



ErdEis II



# Abschlussbericht ErdEis II

Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie

1. Auflage April 2023  
© 2023 by Energie PLUS Concept GmbH,  
Blumenstraße 1, 90402 Nürnberg  
[www.energie-plus-concept.de](http://www.energie-plus-concept.de)  
Alle Rechte vorbehalten

Titelbild: Jan Wagner  
Text: Björn Ohlsen, Julian Horzella, Thorsten Bock,  
Patrick Lucki, David Bertemann, Jan Wagner,  
John Grunewald, Hans Petzold, Dirk Müller,  
Thomas Schreiber, Volker Stockinger  
Lektorat: Björn Ohlsen  
Layout: Björn Ohlsen  
Umschlaggestaltung: Carlotta Kiefhaber

ISBN 978-3-910814-00-4

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Abschlussbericht

des Verbundvorhabens

### EnEff: Wärme: ErdEis II: Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03ET1634A-E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## **Projektleitung**

Thorsten Bock, Schleswiger Stadtwerke GmbH

## **Projektkoordination**

Prof. Dr.-Ing. Volker Stockinger, Energie PLUS Concept GmbH

## **Projektlaufzeit**

01.03.2019 - 31.12.2022

## **Bearbeitung des Vorhabens**

### Schleswiger Stadtwerke GmbH:

M.Sc. Patrick Lucki  
M.Eng. Julia Jürgensen  
M.Sc. Gyde Carstens  
B.Eng. Marie Stiller  
Matthias Forthmann

### Energie PLUS Concept GmbH:

M.Eng. Björn Ohlsen  
M.Sc. Julian Horzella  
B.Eng. David Philipp  
B.A. Judith Schabel  
B.Eng. Tim Kotz

### Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg:

Dr. David Bertermann	M.Sc. Jan Wagner
M.Sc. Hans Schwarz	M.Sc. Mario Rammler
M.Sc. Oliver Suft	B.Eng. Joseph Balda
Dr. Nikola Jovic	B.Sc. Silke Unger
B.Sc. Oliver Soukup	

### Technische Universität Dresden:

Prof. Dr.-Ing. John Grunewald  
Dipl.-Ing. Hans Petzold  
Dipl.-Ing. Hauke Hirsch

### Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen:

Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller  
Prof. Dr.-Ing. Rita Streblov  
M.Sc. Michael Mans  
M.Sc. Peter Remmen  
M.Sc. Thomas Schreiber

## Danksagung

Wir möchten uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Forschungsvorhabens „ErdEis II: Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie“ bedanken.

Ebenso gilt unser Dank für die hervorragende Betreuung des Vorhabens dem Projektträger Jülich, insbesondere Herrn Dr. Tobias Scholz und Herrn Andreas Marx.

Bei der Planung und Umsetzung vor Ort konnten wir uns auf die hochwertige Arbeit der Steinhäuser GmbH & Co. KG (Geothermieanlagen), dem Ingenieurbüro Georg Schröder (Hydraulik & technische Gebäudeausrüstung), der Melf Söth Schaltanlagen GmbH (MSR der Energiezentrale) und Hoff Tiefbau GmbH & Co. KG (Tiefbau Kalte Nahwärmenetz und Geothermieanlagen) verlassen.

Das zukünftige Monitoring wurde möglich gemacht durch die GSG Geologie-Service GmbH, die die Messfühler verschaltet und kalibriert hat, und durch die Consolinno Energy GmbH, die die Datenbank sowie die Benutzer-App aufgebaut hat.

Außerdem wollen wir uns bei der iPLON Solutions GmbH, dem Lehrstuhl für Aroma- und Geruchsforschung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der TU Chemnitz bedanken. Sie unterstützten uns bei der Untersuchung neuartiger Wärmemengenzähler, dem Abbauverhalten von Wärmeträgermedien sowie den Dichtigkeitsprüfungen.

Unser besonderer Dank gilt den ausführenden Kollegen der Stadt Schleswig, die uns bei der Umsetzung des Forschungsvorhabens unterstützt haben.

