_{geo} den größten Einfluss auf die Dimensionierung einer Erdwärmesondenanlage. Bei der Erkundung eines Standortes sollte somit besonderes Augenmerk auf der Ermittlung dieser liegen bzw. sollte sie durch eine detaillierte Modellierung bestimmt werden. Aus diesem Grund ist es ratsam, je nach Größe des Sondenfeldes eine bzw. mehrere Pilotbohrungen zu realisieren, um die ungestörte Untergrundtemperatur zu bestimmen. Den zweitgrößten Einfluss auf die Berechnungen hat der Jahresenergiebedarf Q . Zur Berechnung von Q werden u. a. das Alter des Gebäudes und die Dämmstandards zurate gezogen. Die große Unbekannte ist jedoch das Nutzerverhalten, welches einen signifikanten Einfluss auf den Heiz- und Kühlbedarf eines Gebäudes oder eines Quartiers hat. Aufseiten der Haustechnik sollten deshalb entsprechend Sicherheiten mit einberechnet werden. Als dritte einflussreiche Größe wurde die Mächtigkeit des von Grundwasser durchströmten Bereichs der Sonde detektiert. Dieser Parameter hat nicht nur einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einer Erdwärmesondenanlage, sondern auch auf die Genehmigungsfähigkeit. Bei größeren Anlagen muss oftmals mit einer thermohydrodynamischen Modellierung nachgewiesen werden, wie groß der Einfluss einer Sondenanlage auf die umliegenden Grundstücke ist. Bei Grundwasserfluss bildet sich eine Kälte- bzw. Wärmefahne aus. Je nach Bundesland gelten unterschiedliche Temperaturabweichungen ΔT von der ungestörten Untergrundtemperatur an der Grundstücksgrenze.

7.3 Empfehlungen zur Anpassung regulativer Rahmenbedingungen

Bei der Errichtung einer Erdwärmeanlage müssen verschiedene Gesetze beachtet werden. Zu diesen zählen das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), das Bundesberggesetz (BergG), die Landeswassergesetze und das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG). Auch wenn es sich bei diesen größtenteils um Bundesgesetze handelt, so werden diese in leicht veränderter Form in den Bundesländern umgesetzt. Abhängig vom Standort des Bauvorhabens können aus diesem Grund die geltenden Regularien variieren. Diese haben Einfluss auf die Form eines Genehmigungsantrages, die Dauer des Genehmigungsprozesses und möglichen Nebenbestimmungen.

Hinsichtlich der Regularien für oberflächennahe Geothermie in Deutschland gibt es von den Bundesländern bereitgestellte Informationen. Diese werden in Form von Leitfäden oder Merkblättern dargestellt und sind frei verfügbar. Sie sollen Bauherren und Planern für die jeweiligen Projekte Vorgaben schaffen, um den Prozess so reibungslos wie möglich zu gestalten. Je nach Bundesland gibt es jedoch gravierende Unterschiede in Bezug auf Inhalte und Umfang. Die Leitfäden sind in erster Linie für Planungsprojekte < 30 kW erstellt worden. Für Großprojekte gibt es vermindert Informationen, meist wird auf die entsprechenden Ämter verwiesen. Grundsätzlich basieren die Leitfäden auf den Gesetzesgrundlagen des Bundes und der Bundesländer und insbesondere der VDI-Richtlinie 4640. Im Folgenden werden inhaltlich wiederkehrende Themen der Leitfäden in tabellarischer Form nach verschiedenen Kriterien verglichen. Weiterhin gibt es im Zusammenhang mit den aufgeführten Kriterien einen umrisshaften Einblick in die VDI 4640, welche den aktuellen Stand der Technik zur thermischen Nutzung des Untergrundes widerspiegelt. Für eine genauere Einordnung zeigt Tab. 7.2 die Erscheinungsdaten der als Grundlage verwendeten Leitfäden (und gegebenenfalls Merkblätter).

7.3.1 Abstandsregelungen

In der nachfolgenden Tab. 7.3 sind Abstandsregularien aufgeführt, die in der Mehrheit der Leitfäden zu finden sind. Regelungen für Abstände sind in erster Linie in thermodynamischen Wechselwirkungen begründet. Bei geringen Abständen können

Tab. 7.2 Erscheinungsjahre der Leitfäden der Bundesländer

BW	BY	BE	BB	HB	HH	HE	MV
2005	2012	2020	2009	k.A.	2021	2019	2015
NI	NRW	RP	SL	SN	ST	SH	TH
2017	2019	2020	2008	2015	2012	2011	2013

Tab. 7.3 Abstandsregelungen gemäß den Leitfäden der Länder. Freie Felder zeigen an, dass keine Aussagen getroffen wurden

	Sondenabstand	Abstand Sonden zu Grundstücksgrenzen	Abstand Bohrungen zu Gebäuden	Zusätzliche Abstandsregelungen
BW	10 m			
BY	6 m/10 m	3 m/5 m		✓
BE	6 m	5 m	2 m	✓
BB	5 m/6 m		1 m	
HB		5 m		
HH	5 m/6 m	5 m	2 m	✓
HE	5 m/6 m	5 m		
MV	5 m/6 m	5 m		
NI	5 m	5 m		
NRW	6 m	3 m		✓
RP	5 m			
SL	>5 m	5 m	2 m	✓
SN	5 m/ 6m	5 m		
ST	6 m	5 m		✓
SH	5 m/6 m	5 m/6 m		
TH	5 m/6 m	5 m		

Sonden sich gegenseitig beeinflussen, was zu einer Absenkung der Effizienz führen kann (VDI 4640-1 2010).

Diese Beeinflussung betrifft sowohl die Sonden einer geothermischen Anlage als auch die Leistung geothermischer Anlagen untereinander, die in räumlicher Nähe zueinander errichtet wurden. Maßregelungen für diese Sachverhalte sind in fast allen Leitfäden vorhanden. Der Abstand zu geothermischen Anlagen benachbarter Grundstücke wird insofern geregelt, dass häufig eine Angabe zum Abstand zu Grundstücksgrenzen getroffen wird. In vielen Bundesländern ist eine Abweichung von dieser Regel möglich, insofern eine ausdrückliche (schriftliche) Zustimmung des benachbarten Grundstückseigentümers vorliegt und gegebenenfalls eine Absprache mit Behörden getroffen wird.

Weiterhin werden Abstände von Bohrungen zu Gebäuden sowie zusätzliche Abstandsregelungen aufgeführt. Zusätzliche Abstandsregelungen betreffen beispielsweise Abstände zu Ver- und Entsorgungsleitungen, Fernwärmeleitungen oder Anlagen zur Lagerung wassergefährdender Stoffe. Diese sind zumeist in verschiedenen weiteren DIN-Normen geregelt und sporadisch in den Leitfäden mit aufgeführt.

Die VDI 4640-2 (2019) besagt, dass der „thermische Einfluss von kleineren Erdwärmesondenanlagen (z. B. bis zu fünf Bohrungen) ist in einem Abstand von 10 m auch längerfristig nicht signifikant (unter 1 K)“. Daher wird es als zweckmäßig beschrieben, den Abstand zu Anlagen auf benachbarten Grundstücken mit mindestens 10 m zu bemessen. Weiterhin wird in Bezug auf Bohrungen zwecks Standsicherheit ein Mindestabstand von 2 m zu bestehenden Gebäuden empfohlen.

7.3.2 Bohrlochdurchmesser

Für die Gewährleistung einer ordnungsgemäßen Hinterfüllung sind die Bohrlochdurchmesser reguliert. Dabei ist hinreichend Platz zwischen Sondenbündel und Bohrlochdurchmesser sicherzustellen. Zumeist unterscheiden sich die Bundesländer hier zwischen 60 mm (2 × 30 mm an den Seiten) und 80 mm (jeweils 40 mm) Ringraum (vgl. Tab. 7.4). Dies ist auf die Abhängigkeit von der Geologie zurückzuführen.

Tab. 7.4 Vorgaben zum Bohrlochdurchmesser gemäß den Leitfäden der Länder

	Sondendurchmesser + 60 mm	Sondendurchmesser + 80 mm	Andere
BW			mind. 120 mm ^a
BY			mind. 150 mm ^b
BE			k.A.
BB			„ausreichend“ ^c
HB	✓		
HH		✓	
HE	✓		
MV	✓		
NI	✓		
NRW		✓	
RP			Sondendurchmesser + 30 mm
SL	✓		
SN	✓		
ST	✓		
SH		✓	
TH			k.A.

^afür die Standard Doppel-U-Sonde DN 32
^bohne Innenabstandshalter
^c[...]für ordnungsgemäße Ringraumabdichtung

Für den häufigsten Sondentyp, die Doppel-U-Sonde aus 32 mm-Rohren mit einem 25 mm-Hinterfüllrohr in der Mitte, entspricht dies einem Bohrlochdurchmesser von mindestens 150 mm bzw. 152 mm (gemäß Größe des Bohrmeißels).

7.3.3 Prüfregelungen

Während des Installationsprozesses und der Inbetriebnahme der Anlagen sind verschiedene Prüfungen notwendig. Diese sind in der [VDI 4640-2 \(2019\)](#) beschrieben. Es sind zumeist drei Stück an der Zahl.

Zunächst werden die Sonden werksseitig geprüft und diese Prüfung dokumentiert. Weiterhin besteht die Empfehlung (E) einer Durchflussprüfung vor dem Einbau der Sonden. Im weiteren Verlauf ist eine Druckprüfung der mit Wasser befüllten Sonde notwendig, welche der Empfehlung nach vor dem Hinterfüllen des Ringraumes geschehen sollte. Es besteht die Möglichkeit, diese Druckprüfung nach der Hinterfüllung durchzuführen, jedoch ist es zwingend erforderlich, dass diese vor dem Abbinden des Hinterfüllmaterials erfolgt. In den Leitfäden wird in den meisten Fällen auf die Druckprüfung nach der Hinterfüllung verwiesen. In der Praxis hingegen wird hier entgegen den Leitfäden zumeist die Druckprüfung vor dem Verfüllen des Ringraumes durchgeführt, da durch die Prüfung ein minimaler Spalt im Füllmaterial entstehen kann.

Zuletzt ist eine Prüfung des Gesamtsystems vor Inbetriebnahme obligatorisch. Dokumentationen der Prüfungen werden in den meisten Leitfäden als zwingend erforderlich genannt. Die Texte der Leitfäden verweisen zumeist auf die [VDI 4640-2 \(2019\)](#) als Grundlage. In der Tab. [7.5](#) wird aufgeführt, welche Prüfungen explizit genannt werden.

7.3.4 Betrieb

Die Leitfäden stellen sowohl für Bauherren und Planer als auch für Betreiber der Anlagen Richtlinien dar, nach denen die Anlage betrieben werden soll.

Zumeist müssen Überwachungssysteme installiert werden, um sicherzustellen, dass keine umweltschädlichen Flüssigkeiten, wie der leicht wassergefährdende Stoff Monoethylenglycol, in den Untergrund gelangen. Dahingehend fordern die meisten Bundesländer den Einsatz von LW. Diese sind selbsttätig, d. h. im Störfall, also bei Austritt von Flüssigkeit aus der Anlage, findet eine Signalabsendung statt und die Anlage wird sofort abgeschaltet. Je nach Bundesland gibt es ebenfalls Richtlinien hinsichtlich der Überwachung von Frosterscheinungen. Heutzutage sind in den meisten Wärmepumpen sowohl Leckage- als auch Frostwächter bereits integriert. Tab. [7.6](#) gibt einen Einblick in die Regularien der Bundesländer hinsichtlich der Vorgaben für den Betrieb der Anlagen, mit den einhergehenden Wartungen. Der vorgeschriebene Turnus für die Kontrollen der Wächter variiert sehr stark zwischen den einzelnen Bundesländern. In BW und TH z. B. soll eine Kontrolle der Wächter monatlich, in HH jährlich und in BE, HE und SL alle 5 Jahre stattfinden. In den meisten Bundesländern

Tab. 7.5 Prüfregelungen gemäß den Leitfäden der Länder

	werksetzige Prüfung	Durchflussprüfung vor Einbau	Druckprüfung nach Einbau, vor Hinterfüllung	Druckprüfung nach Hinterfüllung, vor Abbinden	Prüfung vor Inbetriebnahme
VDI 4640	✓	E ^a	E ^a	✓	✓
BW		✓		✓	✓
BY	✓	E ^a		✓	
BE	✓			✓	✓
BB		✓		✓	
HB	analog VDI 4640				
HH	✓			✓	✓
HE				✓	✓
MV	✓			✓	
NI	✓	x ^b	x ^b	✓	✓
NRW	✓			✓	✓
RP	analog VDI 4640				
SL	✓	✓			✓
SN	✓			✓	
ST	✓			✓	
SH	✓			✓	✓
TH	✓			✓	✓

^aEmpfehlung
^bentweder oder

sind diese Kontrollen vom Betreiber oder/und einem Fachbetrieb durchzuführen. In HE muss die Kontrolle bei einer Anlage im Bereich gewerblicher Wirtschaft oder öffentlicher Einrichtungen durch eine nach § 22 Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS) anerkannte sachverständigende Stelle erfolgen.

7.3.5 Empfehlungen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, variieren die Vorgaben und Regelungen bezüglich der Errichtung und dem Betrieb von Erdwärmesonden in den

Tab. 7.6 Wartungen und Wächtervorgaben gemäß den Leitfäden der Länder

	Wächter	Wartungen
BW	Druck-Strömungswächter	Monatliche Kontrolle der Wächter
BY	Selbsttätige Leckagewächter (LW)	
BE	Selbsttätige LW	Kontrolle durch Fachbetrieb (alle 5 Jahre oder nach Austausch); regelmäßige Prüfung der Anlage durch Betreiber
BB	LW	Regelmäßige fachgerechte Wartung
HB	k.A.	k.A.
HH	Selbsttätige LW ggf. Thermowächter	Regelmäßige Wartung; Empfehlung 1x jährlich oder nach Austausch durch Fachbetrieb
HE	Nicht manipulierbarer Frostwächter ^a ; selbsttätige LW ^b	Nach wesentlichen Änderungen oder alle fünf Jahre oder bei Stilllegung durch eine nach § 22 Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS) anerkannte sachverständige Stelle ^c
MV	Selbsttätige LW	
NI	Selbsttätige LW	
NRW	Thermowächter im Zulauf	
RP	Selbsttätige Kontrolleinrichtung (ggf. im Wärmetauscher integrierte Druck-/Strömungswächter)	
SL	Probenentnahmestelle; Druckwächter	Alle 5 Jahre durch Fachbetrieb
SN	Selbsttätige LW	Regelmäßige Prüfung vom Betreiber
ST	k.A.	k.A.
SH	Manometer; selbsttätige LW; Temperaturwächter gegen Frost bei unter 0 °C	Kontrolle Sondenkreislauf und Leckageerkennungseinrichtung durch Betreiber
TH	Frostwächter; selbsttätige Überwachungs- und Sicherungseinrichtungen	Monatliche Kontrolle des Sondenkreislaufes und Wächter durch Betreiber; jährliche Wartung durch fachkundige Person

^ain wasserwirtschaftlich oder hydrogeologisch ungünstigen Gebieten

^bbei wassergefährdenden Stoffen

^cim Bereich gewerblicher Wirtschaft oder öffentlicher Einrichtungen

einzelnen Bundesländern mehr oder minder. Auch der Genehmigungsprozess, wie in Abschn. 7.2 dargelegt, ist stark vom Standort des Bauvorhabens abhängig. Die Gründe für die aufgezeigten Unterschiede sind vielfältig und teilweise nicht nachvollziehbar. Für die Erreichung der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung bedarf es einer Beschleunigung von Planung, Genehmigung und Umsetzung von Erdwärmesondenanlagen. Dafür ist eine Überarbeitung und Harmonisierung der Vorgaben der Bundesländer notwendig. Der Genehmigungsprozess sollte vollständig digita-

lisiert, vereinheitlicht und teilweise vereinfacht und beschleunigt werden. Bereits durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) für die Endlagersuche ausgeschlossene Gebiete sollten konsequent von einer Abfrage zur Erteilung des Einvernehmens beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit befreit werden. Die Bearbeitungszeit der Anfrage beim BASE von bis zu drei Monaten verzögert den Genehmigungsprozess in diesen Fällen unnötig. Wie durch das BMWK in dem „Eckpunktpapier für eine Erdwärmekampagne“ ([BMWK Eckpunktpapier 2022](#)) genannt, werden momentan durch eine Steuerungsgruppe Gesetzespakete identifiziert, die zur Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsverfahren beitragen. In Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten sollen hierbei Optimierungspotenziale identifiziert werden. Dieser Prozess ist für alle Teufenbereiche der Geothermie zu begründen.

7.4 Datenmanagement

Das Datenmanagement eines Forschungsprojekts wie EASyQuart beinhaltet die Entwicklung und Nutzung von Architekturen, Richtlinien, Praktiken und Verfahren für die konsistente Verwaltung von Daten während des gesamten Datenlebenszyklus der Projektpartner oder des Forschungsprojekts. Daten sind definiert als unterschiedliche Informationseinheiten wie Zahlen, Buchstaben und Symbole, die besonders formatiert sind und vom Computer verarbeitet werden können. Die Daten im Projekt werden von verschiedenen Akteuren bereitgestellt, die EASyQuart-Verbundpartner, deren gesetzliche Vertreter, Mitarbeiter oder externe Partner repräsentieren können.

Die langfristige und reproduzierbare Speicherung von Daten nimmt in der Forschung eine Schlüsselrolle ein. Insbesondere für Arbeitsprozesse mit verschiedenen beteiligten Akteuren stellt eine unkomplizierte und schnelle Verteilung relevanter Messdaten eine große Erleichterung dar. Die im Rahmen des Arbeitsschwerpunkts Monitoring erhobenen Daten wurden daher in eine interne Forschungsdatenplattform eingepflegt. Zum Zweck der Datenbereitstellung wurden zudem exemplarisch für einige Temperatursensoren Datenlogger mit der Möglichkeit zur Echtzeit-Fernübertragung der Messdaten genutzt und anschließend webbasiert visualisiert. [Abb. 7.13](#) zeigt vereinfacht den angewandten Workflow. Die Datenübertragung der verwendeten Logger erfolgt über das Mobilfunknetz auf einen ftp-Server und von dort auf die interne Plattform. Mittels der Open-Source-Anwendung Grafana¹⁶ können die Messdaten anschließend auf verschiedene Weise grafisch dargestellt und in Form eines Dashboards über das Internet abgerufen werden. Auch Messdaten, welche manuell erhoben werden, können nachträglich in das so erzeugte Dashboard integriert werden. Ein Beispiel für ein so im Rahmen von EASyQuart erstelltes Dashboard findet sich in [Abb. 7.14](#). Die getestete Routine zur Datenfernübertragung und Visualisierung gestaltet das Monitoring und die Bereitstellung der Messdaten we-

¹⁶ Grafana Labs Documentation: <https://grafana.com/docs/>, Stand 14 November 2022.

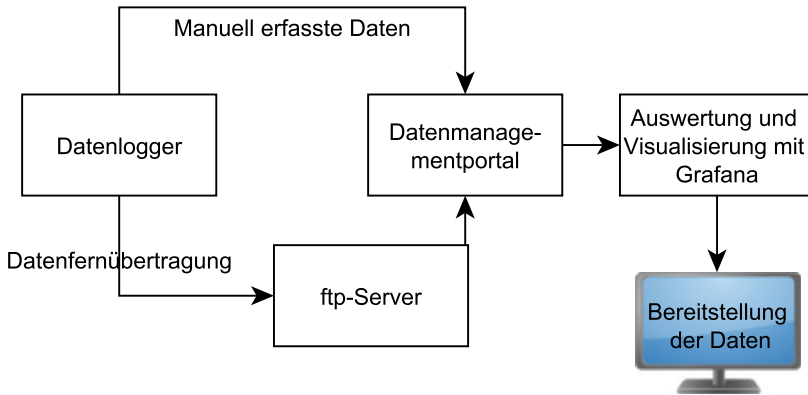


Abb. 7.13 Angewandter Workflow zur webbasierten Verarbeitung und Darstellung von Monitoringdaten

sentlich effizienter und gewährleistet zudem die nachhaltige Speicherung relevanter Datensätze. Ein weiterer Vorteil ist, dass eventuelle Fehler in der Datenaufzeichnung kurzfristig erkannt und behoben werden können.

Die Projektergebnisse umfassen neben Messreihen auch spezifische Daten aus Erkundungs- und Monitoringkampagnen unterschiedlicher Standorte, oberflächen-naher geothermischer Anlagen, Softwarekomponenten und Datensätze aus numerischen Simulationen, z. B. zu konkreten Standorten (d. h. Modell- und Ergebnisd Dateien). Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) verfügt über langjährige Erfahrung im Datenmanagement zur kooperativen Entwicklung von Open-Source Software (OpenGeoSys (OGS)) sowie zur Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Daten aus Experimenten auf verschiedenen Skalen, Erkundungs- und Monitoringkampagnen, numerischen Simulationen und wissenschaftlichen 3D-Visualisierungen. Ein wesentlicher Bestandteil von EASyQuart sind darüber hinaus Strukturen zur Softwareentwicklung sowie numerische Simulationen im Bereich des geologischen Untergrundes, der Haustechnik sowie deren Kopplung. Hinsichtlich der Nutzung der Simulationsplattform OGS für die Untergrundsimulationen, deren Entwicklung vom UFZ koordiniert und in die alle EASyQuart-Projektpartner eingebunden sind, steht den Partnern die am UFZ angesiedelte Simulations- und Entwicklungsinfrastruktur inklusive einer modernen Versionsverwaltung zur Verfügung. Im Projekt generierte Daten, einschließlich vorhandener Metadaten, werden hauptsächlich in einem zentralen Bereich der OGS-Plattform am UFZ verwaltet.