Weiterhin möchten wir uns bei allen Studierenden, die sich im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten am Projekt beteiligt haben, sowie bei allen studentischen Hilfskräften für die aktive Mitarbeit bedanken.

## Kurzfassung

Die Wärmewende ist eine große Aufgabe für Deutschland, die nicht mit einer einzigen Technologie gemeistert werden kann. Kalte Nahwärme mit oberflächennahester Geothermie ist ein Baustein der Wärmewende, der noch oftmals übersehen wird, da besonders in urbanen Gebieten häufig zu wenig Fläche zur Verfügung steht. Der sogenannte Erdespeicher ermöglicht eine flächensparende Lösung beim Einsatz von oberflächennahester Geothermie.

Der Erdespeicher ist ein offenes, mehrlagiges Erdwärmekollektorfeld, das dem Erdreich Wärme entzieht. Dabei wird die Temperatur des Wasser-Glykol-Gemischs in den Rohrleitungen so weit herabgesenkt, dass das im Erdreich gebundene Wasser eingefroren und die latente Wärme der Bodenfeuchte genutzt werden kann. Dies führt zu einer erheblichen Steigerung des flächenbezogenen Entzugs. Im Sommer dienen insbesondere die unteren Schichten als Kältequelle zur passiven Gebäudekühlung.

Im Neubaugebiet „An den Wichelkoppeln“ in Schleswig konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens „ErdEis II“ (FKZ: 03ET1634A-E) ein Erdespeicher erstmalig umgesetzt werden. Für den Erdespeicher wurde ein optimierter, trichterförmiger Aufbau entwickelt, der das Volumen und die Oberfläche der auszuhebenden Grube um rund ein Viertel reduziert. Gemeinsam mit anderen Umweltwärmequellen ist es nun möglich, mithilfe eines kalten Nahwärmenetzes und dezentralen Wärmepumpen 61 Baugrundstücke und eine Feuerwache vollständig erneuerbar mit Wärme und Kälte zu versorgen.

Insgesamt wurden zwei Erdespeicher mit einer Kollektorfläche von jeweils rund 1.000 m<sup>2</sup> sowie zwei Großkollektoranlagen mit jeweils rund 1.250 m<sup>2</sup> Kollektorfläche errichtet. Dabei wurde zur wissenschaftlichen Untersuchung jeweils ein Erdespeicher und eine Großkollektoranlage unter einer Freifläche und einem Regenrückhaltebecken installiert und mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Ergänzt werden sie durch 40 m<sup>2</sup> Photovoltaik-thermische Module (PVT) auf dem Dach der neuen Feuerwache.

Die einzelnen Wärmequellen sind über eine komplexe Hydraulik in der Energiezentrale an ein kaltes Nahwärmenetz angeschlossen, das in verschiedenen Betriebsvarianten gefahren werden kann. Dadurch kann bspw. die Abwärme der PVT-Module zielgenau zur aktiven Regeneration des Erdespeichers und/oder zur Anhebung der Vorlauftemperatur des kalten Nahwärmenetzes genutzt werden.

Im Forschungsvorhaben wurden Simulationen der Geothermiequellen und des kalten Nahwärmenetzes eingesetzt, um den Planungsprozess zu unterstützen und unnötig hohe Sicherheitszuschläge zu vermeiden. Im Laufe des Projektes wurden die Simulationsmodelle verfeinert und zu einem großen Gesamtmodell gekoppelt. Damit können die Geothermiequellen, der PVT-Kollektor und das kalte Nahwärmenetz direkt miteinander simuliert und die Wärmeströme untereinander abgebildet werden.

Mithilfe des entwickelten und umgesetzten Monitoringkonzeptes können die Wärmegewinne der Großkollektoranlagen, Erdespeicher und PVT-Anlage separat ermittelt werden. Weiterhin können

die Wärmegevinne der Leitungen zwischen Quellen und Energiezentrale berechnet und damit auf die Wärmegevinne bzw. -verluste des Kalten Nahwärmenetzes geschlossen werden. Um die Geothermiequellen genauer untersuchen zu können, wurde zudem das Erdreich mit Temperatur-, Feuchte- und Grundwasserpegelmessfühlern ausgestattet. Alle Messdaten fließen in einer Datenbank zur wissenschaftlichen Auswertung zusammen.