Da sich ein wesentlicher Teil der in EASyQuart entwickelten und verwendeten Softwarekomponenten auf nichtkommerzielle, wissenschaftliche Programmplattformen und Open-Source-Produkte bezieht, werden sie durch den jeweils verantwortlichen Partner über etablierte Source-Code-Hosting-Dienste (z. B. GitLab¹⁷) verwaltet

¹⁷ Für OGS ist etwa der gesamte Source Code und die Dokumentation via <https://gitlab.opengeosys.org> frei verfügbar.

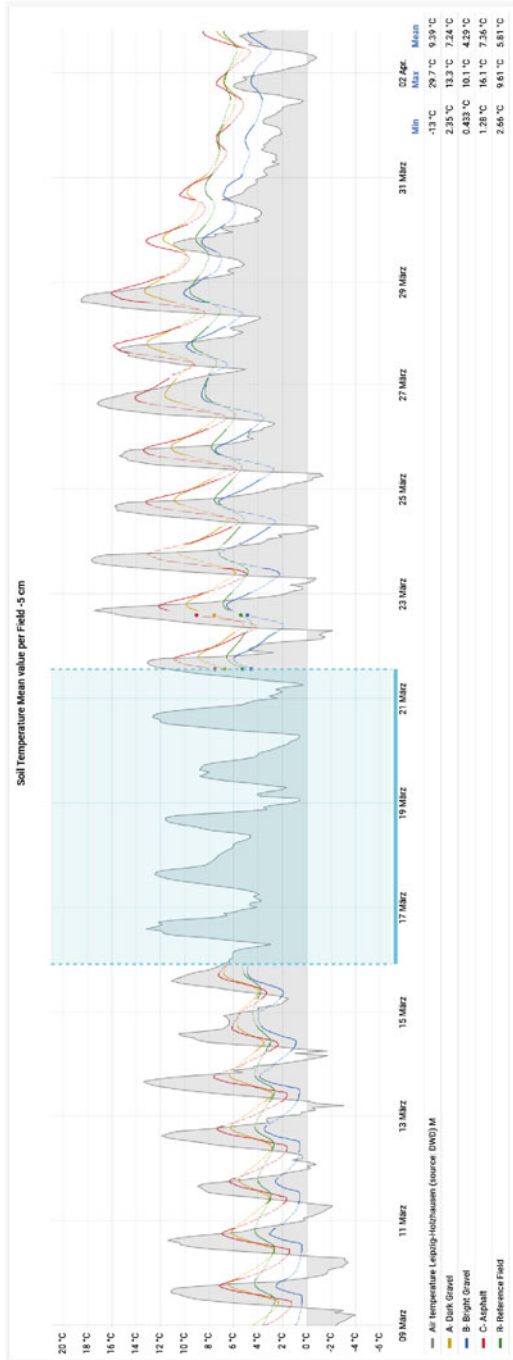


Abb. 7.14 Screenshot aus dem in EASyQuart erstellten Dashboard zur Echtzeitvisualisierung von Monitoringdaten

und öffentlich zugänglich gemacht. Ein möglicher öffentlicher Zugang zu Projektdaten, der über den *Status quo* hinausgeht, wie er in Fachpublikationen beschrieben wird, sowie der Umgang mit den Daten nach Projektende, ist in der Kooperationsvereinbarung zwischen den Projektpartnern geregelt.

Literatur

- BMWK Eckpunktpapier (2022) Eckpunkte für eine Erdwärmekampagne – Geothermie für die Wärmewende. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/eckpunkte-geothermie.html>. Zugegriffen: 17. Nov. 2022
- BMWK Pressemitteilung (2022) Geothermie für die Wärmewende – Bundeswirtschaftsministerium startet Konsultationsprozess. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/11/20221111-geothermie-fuer-die-waermewende.html>. Zugegriffen: 17. Nov. 2022
- Gasanzade F, Pfeiffer WT, Witte F et al (2021) Subsurface renewable energy storage capacity for hydrogen, methane and compressed air – a performance assessment study from the North German Basin. *Renew Sustain Energy Rev* 149(111):422. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111422>
- Geuzaine C, Remacle JF (2009) Gmsh: a 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities: the GMSH Paper. *Int J Numer Methods Eng* 79(11):1309–1331. <https://doi.org/10.1002/nme.2579>
- Graebing N, Şen ÖO, Bilke L et al (2022) Prototype of a virtual experiment information system for the Mont Terri underground research laboratory. *Frontiers Earth Sci* 10(946):627. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.946627>
- Kabuth A, Dahmke A, Beyer C et al (2017) Energy storage in the geological subsurface: dimensioning, risk analysis and spatial planning: the ANGUS+ project. *Environ Earth Sci* 76(1):23. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6319-5>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x>
- Randow J, Chen S, Lubashevsky K et al (2022) Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization: a case study in Berlin. *Geotherm Energy* 10:1. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00211-9>
- Rink K, Fischer T, Selle B et al (2013) A data exploration framework for validation and setup of hydrological models. *Environ Earth Sci* 69(2):469–477. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2030-3>
- Rink K, Bilke L, Kolditz O (2014) Visualisation strategies for environmental modelling data. *Environ Earth Sci* 72(10):3857–3868. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2970-2>
- Rink K, Chen C, Bilke L et al (2018) Virtual geographic environments for water pollution control. *Int J Digit Earth* 11(4):397–407. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1265016>
- Rink K, Nixdorf E, Zhou C et al (2020) A virtual geographic environment for multi-compartment water and solute dynamics in large catchments. *J Hydrol* 582(124):507. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124507>
- Rink K, Şen ÖO, Hannemann M et al (2021) A virtual geographic environment for the exploration of hydro-meteorological extremes. In: Workshop on visualisation in environmental sciences (EnvirVis), pp 51–59. <https://doi.org/10.2312/envirvis.20211084>
- Rink K, Şen ÖO, Schwanebeck M et al (2022) An environmental information system for the exploration of energy systems. *Geotherm Energy* 10:4. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00215-5>

- Schwanebeck M, Krüger M, Duttmann R (2021) Improving GIS-based heat demand modelling and mapping for residential buildings with census data sets at regional and sub-regional scales. *Energies* 14(4):1029. <https://doi.org/10.3390/en14041029>
- VDI 4640-1 (2010) Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte Blatt 1. Tech. rep
- VDI 4640-2 (2019) Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen Blatt 2. Tech. rep
- Yan C, Rink K, Bilke L et al (2019) Virtual geographical environment-based environmental information system for Poyang Lake Basin. In: *Chinese water systems*. Springer International Publishing, Cham, pp 293–308. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97725-6_18

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Fazit und Ausblick

8

Jakob Randow, Anke Bucher, Uwe-Jens Görke, Rüdiger Grimm, Nele Hastreiter, Olaf Kolditz, Katrin Lubashevsky, Simon Richter, Karsten Rink, Stephan Schönfelder, Haibing Shao, Thomas Vienken und H. Konstanze Zschoke

J. Randow (✉) · A. Bucher · K. Lubashevsky · S. Richter · S. Schönfelder
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, Deutschland
E-mail: jakob.randow@htwk-leipzig.de

A. Bucher
E-mail: anke.bucher@htwk-leipzig.de

K. Lubashevsky
E-mail: katrin.lubashevsky@htwk-leipzig.de

S. Richter
E-mail: simon.richter@htwk-leipzig.de

S. Schönfelder
E-mail: stephan.schoenfelder@htwk-leipzig.de

U.-J. Görke · N. Hastreiter · O. Kolditz · H. Shao · T. Vienken
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland
E-mail: uwe-jens.goerke@ufz.de

N. Hastreiter
E-mail: nele.hastreiter@ufz.de

O. Kolditz
E-mail: olaf.kolditz@ufz.de

H. Shao
E-mail: haibing.shao@ufz.de

T. Vienken
E-mail: thomas.vienken@ufz.de

R. Grimm · H. K. Zschoke
geoENERGIE Konzept GmbH, Freiberg, Deutschland
E-mail: grimm@geoenergie-konzept.de

H. K. Zschoke
E-mail: zschoke@geoenergie-konzept.de

N. Hastreiter · T. Vienken
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Technische Universität München, München, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

275

A. Bucher et al. (Hrsg.), *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze von Stadtquartieren*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-67140-5_8

8.1 Fazit

Ein wesentlicher Teil des Innovationsgehalts von EASyQuart besteht darin, offene wissenschaftliche Fragestellungen bei der Optimierung großflächiger oberflächennaher Geothermienetzwerke klären zu helfen (z. B. durch Anpassung, Entwicklung und Bewertung standort- und prozessbezogener Erkundungs- und Monitoringverfahren, Sensitivitätsstudien, numerische Unsicherheitsanalysen sowie gekoppelte Simulationen des Gesamtsystems Untergrund-Haustechnik). Zudem wurden exemplarisch konkrete Prognoseinstrumentarien zur standortbasierten Analyse der Versorgungs- und Bedarfsseite für verschiedene Arbeitsschritte eines Auslegungs- und Planungsprozesses oberflächennaher geothermischer Anlagen zum Heizen und Kühlen erstellt und mit Daten realer Standorte validiert. Auf dieser Basis konnten vom Verbundvorhaben Empfehlungen für die Flexibilisierung von Auslegungsverfahren und regulativen Rahmenbedingungen für Errichtung und Betrieb der betrachteten Systeme formuliert werden. Wesentliche Projektergebnisse wurden in einem Entscheidungshilfesystem als Handlungsleitfaden für relevante Akteure im Auslegungsprozess zusammengefasst. Dabei wurde besonderer Wert auf die Erhebung und Nutzung standortbezogener Daten für die Charakterisierung des Gesamtsystems aus Komponenten für den Untergrund sowie die Haustechnik gelegt. Die Forschungsergebnisse von EASyQuart bieten gewerblichen sowie behördlichen Nutzern Unterstützung bei der Erstellung von Prognosen zur Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Nutzungsoptionen des oberflächennahen geologischen Raumes vom Einzelgebäude bis zur Quartierslösung.

Ein Modellvergleich zwischen verschiedenen kommerziellen und wissenschaftlichen Softwareplattformen für die Simulation der Vorgänge im Untergrund mit Daten eines realen Standorts gibt Aufschluss über die optimale Gestaltung und Einsatzgebiete von numerischen Annahmen, Methoden und Algorithmen. Das entwickelte Instrumentarium für die Simulation der Prozesse im Untergrund und in der Haustechnik wurde im Sinne eines Proof-of-Concept-Ansatzes umfassend mit Daten verschiedener Standorte auch in Kooperation mit externen Partnern validiert.

Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit, München, Deutschland

O. Kolditz

Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

H. Shao

Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland

K. Rink

OpenGeoSys Kernentwicklerteam, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Deutschland

E-mail: karsten.rink@ufz.de

Die Projektergebnisse ermöglichen ein verbessertes Verständnis der Prozesse, der verwendeten Methoden und der anwendungsorientierten Instrumentarien für realistische Zeit- und Längenskalen, um Planung, Ausführung und Betrieb von Erdwärmesondensystemen sicherer, zuverlässiger und effizienter gestalten zu können. Ein wichtiger Nutzen von Projektergebnissen des EASyQuart-Vorhabens liegt auch in der Übertragbarkeit der verwendeten Methoden und Instrumentarien auf andere geotechnologische Anwendungen (z. B. Energiespeicherung, Endlagerproblematik, Methoden zur hydraulischen Stimulation, konventioneller und unkonventioneller Ressourcenabbau oder Tunnelbau). Laufende Aktivitäten zielten auch darauf ab, die Zusammenarbeit mit weiteren Partnern und komplementären Forschungsvorhaben zu intensivieren, um der Oberflächennahen Geothermie als nahezu überall verfügbare, erneuerbare Ressource ein stärkeres Gewicht im Prozess einer Wärmewende hin zu klimaneutralen Technologien zu verleihen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt in EASyQuart war die Anpassung und Bewertung numerischer Ansätze, die für andere geotechnologische Nutzungen des Untergrundes bereits weitgehend erforscht bzw. etabliert sind. Methoden für numerische Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Prognosesimulationen für die Vorhersage des Verhaltens des Untergrundes bei dessen langjähriger thermischer Nutzung standen dabei ebenso im Fokus wie eine Studie, inwieweit mathematische Optimierungsverfahren prinzipiell für eine weitgehend automatisierte Dimensionierung von Erdwärmesondensystemen geeignet sind. Vor- und Nachteile spezifischer Annahmen und Algorithmen wurden im Rahmen eines Softwarevergleichs identifiziert. Die verwendeten numerischen Verfahren und Softwareplattformen sind in diesem Buch ausführlich beschrieben. Zu den wichtigsten Ergebnissen von EASyQuart auf dem Gebiet der numerischen Simulation von Untergrundprozessen gehört die umfassende Implementierung und Validierung moderner Erdwärmesondenmodelle im Rahmen von Dual-Kontinuum-Ansätzen in die Open-Source-Simulationsplattform OpenGeoSys (OGS), die damit deutlich weiterentwickelt werden konnte.

Für das Verständnis solch komplexer Systeme wie oberflächennaher geothermischer Anlagen mit ihren wechselwirkenden ober- und untertägigen Komponenten ist neben Erkundung, Monitoring sowie numerischen Prozessanalysen auch ein effizientes Datenmanagement inklusive einer visuellen Datenanalyse von großer Bedeutung. Virtual-Reality-Konzepte ermöglichen die Kombination verschiedener, heterogener Arten von Daten und Modellen in einem georeferenzierten Kontext. Somit werden integrierte Virtual-Reality-Lösungen zu einem sinnvollen Planungswerkzeug z. B. für die Gestaltung von Infrastrukturen urbaner Systeme. Virtuelle Realitäten erleichtern den Zugang und das Verständnis von Planungsergebnissen für Experten und interessierte Laien, somit für ein breites Publikum.

Die EASyQuart-Webseite (<https://www.ufz.de/easyquart>) bietet einen Einstieg in das Forschungsprojekt und liefert Informationen über das Vorhaben. Regelmäßig werden Neuigkeiten zu laufenden Aktivitäten aktualisiert. Das Projektteam wird ebenso vorgestellt und EASyQuart-Veröffentlichungen sowie Konferenzbeteiligungen sind aufgelistet.

8.2 Ausblick

Nach der sehr stark methodisch orientierten Projektphase von EASyQuart soll in potenziellen Nachfolgeaktivitäten die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methoden und Instrumentarien unter realen Bedingungen demonstriert werden. Weiterhin sind partielle methodische Lücken insbesondere im Bereich der numerischen Methoden zu schließen. Spezifische methodische Weiterentwicklungen sind auf den Gebieten von Unsicherheitsanalysen und der optimalen Positionierung von Erdwärmesonden erforderlich, die zwar wissenschaftlich gut erforscht sind, jedoch für die eher mittelständisch geprägte Planungsbranche zeit- und kosteneffizient aufbereitet werden müssen. Gegenstand von Nachfolgeaktivitäten ist somit vorrangig die praxiswirksame Ertüchtigung und Umsetzung von Konzepten, Workflows und Instrumentarien eines standortbezogenen daten- und wissensbasierten Entscheidungshilfesystems in Bezug auf die thermische Versorgung zum Heizen und Kühlen unter Nutzung oberflächennaher geothermischer Ressourcen. Die in EASyQuart erarbeiteten Entscheidungshilfen sind von Handlungsempfehlungen hin zu einem ganzheitlichen digitalen Prognoseinstrumentarium zu entwickeln, welches die Grundlage für die Erstellung digitaler Zwillinge für geothermische Standorte bildet. Damit soll eine koordinierte geothermische Erschließung großer Einheiten wie z. B. Stadtquartiere ermöglicht werden.

Das avisierte digitale Prognoseinstrumentarium basiert auf der Entwicklung und Erweiterung von Workflows, Algorithmen, Schnittstellen und praxistauglichen Softwarekomponenten, die wesentlich über in der aktuellen Dimensionierungspraxis verwendete Mittel hinausgehen. Es soll perspektivisch in einer frühen Phase der Entwicklung von Quartiersprojekten für die Erstellung von Machbarkeitsstudien und auch im eigentlichen Planungsprozess zum Einsatz kommen. Kriterien für eine wirtschaftliche und nachhaltige Dimensionierung der betrachteten energetischen Systeme sind dabei die Einsparung von Primärenergie und Verminderung des CO₂-Ausstoßes durch optimierte Betriebsregimes der Haustechnik, die Wirtschaftlichkeit der lokalen Wärmenetze sowie die ökologische Ressourcennutzung, insbesondere bezüglich der nachhaltigen Nutzung von Grundwassersystemen. Damit können im Dimensionierungsprozess präzisere Aussagen zu Quantität, Qualität und Lokalisierung von Komponenten oberflächennaher Geothermiesysteme erwartet werden, als sie in der gegenwärtigen Praxis möglich sind. Außerdem werden damit wirtschaftlich nachteilige Über- oder Unterdimensionierungen derartiger Systeme vermieden. Zudem ist die weitere Flexibilisierung von Dimensionierungsverfahren und regulativen Rahmenbedingungen Ziel von Nachfolgeaktivitäten.

Die Projektergebnisse von EASyQuart ermöglichen es, in nachfolgenden Forschungsarbeiten innovative Verfahren für Erkundung und Monitoring im Untergrund und in der Haustechnik, für die numerische Simulation komplexer Vorgänge im Untergrund, den Netzwerken und in der Haustechnik, für die Gestaltung digitaler Zwillinge für Energiesysteme sowie für die integrierte 3D-Visualisierung heterogener Daten als wissenschaftliche bzw. technische Komponenten in das zuvor erwähnte digitale Planungsinstrumentarium und die Entscheidungshilfen einzubringen. Zur Demonstration seiner Leistungsfähigkeit ist das gesamte Instrumentarium zur Erstel-

lung und Parametrisierung des digitalen Zwillings eines realen Standorts zu nutzen und kann an diesem Modell kontinuierlich mit aktualisierten Daten erprobt werden.

Als wesentlicher und öffentlichkeitswirksamer Bestandteil von Nachfolgeaktivitäten wurden aus EASyQuart heraus Vorschläge für Forschungsarbeiten zur Entwicklung und Erprobung von Maßnahmen zur Kommunikation der Bedeutung und der Nutzungsmöglichkeiten oberflächennaher geothermischer Ressourcen für unterschiedliche Zielgruppen wie Entscheider, Nutzer und die breite Öffentlichkeit entwickelt. Diese Maßnahmen können durch Methoden der computergestützten integrierten Visualisierung heterogener Daten oberflächennaher geothermischer Systeme anschaulich unterstützt werden.

Aus EASyQuart heraus entwickelte und in nachfolgenden Vorhaben erweiterte sowie verbesserte Konzepte, Workflows, Verfahren, Formate, Maßnahmen, Plattformen und Softwarekomponenten sind als beispielhafte Lösungen konzipiert, deren Nutzung den Akteuren eines Dimensionierungsprozesses von Erdwärmesondensystemen für Machbarkeitsstudien und Planungen bzw. den verschiedenen Akteuren der Geothermiebranche für die Kommunikation zur Verbesserung von Kenntnis und Akzeptanz der Technologie empfohlen wird und die somit verbesserte Standards definieren sollen. Neue Erkenntnisse werden zur Verbesserung des Prozess-, Methoden- und Systemverständnisses der betrachteten geothermischen Anlagen als Voraussetzung für einen zuverlässigen Planungsprozess zur energieeffizienten und ökologisch nachhaltigen Gebäudeversorgung mit thermischer Energie basierend auf regenerativen Quellen erwartet. Zudem sind umfangreiche Analysen von Potenzialen und Limitierungen unterschiedlicher spezifischer Komponenten der technischen und digitalen Dimensionierungsinstrumentarien von Interesse (z. B. Erkundungs- und Monitoringverfahren, numerische Unsicherheitsanalysen und Optimierungskonzepte, gekoppelte numerische Simulationen von Untergrund, Netzwerken und Anlagentechnik). Ein auf Basis von Erkundungs- und Monitoringdaten eines realen Standorts erstellter digitaler Zwilling eines Erdwärmesondensystems ist geeignet, die Beurteilung des Leistungsumfangs der betrachteten Prognoseinstrumentarien zu unterstützen. Außerdem hilft er, mit seiner komplexen Modellgestaltung das Systemverständnis geothermischer Gesamtanlagen bestehend aus Untergrund- und Haustechnikkomponenten zu verbessern.

Nicht zuletzt trägt die 3D-Visualisierung eines digitalen Zwillings dazu bei, Dialog- und Kommunikationsformate zur Verbesserung von Bekanntheit und Akzeptanz geothermischer Nutzungen des oberflächennahen geologischen Raumes zu entwickeln und zu erproben.

Zukünftige Forschung beinhaltet idealerweise die folgenden Aspekte:

- Erarbeitung von Konzepten und Erprobung von Instrumentarien für die effiziente, hochaufgelöste hydrogeologische und geophysikalische Standorterkundung zur Verbesserung der geologischen Datenbasis,
- Aufbereitung von Methoden numerischer Unsicherheitsanalysen für Untergrundsimulationen zum praxiswirksamen Einsatz im Dimensionierungsprozess von Erdwärmesondensystemen,

- Entwicklung digitaler Instrumentarien für die optimierte Positionierung von Erdwärmesonden unter Berücksichtigung konkreter Standortbedingungen,
- Erstellung und kontinuierliche Anpassung digitaler Zwillinge für reale Standorte von Erdwärmesondensystemen,
- Medien-, Öffentlichkeits- und Expertenanalysen zur Untersuchung des Ist-Zustandes der Wahrnehmung der Oberflächennahen Geothermie in der Bevölkerung sowie zur Untersuchung von Bedarfen für die Positionierung des Themas auf unterschiedlichen Ebenen,
- Entwicklung und Erprobung von Dialogformaten und Mitmachaktionen in öffentlichen und institutionellen Räumen für Kommunikationsmaßnahmen zur Oberflächennahen Geothermie für unterschiedliche Zielgruppen,
- Bewertung von Konzepten und digitalen Planungsinstrumentarien für die Dimensionierung von Erdwärmesondensystemen bezüglich ihrer Potenziale zur Integration in übergeordnete Energiesystemanalysen und zur Nutzung bei der thermischen Versorgung von Bestandsbauten sowie
- Erarbeitung spezifischer Vorschläge für weitere Flexibilisierungen von Dimensionierungsverfahren und regulativen Rahmenbedingungen.