Die installierte Mess-, Steuer- und Regelungstechnik schafft die Grundlage dafür, im direkt anschließenden Folgevorhaben eine übergeordnete Optimierungsebene einzurichten, die die Strom-, Wärme- und Kälteversorgung des Baugebietes regelt.

Ein weiteres Feature, welches das installierte Monitoringkonzept ermöglicht, ist die Sensibilisierung der Bewohner für ihren Energieverbrauch. Dafür wurde ein Konzept für eine App entwickelt und umgesetzt, mit dem die Bewohner ihren Energieverbrauch und die Energieflüsse in ihrem Gebäude einsehen können. Um in zukünftigen Projekten den Bewohnern zu ermöglichen, selbst Besitzer der Wärmepumpe zu sein, wurde die theoretische Grundlage für Wärmemengenzähler erarbeitet, welche Wasser-Glykol-Gemische kostengünstig abrechnen können.

Im Zuge der messtechnischen Untersuchungen wurde ein eigens für oberflächennahe Geothermie entwickeltes mobiles Thermal-Response-Test-Gerät gebaut und erstmalig erprobt.

Neben den technischen Aspekten wurden im Forschungsvorhaben auch nichttechnische Hemmnisse untersucht. So konnte anhand einer Literaturstudie unter anderem gezeigt werden, dass der Betrieb des Erdespeichers keine negativen Auswirkungen auf Flora und Fauna hat. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die bei Erdwärmekollektoren häufig verwendeten Verbindungen hohe Drücke aushalten sofern diese hochwertig produziert und verbaut wurden. Etwaige Undichtigkeiten durch Material- oder Installationsfehler können durch eine Dichtigkeitsprüfung bereits frühzeitig beim Einbau – und vor der Befüllung mit wassergefährdenden Stoffen – erkannt werden. Bei Untersuchungen zum Abbauverhalten verschiedener Wärmeträgermedien im Erdreich zeigte sich, dass im Labor die realen Bedingungen nur sehr bedingt nachgestellt werden können. Ohne den Einfluss der in der Realität vorkommenden Mikroorganismen, Pflanzen, Unterspülungen durch Regen und Versickerungen lässt sich kein realistisches Abbauverhalten abschätzen – hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Die Erkenntnisse aus der Umsetzung und des ersten Betriebs des Erdespeichers sollen der Öffentlichkeit in Form eines praxistauglichen Auslegungstools für Erdespeicher zur Verfügung gestellt werden. Im Forschungsvorhaben wurden wichtige neue Erkenntnisse zu Einflussfaktoren auf Erdespeicher erzielt. Diese müssen jedoch zunächst im Anschlussvorhaben ErdEis III genauer untersucht werden, bevor ein fertiges Auslegungstool veröffentlicht werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	IX
<b>1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Ausgangssituation und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Gesamtziele des Vorhabens .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Projektpartner .....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Schleswiger Stadtwerke GmbH .....	6
1.3.2 Energie PLUS Concept GmbH .....	6
1.3.3 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.....	7
1.3.4 Technische Universität Dresden .....	8
1.3.5 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen .....	9
<b>2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 AP 1 Technologische und wirtschaftliche Planung und Umsetzung .....</b>	<b>10</b>
2.1.1 AP 1.1 Rechnergestützte Planungsoptimierung .....	10
2.1.2 AP 1.2 Planung und Umsetzung des zentralen Erdeisspeichers .....	25
2.1.3 AP 1.3 Hydraulische Auslegung des Kalten Nahwärmenetzes .....	31
2.1.4 AP 1.4 Sektorenkopplung .....	35
2.1.5 AP 1.5 Systematische Inbetriebnahme.....	37
<b>2.2 AP 2 Messtechnische Erfassung .....</b>	<b>39</b>
2.2.1 AP 2.1 Erdeisspeicher .....	39
2.2.2 AP 2.2 Kaltes Nahwärmenetz .....	45
2.2.3 AP 2.3 Quartier .....	45
2.2.4 AP 2.4 Visualisierung der Energieflüsse für die Bewohner .....	48
2.2.5 AP 2.5 Datenqualitätsprüfung .....	50
<b>2.3 AP 3 Untersuchung nichttechnischer Hemmnisse.....</b>	<b>53</b>
2.3.1 AP 3.1 Einfluss der Einbringung und Vereisung auf die Umwelt .....	53
2.3.2 AP 3.2 Vermeidung von Undichtigkeiten und Einfluss auf die Umwelt.....	56
2.3.3 AP 3.3 Erarbeitung von Abrechnungsmodellen.....	62
<b>2.4 AP 4 Komponentenentwicklung .....</b>	<b>64</b>
2.4.1 AP 4.1 Montagesystem für Erdeisspeicher.....	64
2.4.2 AP 4.2 Zähler zur Abrechnung des Wärmebezuges .....	66
2.4.3 AP 4.3 MSR für ein smartes Quartier.....	68
2.4.4 AP 4.4 Wärmepumpen mit übergeordneter selbstlernender Regelung .....	69
<b>2.5 AP 5 Projektkoordination und Wissenstransfer .....</b>	<b>70</b>
2.5.1 AP 5.1 Projektkoordination .....	70
2.5.2 AP 5.2 Praxistaugliches Auslegungstool für Erdeisspeicher .....	71
<b>3 Fazit und Ausblick.....</b>	<b>80</b>
<b>4 Wissenstransfer.....</b>	<b>82</b>