8.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

8.3.1 Publikationen in Fachzeitschriften

Bucher A, Kolditz O, Grimm R et al. (2021) *EASyQuart – Energieeffiziente Planung oberflächennaher geothermischer Systeme für Quartiere*. Geothermische Energie 99:16–17

Cai W, Wang F, Chen S et al. (2022) *Importance of long-term ground-loop temperature variation in performance optimization of Ground Source Heat Pump system*. Appl Therm Eng 204:art. 117945

Randow J, Chen S, Lubashevsky K et al. (2022) *Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization – a case study in Berlin*. Geotherm Energy 10:art. 1

Randow J, Satke P, Bucher A et al. (2023) *A software interface for coupled underground and facility simulations between OpenGeoSys and Modelica*. (in Vorbereitung für Appl Therm Eng)

Richter S, Lubashevsky K, Randow, J et al. (2023) *Global Sensitivity Analysis and Uncertainty Quantification for Design Parameters of Shallow Geothermal Systems*. (in Vorbereitung für Geotherm Energy)

Rink K, Şen ÖO, Schwanebeck T et al. (2022) *An environmental information system for the exploration of energy systems*. Geotherm Energy 10:art. 4

8.3.2 Tagungsbeiträge mit Abstracts und/oder Publikationen in Tagungsbänden

Chen S, Randow J, Lubashevsky K et al. (2021) *Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization – a case study in Berlin*. In: Book of abstracts of the EGU General Assembly 2021, online, 19–30 April 2021, EGU21-10082, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10082>

Hastreiter N, Vienken T (2021) *Determining heat losses from buildings to better predict and quantify formation of groundwater urban heat islands*. In: Book of Abstracts of the 48th IAH Congress 2021, Brussels, 06–10 September 2021

Hastreiter N, Vienken T (2022) *An innovative temperature monitoring approach to ensure the sustainable use of shallow geothermal energy on quarter scale*. In: Book of abstracts of the EGU General Assembly 2022, Vienna, 23–27 May 2022, EGU22-11801, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11801>. Zugegriffen: 05.07.2022

Hastreiter N, Vienken T (2022) *Investigating thermal stressors upon shallow urban aquifers*. In: Book of abstracts of the Sustain Valencia 2022 conference, Valencia, 06–08 October 2022, EGU22-11801, <https://drive.google.com/file/d/1C6oJZjss5tAvQUZoKAcbLvi2YiCZWbsb/view?pli=1>. Zugegriffen: 08.12.2022

Randow J (2020) *Wärmestromanalyse von Tief-Erdwärmesonden*. In: Tagungsband zu Der Digitale Geothermiekongress 2020.

Randow J, Satke P (2022) *Entwicklung einer Softwareschnittstelle für gekoppelte Untergrund- und Gebäudetechniksimulationen zwischen OpenGeoSys und Modella*. In: Book of abstracts of the European Geothermal Congress 2022, Berlin, 17–21 October 2022

Richter S, Lubashevsky K, Randow J et al. (2022) *Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen für auslegungsrelevante Parameter oberflächennaher Erdwärmesonden*. In: Book of abstracts of the European Geothermal Congress 2022, Berlin, 17–21 October 2022

Satke P, Randow J, Richter S et al. (2022) *Dynamische Gebäudesimulationen auf Quartiersebene einschließlich Heiztechnik im geothermisch versorgten kalten Nahwärmenetz*. Vortrag zur GeoTHERM expo & congress, Offenburg, 02–03 June 2022

Vienken T, Hastreiter N, Pohle M et al. (2021) *Geothermal exploration on neighbourhood scale – potentials and limitations*. In: Book of Abstracts of the 48th IAH Congress 2021, Brussels, 06–10 September 2021

8.3.3 Studentische und wissenschaftliche Qualifikationen

Chen S (2022) *Numerical modelling of multiple borehole heat exchanger array for sustainable utilization of shallow geothermal energy*. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden

- Kroll P (2021) *Statistische Auswertung der Arbeitszahl von unterschiedlichen Sole-Wasser-Wärmepumpen einer seit 13 Jahren in Betrieb befindlichen Anlage*. Bachelorarbeit, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur (HTWK) Leipzig
- Lubashevsky K (2021) *Globale Sensitivitätsanalyse mithilfe von Sobol'-Indizes*. Seminararbeit, Technische Universität Chemnitz
- Lubashevsky K (2022) *Sobol'-Sensitivitätsanalyse der Untergrundparameter bei der Simulation von oberflächennaher Geothermie mithilfe von Gauß-Prozess-Emulatoren*. Masterarbeit, Technische Universität Chemnitz
- Müller J (2022) *Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen einer geothermischen Quartiersversorgung am Beispiel des Baugebietes „Am Kirchfeld“ in Unterzeitldorn*. Masterarbeit, TU München Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit
- Randow J (2020) *Heat flux analysis of deep borehole heat exchangers*. Masterarbeit, Hochschule für Wirtschaft, Technik und Kultur (HTWK) Leipzig
- Satke P (2022) *Entwicklung und Analyse von Modellen für energetische Gebäude- und Anlagensimulationen mit Geothermie auf Quartiersebene*. Masterarbeit, Hochschule für Wirtschaft, Technik und Kultur (HTWK) Leipzig

8.3.4 Sonstige Publikationen und/oder Tagungsbeiträge

- Bucher A (2021) *Einleitung und Vorstellung Projekt EASyQuart*. Vortrag zum Workshop: Status FE-Projekt EASyQuart. Der Geothermiekongress, Online-Veranstaltung, 30 November–02 December 2021
- Bucher A, Vienken T, Hastreiter N et al. (2022) *Das Verbundprojekt EASyQuart – Erste Anregungen aus den Projektergebnissen*. Vortrag zum Workshop der Projektgruppe Energie, Nachhaltiges Bauen und Gebäudeautomation der Ingenieurkammer Sachsen, Dresden, 30 June 2022
- Hastreiter N (2021) *Erkundung oder Literaturwerte?* Vortrag zum Workshop: Status FE-Projekt EASyQuart. Der Geothermiekongress, Online-Veranstaltung, 30 November–02 December 2021
- Hastreiter N, Vienken T (2022) *Projektergebnisse EASyQuart: Erkundung und Monitoring*. Vortrag zum EASyQuart-Anwenderworkshop. Leipzig, 06 September 2022
- Randow J (2021) *EASyQuart und seine Bedeutung für die Wohnungswirtschaft*. Vortrag zum geoENERGIE-Tag 2021, Freiberg, 30 September 2021
- Randow J (2022) *EASyQuart – Energieeffiziente Auslegung und Planung dezentraler Versorgungsnetze zum Heizen und Kühlen von Stadtquartieren unter Nutzung des oberflächennahen geologischen Raumes*. Vortrag zum Tag der Nachwuchsforschung 2022, HTWK Leipzig, 08 June 2021
- Randow J, Chen S, Lubashevsky K et al. (2021) *Modellierung der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf Quartiersebene – Eine Fallstudie in Berlin*. Der Geothermiekongress, Online-Veranstaltung, 30 November–02 December 2021
- Randow J, Bucher A, Görke U J (2022) *EASyQuart – Energieeffiziente Planung oberflächennaher geothermischer Systeme für Quartiere* Postervortrag zum Geo-

symposium „150 Jahre Geologischer Dienst in Sachsen“, Freiberg, 22–23 June 2022

Richter S, Randow J (2021) *Wie (un)sicher sind Untergrundsimulationen?* Vortrag zum Workshop: Status FE-Projekt EASyQuart. Der Digitale Geothermiekongress, Online-Veranstaltung, 30 November–02 December 2021

Richter S, Lubashevsky K (2022) *Projektergebnisse EASyQuart: Sensitivitätsanalyse und Unsicherheitsanalyse* Vortrag zum EASyQuart-Anwenderworkshop. Leipzig, 06 September 2022

Satke P, Randow J, Schönfelder S (2021) *Die Last mit den Lastfällen*. Vortrag zum Workshop: Status FE-Projekt EASyQuart. Der Geothermiekongress, Online-Veranstaltung, 30 November–02 December 2021

Satke P, Randow J (2022) *Projektergebnisse EASyQuart: Kopplung zwischen Haustechnik- und Untergrundsimulation*. Vortrag zum EASyQuart-Anwenderworkshop. Leipzig, 06 September 2022

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



A.1 Earth Energy Designer

Das Programm Earth Energy Designer (EED) ist ein kommerzielles Softwarepaket, welches die Auslegung und Planung von geothermischen Anlagen ermöglicht, bei denen Erdwärmesonden als Wärmetauscher für eine Wärmepumpe dienen. An der Universität in Lund hat eine Forschungsgruppe Ende der 70er-Jahre erste Berechnungen thermischer Vorgänge im Untergrund durchgeführt (siehe Kreitlow et al. 1978). Hierbei wurden in ersten numerischen Simulationen Bohrlöcher bzw. Erdwärmesonden als Wärmetauscher betrachtet. Anhand des konduktiven Wärmetransports kann die Temperaturentwicklung im Bereich des Bohrloches ermittelt werden.

Bei dem Programm EED handelt es sich um ein analytisches Berechnungsverfahren auf Basis der Programmiersprache Borland Pascal. Die Berechnungen basieren hierbei auf der Kelvin'schen Linienquellentheorie, die einen Ansatz darstellt, um den Wärmetransport im Untergrund zu beschreiben. Mit dem Programm werden die Solefluidtemperaturen in Erdwärmesonden unter Berücksichtigung geologischer und technischer Rahmenbedingungen wie Tiefe, Bohrlochdurchmesser, Wärmeleitfähigkeit und weiteren relevanten Parametern simuliert.

Die korrekte Dimensionierung einer Erdwärmesondenanlage ist essenziell für die nachhaltige Betriebsweise einer Anlage. Es gibt hierbei zwei spezielle Fälle, die berücksichtigt werden müssen:

- Grundlastfall: Die Grundlast stellt die konstant benötigte Wärmemenge im Laufe eines Jahres dar. Im Programm kann die Grundlast basierend auf Monatswerten bzw. stundenbasierten Lastgängen bestimmt werden.
- Spitzenlastfall: Die Spitzenlast stellt einen Sonderfall bezogen auf die Grundlastberechnung dar. Als Spitzenlast wird in der Geothermie ein Ereignis bezeichnet, bei dem die Wärmepumpe mehrere Stunden konstant läuft, um die benötigte Wärmemenge für den Nutzer bereitzustellen. Dies hat zur Folge, dass die Fluidtempe-

ratur innerhalb kürzester Zeit stark abnimmt, sich jedoch anschließend auch wieder schnell regeneriert, wenn sich die Anlage wieder im Normalbetrieb befindet.

A.2 FEFLOW

Das Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System (FEFLOW) ist eine kommerzielle Software zur numerischen Simulation von Fluid-, Masse- und Wärmetransport in porösen, geklüfteten Medien unter gesättigten und ungesättigten Bedingungen – von der lokalen bis zur regionalen Skala. Das Programm ist in der Lage, die Dynamik inkompressibler und kompressibler Flüssigkeiten zu analysieren sowie die chemische Kinetik für Mehrkomponenten-Reaktionssysteme zu berücksichtigen.

Das Programm wurde ursprünglich am Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften der DDR als wissenschaftliche Software entwickelt und erstmals 1979 beschrieben (vgl. Diersch 2014; Trefry und Muffels 2007). Als kommerzielles Simulationspaket wurde FEFLOW ab 1990 von der WASY GmbH Berlin weiterentwickelt und kontinuierlich gängigen Anwendungsstandards angepasst. Seit der Übernahme des Unternehmens WASY durch die DHI Group im Jahr 2007 wird das Programmsystem von einem internationalen Entwicklerteam betreut und weltweit vertrieben.

Heute zählt FEFLOW zu den weltweit führenden Werkzeugen für die Grundwassermodellierung in komplexen Umgebungen. Über Jahrzehnte wurde FEFLOW an vollständig dokumentierten numerischen Benchmarks getestet und hat seine Zuverlässigkeit und Effizienz in zahlreichen Praxisanwendungen bewiesen. Die physikalischen und numerischen Grundlagen sowie die Nutzerführung sind in ausführlichen Dokumenten transparent beschrieben. FEFLOW verfügt über eine eigene Benutzeroberfläche, die eine umfassende Funktionalität von der ersten Modellkonfiguration bis zur Erstellung hochwertiger Grafiken für die Ergebnisauswertung anbietet. Für sehr spezielle Anwendungen, bei denen der Benutzer potenzielle Änderungen an Teilen des Systems vornehmen möchte, bietet FEFLOW offene Programmierschnittstellen an.

Mit seinem Angebot an Prozesssimulationen spricht FEFLOW u. a. ein Anwendungsgebiet an, dem auch die im Projekt EASyQuart untersuchten Systeme zuzuordnen sind (Diersch et al. 2011a, b). FEFLOW-Simulationen, die sowohl die ungesättigte Zone als auch die darunter liegenden Grundwasserleiter abdecken, können wichtige Informationen zur Bewertung der Realisierbarkeit oberflächennaher geothermischer Systeme, zu Entscheidungen über das Systemdesign sowie zur Bewertung von Umweltauswirkungen liefern. Dabei können offene Systeme (z. B. geologische Wärmespeicher vom ATES-Typ) ebenso betrachtet werden wie geschlossene Systeme (z. B. Erdwärmesondenanlagen bzw. Erdwärmekollektoren) für Heiz- und Kühlanwendungen. Die Fähigkeit von FEFLOW, die für geothermische Nutzungen relevanten Komponenten von Wärmetransportprozessen in Kombination mit flexiblen Vernetzungsstrategien zu modellieren, hat das Programmsystem aktuell zu

einem Industriestandard für die geothermische Modellierung gemacht. So wird FE-FLOW beispielsweise auch im VBI Leitfaden Oberflächennahe Geothermie (VBI 2008) als Referenzprogramm für die Nutzung in der Planungsphase angegeben.

A.3 Modelica

Die Programmiersprache Modelica wird für die Modellierung physikalischer Systeme genutzt. Im Gegensatz zu den bekannteren imperativen Sprachen wie Python oder C ist Modelica eine deklarative, also beschreibende Sprache. Geschriebene Modelle enthalten die Beschreibung von Variablen, Parametern (diese sind im Gegensatz zu den Variablen unabhängig von der Zeit und *a priori* bekannt) und deren Zusammenhänge sowie Anfangsbedingungen in Form von Gleichungen. Ein zentraler Aspekt von Modelica ist die verhältnismäßig einfache Definition der formalen Zusammenhänge. Viele Formeln können direkt aus einer Literaturquelle übernommen werden, ohne größeren Aufwand seitens des Nutzers. Grundlegende Einführungen werden in Fritzson et al. (2018) sowie Tiller (2014) gegeben.

Die Wiederverwendung von entwickelten Modellen wird in Bibliotheken organisiert. Einzelne Modelle können über Ein- und Ausgänge verknüpft werden, um als Komponenten für komplexere Systeme genutzt zu werden. Grundlegend stellt Modelica eine Standardbibliothek zu Verfügung, die Komponenten für mechanische, elektrische, magnetische, hydraulische und thermische Systeme enthält. In dem Projekt EASyQuart wurden vor allem Gebäude und deren Anlagentechnik mithilfe von Modelica modelliert. Dazu wurden die kommerziellen Bibliotheken *GreenCity* in der Version 1.0 von EA Systems Dresden und *InterfacesGeneral* in der Version 1.0 verwendet.

Die Simulationsumgebung erlaubt das grafische Erstellen und Bearbeiten von Modellen. Die hier verwendete Simulationsumgebung ist SimulationX (Version 4.3) von der ESI Group. Neben dieser kommerziellen Software gibt es auch die Open-Source-Alternative *OpenModelica*.

A.4 OpenGeoSys

OGS ist eine wissenschaftliche Open-Source-Initiative zur numerischen Simulation von THM/C gekoppelten Prozessen in porösen, geklüfteten Medien auf der Basis der Methode der Finiten Elemente und inspiriert durch die Software-Plattform FEFLOW (Diersch 2014) sowie ROCKFLOW-Konzepte (Kolditz 1996). Die OGS-Entwicklung begann Mitte der 1980er-Jahre und erfährt seitdem kontinuierliche Weiterentwicklungen sowie Neugestaltungen. Für Details zu den Ursprüngen siehe Helmig (1993), Kolditz (1990), Kroehn (1991) und Wollrath (1990).

Seit den 1990er-Jahren leisteten mehr als 50 Promotionsprojekte Beiträge zur Entwicklung von OGS. Die OGS-Plattform ist auf Anwendungen in verschiedenen

Bereichen der Umweltgeowissenschaften ausgerichtet, z. B. zur Analyse regionaler (Jing et al. 2018), kontaminierter und geothermischer Systeme (Hein et al. 2016; Meng et al. 2018). OGS wird für Anwendungen zur Energiespeicherung in technischen Systemen wie Beton (Miao et al. 2019) oder Zeolith basierten Anlagen (Lehmann et al. 2019) und auch in natürlichen Systemen wie Salzkavernen (Böttcher et al. 2017; Nagel et al. 2017) genutzt. Die Software wird ebenso im Rahmen fundamentaler Studien zur nuklearen Endlagerforschung eingesetzt (Shao et al. 2019).

Die aktuelle Programmversion, OGS-6 (Bilke et al. 2019; Naumov et al. 2018), ist eine vollständige Neuimplementierung der multiphysikalischen Versionen OGS-4/5 (Kolditz und Bauer 2004; Wang und Kolditz 2007) unter Nutzung modernster Methoden des Softwareengineerings und modernen Softwarearchitekturen mit speziellem Fokus auf Codequalität, Modularität, Leistungsfähigkeit und verständlicher Dokumentationen. Die jüngste Programmversion, OGS-6.2.0, erlaubt die Analyse und die Prognose des Verhaltens von Geosystemen, deren Relevanz sich zukünftig weiter steigern wird, wie die nukleare Endlagerung, die geothermische Nutzung untertägiger Ressourcen für die Produktion elektrischer und thermischer Energie sowie die geologische Speicherung unterschiedlicher Energieträger. Besondere Aufmerksamkeit wird der Implementierung moderner numerischer Methoden für die Entwicklung struktureller Diskontinuitäten gewidmet, wie beispielsweise der erweiterten Funktionalräume von Finite-Element-Verfahren (Watanabe et al. 2012), nicht-lokaler Formulierungen (Parisio et al. 2018) und der Phasenfeldformulierungen für die Rissausbreitung (Yoshioka et al. 2019). Ein wesentliches Merkmal von OGS ist die optionale Nutzung von Höchstleistungsrechnern durch eine effiziente parallelisierte Implementierung vieler rechenintensiver Programmkomponenten (Wang et al. 2015, 2017).

OGS ist an verschiedenen internationalen Initiativen zur Modellentwicklung, Validierung und des Benchmarkings beteiligt, so z. B. DECOVALEX (hauptsächlich mit Anwendungen zur Einschätzung nuklearer Endlagerstandorte, vgl. Birkholzer et al. 2018), CO2BENCH (geologische CO₂-Speicherung, vgl. Kolditz et al. 2012), SeS Bench (reaktive Transportprozesse, vgl. Steefel et al. 2015) und HM-Intercomp (gekoppelte Hydrosysteme, vgl. Maxwell et al. 2014). Die OGS-Community stellt eine noch laufende Serie von Benchmarkbüchern (Bauer et al. 2018) sowie Tutorials (Lehmann et al. 2018) zur Verfügung. Für weitere Details sei auf die OGS-Internetseite <https://www.opengeosys.org> verwiesen.

A.5 ogs6py

ogs6py ist ein Open-Source Python-API zur Ansteuerung von OGS, welches von Buchwald et al. (2020) entwickelt wurde. Die Software dient im Wesentlichen dazu, Eingabedateien für Simulationen mit OGS zu erzeugen oder zu verändern und OGS auszuführen. Die Anwendung kann in Python oder Julia erfolgen. Durch die Verwendung von Jupyter- oder Pluto-Notebooks besteht die Möglichkeit, OGS-Workflows effektiv zu gestalten. So können beispielsweise iterativ Parametervarianten automa-

tisiert simuliert werden. ogs6py steht auf GitHub zum Download zur Verfügung (<https://github.com/joergbuchwald/ogs6py>).

A.6 HTFlux

HTFlux ist eine bauphysikalische Simulationssoftware zur zweidimensionalen thermischen und hygrothermischen Simulation von Gebäuden und Gebäudeteilen. Die Software bietet eine Vielzahl an speziellen Funktionen und Berechnungen nach EN ISO-Normen. Für die Simulation benötigte Randbedingungen sind Außen- und Innentemperaturen sowie die Parametrisierung der Materialien der einzelnen Bauteile (z. B. Wärmeleitfähigkeiten, spezifische Wärmekapazitäten und die Rohdichte des Materials). Dabei können beispielsweise die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte, als Maß der Isolierungsfähigkeit) für die verschiedenen Bauelemente und für das Simulationsgebiet Wärmestromdichten und Temperaturverteilungen sowohl für stationäre als auch dynamische Bedingungen ermittelt werden. Im Rahmen von EASyQuart wurde die Software zur Simulation von Wärmeabgaben in den Untergrund aus Gebäuden mit unterschiedlichen Isolierungs- und Nutzungsarten verwendet (siehe Abschn. 3.4.2). Der Download der Software sowie eine Dokumentation und Anwendungsbeispiele sind unter <https://www.htflux.com> verfügbar.

A.7 Grafana

Grafana ist eine Open-Source-Anwendung, welche zur webbasierten Darstellung von Daten in Form von Dashboards genutzt wird. Die Anwendung bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl an Datenquellen zu verknüpfen. Daten können innerhalb der Anwendung nachbearbeitet und in verschiedenen Graph-Typen visualisiert und in dynamischen interaktiven Dashboards eingebunden und verfügbar gemacht werden. Damit eignet sich Grafana z. B. sehr gut zur Verfügbarmachung von fernübertragenen Daten und Echtzeit-Monitoring-Daten. Weitere Informationen zur Anwendung und deren Nutzung im Projekt EASyQuart finden sich in Abschn. 7.4.

Literatur

- Bauer S, Kolditz O, Nagel T, Shao H, Wang W (Hrsg) (2018) Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking: from benchmarking to tutoring, 1. Aufl. Terrestrial Environmental Sciences. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68225-9>
- Bilke L, Flemisch B, Kalbacher T et al (2019) Development of open-source porous media simulators: principles and experiences. *Transp Porous Media* 130(1):337–361. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01310-1>

- Birkholzer JT, Bond AE, Hudson JA et al (2018) DECOVALEX-2015: an international collaboration for advancing the understanding and modeling of coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in geological systems. *Environ Earth Sci* 77(14):539. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7697-7>
- Buchwald J, Chaudhry AA, Yoshioka K et al (2020) DoE-based history matching for probabilistic uncertainty quantification of thermo-hydro-mechanical processes around heat sources in clay rocks. *Int J Rock Mech Min Sci* 134(104):481. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104481>
- Böttcher N, Görke UJ, Kolditz O et al (2017) Thermo-mechanical investigation of salt caverns for short-term hydrogen storage. *Environ Earth Sci* 76(3):98. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6414-2>
- Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011a) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 1. Fundamentals. *Computers & Geosciences* 37:1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.003>
- Diersch HJ, Bauer D, Heidemann W et al (2011b) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Computers & Geosciences* 37(8):1136–1147. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.002>
- Diersch HJG (2014) FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- Fritzson P, Bachmann B, Moudgalya K et al (2018) Introduction to Modelica with examples in modeling, technology, and applications. Linköping University Interdisciplinary Studies, Linköping University Electronic Press. <http://omwebbook.openmodelica.org/>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Hein P, Kolditz O, Görke UJ et al (2016) A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl Therm Eng* 100:421–433. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.039>
- Helmig R (1993) Theorie und Numerik der Mehrphasenströmungen in geklüftetporösen Medien. PhD thesis, Universität Hannover
- Jing M, Heße F, Kumar R et al (2018) Improved regional-scale groundwater representation by the coupling of the mesoscale Hydrologic Model (mHM v5.7) to the groundwater model OpenGeoSys (OGS). *Geosci Model Dev* 11(5):1989–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1989-2018>
- Kolditz O (1990) Zur Modellierung und Simulation geothermischer Transportprozesse in untertägigen Zirkulationssystemen. PhD thesis, Akademie der Wissenschaften der DDR, Berlin
- Kolditz O (1996) Stoff- und Wärmetransport im Kluffgestein. Habilitation, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen in Bauwesen, Universität Hannover, Hannover
- Kolditz O, Bauer S (2004) A process-oriented approach to computing multi-field problems in porous media. *J Hydroinformatics* 6(3):225–244. <https://doi.org/10.2166/hydro.2004.0017>

- Kolditz O, Bauer S, Beyer C et al (2012) A systematic benchmarking approach for geologic CO₂ injection and storage. *Environ Earth Sci* 67(2):613–632. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1656-5>
- Kreitlow DB, Reistad GM, Miles CR et al (1978) Thermosyphon models for downhole heat exchanger applications in shallow geothermal systems. *J Heat Transf* 100(4):713–719. <https://doi.org/10.1115/1.3450883>
- Kroehn K (1991) Simulation von Transportvorgängen im klüftigen Gestein mit der Methode der Finiten Elemente. Dissertation. PhD thesis, Universität Hannover
- Lehmann C, Kolditz O, Nagel T (2018) Models of thermochemical heat storage. *Springer Briefs in Energy*, Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71523-0>
- Lehmann C, Kolditz O, Nagel T (2019) Modelling sorption equilibria and kinetics in numerical simulations of dynamic sorption experiments in packed beds of salt/zeolite composites for thermochemical energy storage. *Int J Heat Mass Transf* 128:1102–1113. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.042>
- Maxwell RM, Putti M, Meyerhoff S et al (2014) Surface-subsurface model intercomparison: a first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. *Water Resour Res* 50(2):1531–1549. <https://doi.org/10.1002/2013WR013725>
- Meng B, Vienken T, Kolditz O et al (2018) Modeling the groundwater temperature response to extensive operation of ground source heat pump systems: a case study in Germany. *Energy Procedia* 152:971–977. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.102>
- Miao XY, Kolditz O, Nagel T (2019) Modelling thermal performance degradation of high and low-temperature solid thermal energy storage due to cracking processes using a phase-field approach. *Energy Convers Manag* 180:977–989. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.042>
- Nagel T, Minkley W, Böttcher N et al (2017) Implicit numerical integration and consistent linearization of inelastic constitutive models of rock salt. *Computers & Structures* 182:87–103. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.11.010>
- Naumov D, Bilke L, Fischer T (2018) Appendix A: OpenGeoSys-6. In: Kolditz O, Nagel T, Shao H, Wang W, Bauer S (Hrsg) Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking: from benchmarking to tutoring, terrestrial environmental sciences. Springer International Publishing, Cham, pp 271–277. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68225-9>
- Parisio F, Naumov D, Kolditz O et al (2018) Material forces: an insight into configurational mechanics. *Mech Res Commun* 93:114–118. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2017.09.005>
- Shao H, Hesser J, Kolditz O (2019) Hydraulic characterisation of clay rock under consideration of coupled THM properties. In: Zhan L, Chen Y, Bouazza A (Hrsg) Proceedings of the 8th international congress on environmental geotechnics volume 1: towards a sustainable geoenvironment, environmental science and engineering. Springer Singapore, Singapore, pp 33–40. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2221-1>

- Steeffel CI, Appelo CAJ, Arora B et al (2015) Reactive transport codes for subsurface environmental simulation. *Comput Geosci* 19(3):445–478. <https://doi.org/10.1007/s10596-014-9443-x>
- Tiller M (2014) Modelica by example. <https://mbe.modelica.university/>. Zugegriffen: 10. Jan. 2023
- Trefry MG, Muffels C (2007) FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool. *Ground Water* 45(5):525–528. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x>
- VBI (2008) Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. VBI Schriftenreihe 18
- Wang W, Kolditz O (2007) Object-oriented finite element analysis of thermo-hydro-mechanical (THM) problems in porous media. *Int J Numer Methods Eng* 69(1):162–201. <https://doi.org/10.1002/nme.1770>
- Wang W, Fischer T, Zehner B et al (2015) A parallel finite element method for two-phase flow processes in porous media: OpenGeoSys with PETSc. *Environ Earth Sci* 73(5):2269–2285. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3576-z>
- Wang W, Kolditz O, Nagel T (2017) Parallel finite element modelling of multiphysical processes in thermochemical energy storage devices. *Appl Energy* 185:1954–1964. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.053>
- Watanabe N, Wang W, Taron J et al (2012) Lower-dimensional interface elements with local enrichment: application to coupled hydro-mechanical problems in discretely fractured porous media: LOWER-DIMENSIONAL INTERFACE ELEMENTS. *Int J Numer Methods Eng*. <https://doi.org/10.1002/nme.3353>
- Wollrath J (1990) Ein Strömungs- und Transportmodell für klüftiges Gestein und Untersuchungen zu homogenen Ersatzsystemen. PhD thesis, Universität Hannover
- Yoshioka K, Parisio F, Naumov D et al (2019) Comparative verification of discrete and smeared numerical approaches for the simulation of hydraulic fracturing. *GEM – Int J Geomath* 10(1):13. <https://doi.org/10.1007/s13137-019-0126-6>

Symbol	Beschreibung	Einheit
<i>Lateinische Buchstaben</i>		
A_B	Wand-, Boden- oder Dachfläche (boundary) der Zonengrenze	m^2
A_D	Türfläche (Door) der Zonengrenze	m^2
A_{NGF}	Nettogrundfläche des Gebäudes nach DIN V 18599	m^2
A_W	Fensterfläche (Window) der Zonengrenze	m^2
COP	Leistungszahl der Wärmepumpe	–
c_B	spezifische Wärmekapazität der Wand-, Boden- oder Dachfläche (boundary) der Zonengrenze	$J g^{-1} K^{-1}$
c_{rf}	Spezifische Wärmekapazität des Kältemittels in der Erdwärme-sonde	$J kg^{-1} K$
c_{vgr}	Spezifische volumetrische Wärmekapazität des Verpressmaterials	$kJ m^{-3} K^{-1}$
c_{vs}	Spez. volumetrische Wärmekapazität des geologischen Untergrundes	$kJ m^{-3} K^{-1}$
D_L	Longitudinaler Dispersionskoeffizient	$m^2 s^{-1}$
D_T	Transversaler Dispersionskoeffizient	$m^2 s^{-1}$
d_B	Dicke der Wand des Bodens oder des Dachs (boundary) der Zonengrenze	m
d_{BHE}	Bohrlochdurchmesser	m
d_{max}	Maximalabstand zwischen Erdwärmesonden	m

Symbol	Beschreibung	Einheit
d_{\min}	Mindestabstand zwischen Erdwärmesonden	m
d_{po}	Rohrdurchmesser (außen)	m
f	Zielfunktion	–
G	Grundmenge	–
GTZ	Gradtagzahl	K
i	Grundwassergradient	m m^{-1}
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	m s^{-1}
L_{Basis}	Leitungslänge, die für Wärmeverluste im Bereich des Basisverteilers berücksichtigt wird	m
L_{BHE}	Sondenlänge	m
L_{BHE}^*	Sondenlänge reduziert um 15 m	m
n	Stichprobenumfang	–
n_{BHE}	Anzahl an Erdwärmesonden	–
n_{peff}	Effektive Porosität	–
PUQ	Unsicherheit	–
Q	Jahresbedarf an Wärmeenergie	MWh
$Q_{BHE}^{heating}$	Erdseitiger Wärmebedarf	MWh
Q_{geo}	Jahresbedarf an Wärmeenergie aus Geothermie	MWh
$Q_{Building}$	Gebäudeseitiger Wärmebedarf	MWh
$Q_{Modelica}$	benötigte Energiemenge des Modelica-Modells	Wh
Q_{OGS}	bereitgestellte Energiemenge des OpenGeoSys-Modells	Wh
Q_{WP}	Wärmeenergieverbrauch des Gebäudes	Wh
\dot{Q}_{HP}	Thermische Gesamtleistung der Wärmepumpe	W
\dot{Q}_{Net}	Thermischer Leistungsbedarf des Quartiers	W
\dot{Q}_s	terrestrische Wärmestromdichte	W m^{-1}
\dot{Q}_{S1}	Thermischer Leistungsbedarf des ersten Quartiergebäudes	W
$\dot{Q}_V(\text{Monat})$	Verdampferleistung des jeweiligen Monats	W
\dot{Q}_{VV}	Verdampferleistung bei Volllast	m
\dot{Q}_{WPV}	Wärmepumpenheizleistung bei Volllast bzw. Heizlast	W
R^2	Bestimmtheitsmaß	–
RMSE	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme	–
r_b	Bohrlochradius	m
S_i	Sobol'-Index erster Ordnung bezüglich des i -ten Parameters	–
S_{ij}	Sobol'-Index zweiter Ordnung bezüglich des i -ten und j -ten Parameters	–
T_{365}	Mittlere Fluidtemperatur nach einem Jahr Betrieb der Erdwärmesonde	K
T_{am}	Tagesmittel der Außentemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_{geo}	Variation der Modelltemperatur	K
T_{Gr}	Heizgrenztemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_i	Innentemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_{in}^{min}	Minimale Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde im fünften Jahr der Simulation	K
T_{in}	Sondenvorlauftemperatur	$^{\circ}\text{C}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
T_i^{ref}	Temperaturwert zum Zeitschritt i aus dem Referenzexperiment	K
T_i^{sim}	Temperaturwert zum Zeitschritt i aus der aktuellen Berechnung	K
T_{max}	Maximaltemperatur im Jahresverlauf	K
T_{min}	Minimaltemperatur im Jahresverlauf	K
T_o	Rücklauftemperatur zum letzten Zeitschritt	°C
T_{out}	Sondenrücklauftemperatur	°C
T_{ref}^{EED}	Minimale Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde im fünften Jahr der Simulation des Modells zur Unsicherheitsanalyse in der Software Earth Energy Designer	K
T_{ref}^{OGS}	Minimale Fluidtemperatur bei Eintritt in die Sonde im fünften Jahr der Simulation des Modells zur Unsicherheitsanalyse in der Software OpenGeoSys	K
T_s	Untergrundtemperatur	K
T_s^{365}	Untergrundtemperatur nach einem Jahr Betrieb der Erdwärmesonde	K
t_{aqf}	Mächtigkeit des vom Grundwasser durchströmten Bereiches	–
t_c	konstante Zeitschrittweiten, zu denen Informationen zwischen s Untergrund- und Quartiersmodell ausgetauscht werden	–
t_p	Wandstärke der Sondenrohre	m
t_{phys}	Physikalisches Mindestzeitkriterium	s
t_{theo}	Theoretisches Mindestzeitkriterium	s
U_B	Wärmedurchgangskoeffizient der Wand-, Boden- oder Dachfläche (boundary) der Zonengrenze	$W m^{-2} K^{-1}$
U_D	Wärmedurchgangskoeffizient der Tür (Door) der Zonengrenze	$W m^{-2} K^{-1}$
U_W	Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters (Window) der Zonengrenze	$W m^{-2} K^{-1}$
V	Gesamtvarianz des Modells	–
V_i	partielle Varianz bezüglich des i -ten Parameters	–
V_{ij}	partielle Varianz bezüglich des i -ten und j -ten Parameters	–
\dot{V}_{BHE}	Volumenstrom in der Erdwärmesonde	$m^3 s^{-1}$
\dot{V}_{Net}	Volumenstrom in der Hauptleitung des Nahwärmenetzes	$m^3 s^{-1}$
\dot{V}_{rf}	Durchflussrate des Kältemittels	$m^3 s^{-1}$
v_f	Darcy-Geschwindigkeit, Filtergeschwindigkeit	$m s^{-1}$
\mathbf{x}	Position der Erdwärmesonde	–
x_{NS}	Koordinate der Sondenposition in Nord-Süd-Richtung	–
x_p	Abstand der Rohre in der Sonde	m
x_{WO}	Koordinate der Sondenposition in West-Ost-Richtung	–
z_{aqf}	Tiefe des vom Grundwasser durchströmten Bereiches	–
<i>Griechische Buchstaben</i>		
α_L	Longitudinale Dispersivität	m
α_T	Transversale Dispersivität	m
γ	Strafparameter	m
δ	Relative Toleranz im nichtlinearen Solver der Simulation mit OpenGeoSys	–
$\Delta\alpha_L$	Änderung der longitudinalen Dispersivität	m
ΔQ_{rel}	Relativer Unterschied zwischen Energiemengen	%
ΔT	Temperaturänderung	K
Δt	Zeitschritt in der Simulation	s

Symbol	Beschreibung	Einheit
ΔT_{geo}	Geothermaler Gradient	K m^{-1}
$\Delta t(Monat)$	Dauer des Monats	s
Δx_b	Idealer Knotenabstand an der Sonde im FE-Netz	m
$\delta_Q(Monat)$	Prozentualer monatlicher Wärmeenergiebedarf	%
$\bar{\delta}_T$	Error-History-Match-Wert; mittlere betragsmäßige Temperatur- änderung der mittleren Fluidtemperatur bezüglich eines Referenzexperimentes	K
$\bar{\delta}_{Ts}$	Mittlere betragsmäßige Temperaturänderung der Untergrund- temperatur bezüglich eines Referenzexperimentes	K
ϑ_B	Innenraumtemperatur der Quartiersgebäude	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{BHEIn}	Eingangstemperatur in eine Erdwärmesonde	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{NetIn}	Eingangstemperatur in das gesamte Nahwärmenetz	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{NetOut}	Ausgangstemperatur aus dem gesamten Nahwärmenetz	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_e	Außenlufttemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{\vartheta}_{BHEOut}$	Mittlere Ausgangstemperatur aller Erdwärmesonden	$^{\circ}\text{C}$
λ_{gr}	Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_p	Wärmeleitfähigkeit der Rohre in der Sonde	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_{rf}	Wärmeleitfähigkeit des Kältemittels in der Erdwärmesonde	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_s	Wärmeleitfähigkeit des geologischen Untergrundes	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
μ	Mittelwert der Elementaren Effekte als Maß für den Parameter- einfluss in der Morris-Methode	–
μ_{rf}	Dynamische Viskosität des Kältemittels in der Erdwärmesonde	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
μ^*	Mittelwert der Beträge der Elementaren Effekte als Maß für den Parametereinfluss in der Morris-Methode	–
ρ_B	Dichte der Wand-, Boden- oder Dachfläche (boundary) der Zo- nengrenze	g m^{-3}
ρ_{rf}	Dichte des Kältemittels in der Erdwärmesonde	kg m^{-3}
σ	Standartabweichung der Elementaren Effekte als Maß für Para- meterinteraktionen oder nichtlineare Parametereinflüsse in der Morris-Methode	–

Stichwortverzeichnis

3D-Interaktion, 247

3D-Visualisierung, 241, 246, 250

A

Analytisches Modell, 87, 111, 141

ANGUS+, 9

Aquifer Thermal Energy Storage, 252

B

Berlin-Modell, 193, 218, 244

BheEASyMesh, 87

Bohrlochwiderstand, 87

Bundesberggesetz, 227

C

Co-Simulation, 185

COMAN, 9

Compressed Air Energy Storage, 251

D

Darcy-Geschwindigkeit, 99, 114, 130

Datenintegration, 243

Datenkonversion, 241

Direct Push, 55, 58–60, 63

Dispersion

hydrodynamisch, 100, 228

Downhill-Simplex-Verfahren, 140

Dual-Kontinuum-Ansatz, 87, 102

E

Earth-Energy-Designer, 126, 135, 260, 285

Effekt

elementar, 90, 107

Entscheidungshilfesystem, 3

EnVisaGe, 35, 50, 167, 184

F

FEFLOW, 73, 218, 261, 286

Fehlermatrix, 167, 173

Finite-Elemente-Methode, 87, 95, 105, 242

G

Gauß-Prozess-Regression, 88

Gebäudemodell, 153

Gebäudeparametrisierung

reduziert, 157, 179

Geo-Resume, 36

Geoinformationssystem, 241, 249

GeoPLASMA-CE, 34

GeoWaermeWende, 36

Gesamtsystem, 149, 185

GitLab, 270

Gittererstellung, 244

Gradtagszahl, 95

Grafana, 269, 289

Grundwasserströmung, 98, 110, 114, 130, 218, 246

Grundwassertemperatur, 56, 59, 70

H

HTFlux, 72, 289

Hydraulic Profiling, 61

Hydrodynamische Dispersion, 100, 228

I

IGLU, 9
 Interaktionseffekt, 91, 107, 114

K

Kriging, 88

L

Latin-Hypercube-Sampling, 91, 111

M

Maschinelles Lernen, 88, 125, 135
 Methode
 varianzbasiert, 91
 Modelica, 150, 185, 287
 Modell
 analytisch, 87, 111, 141
 Modellkopplung, 185, 246
 Monte-Carlo-
 basierte Methode, 91
 Sampling, 91
 Simulation, 124, 137
 Morris-Methode, 90, 107
 MultiSource, 36

N

Nebenbedingung, 138
 Nelder-Mead-Verfahren, 140
 Numerische Simulation, 87, 103, 120, 131
 Nutzungsverhalten, 152, 158, 180, 262

O

Ogs6py, 288
 One-Variable-at-A-Time-Methode, 90, 106,
 157
 OpenGeoSys, 86, 98, 106, 125, 131, 185, 201,
 218, 228, 241, 270, 287
 OpenGeoSys Data Explorer, 241
 Optimierungsverfahren, 140
 global, 145
 gradientenfrei, 140
 lokal, 142

P

Parameterscreening, 90, 106
 Parameterwertebereich, 86, 92, 101
 ParaView, 241
 Penalty-Verfahren, 139
 Proxy-Modell, 88, 111, 121, 131, 135
 Python-Software, 87

Q

QEWSplus, 36
 QGIS, 241
 Quartier, 150, 152, 178

R

Reduzierte Gebäudeparametrisierung, 157, 179

S

SAGS, 9
 Sensitivitätsanalyse, 86, 120, 154
 global, 88
 lokal, 88
 Sequenziell
 Rückwärtsauswertung, 212
 Vorwärtsauswertung, 210
 Simulation
 numerisch, 87, 103, 120, 131
 Simulationsmodell, 101, 126, 202, 230
 SimulationX, 246, 287
 SIMULTAN, 10
 Slug-Test, 62
 Sobol'-Folge, 92, 112, 133
 Sobol'-Index, 91, 111, 126, 133
 Sondenabstand, 139
 Sondenpositionierung, 138
 Standort
 Berlin-Gesundbrunnen, 49
 Berlin-Weißensee, 47, 244
 Freiberg, 51, 161
 Köln-Junkersdorf, 48, 56, 70
 Kiel-Wik, 48, 252
 Leipzig, 50
 Lindenberg, 51, 195
 Offenbach-Kaiserlei, 47, 247
 Rhein-Main, 49
 Schleswig-Holstein, 250
 Startsimplex, 141
 Straftermverfahren, 139

T

TestUM-Aquifer, 10
 Thermal-Response-Test, 54, 124, 136, 202,
 218
 THM/C-Prozess, 29

U

Umweltinformationssystem, 243
 Unity, 243
 Unsicherheitsanalyse, 124, 131
 Unsicherheitsbereich, 128

V

Varianzbasierte Methode, [91](#)

Vernetzung, [105](#)

Versorgungsinformationssystem, [240](#)

W

Wärmebedarf, [94](#), [114](#), [129](#), [253](#)

Z

Zielfunktion, [138](#)