<b>4.1</b>	<b>Vorträge .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2</b>	<b>Wissenschaftliche Publikationen .....</b>	<b>84</b>
<b>4.3</b>	<b>Weitere Publikationen .....</b>	<b>85</b>
<b>4.4</b>	<b>Auszeichnungen.....</b>	<b>85</b>
<b>4.5</b>	<b>Abschlussarbeiten.....</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>88</b>
<b>6.1</b>	<b>Vollständiger Bericht der RWTH zur rechnergestützten Planungsoptimierung.....</b>	<b>88</b>
<b>6.2</b>	<b>Hygrothermische Bodenmodellierung .....</b>	<b>116</b>
<b>6.3</b>	<b>Beschreibung des DELPHIN-Rohrmodells .....</b>	<b>131</b>
<b>6.4</b>	<b>Darstellung des Hydraulikschemas .....</b>	<b>133</b>
<b>6.5</b>	<b>Darstellung der Betriebsvarianten .....</b>	<b>134</b>
<b>6.6</b>	<b>Abschlussbericht des Lehrstuhls für Aroma- und Geruchsforschung der FAU zum Einfluss von Leckagen auf die Umwelt (AP 3.2).....</b>	<b>137</b>
<b>6.7</b>	<b>Abschlussbericht zum Einfluss der Einbringung und Vereisung eines Erdeisspeichers auf die Umwelt (AP 3.1) .....</b>	<b>148</b>
<b>6.8</b>	<b>Abschlussbericht des Instituts für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik der TU Chemnitz zur Prüfung der Systemdichtheit (AP 3.2) .....</b>	<b>171</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
B	Buchstabe
BUDO	Buildings Unified Data point naming schema for Operation management
DEMS	District Energy Management System
EES	Erdeisspeicher
EPC	Energie PLUS Concept GmbH
FAU	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
FMI	Functional Mockup Interface
FMU	Functional Mockup Unit
GC-MS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie
GKA	Großkollektoranlage
KNW	Kalte Nahwärme
MID	Measuring Instruments Directive
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
PVT	Photovoltaik-thermische Module
RRB	Regenrückhaltebecken
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SSW	Schleswiger Stadtwerke GmbH
TRT	Thermal Response Test
TUD	Technische Universität Dresden
WGK	Wassergefährdungsklassen
WMZ	Wärmemengenzähler
WT	Wärmetauscher
WTM	Wärmeträgermedium
Z	Ziffer
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

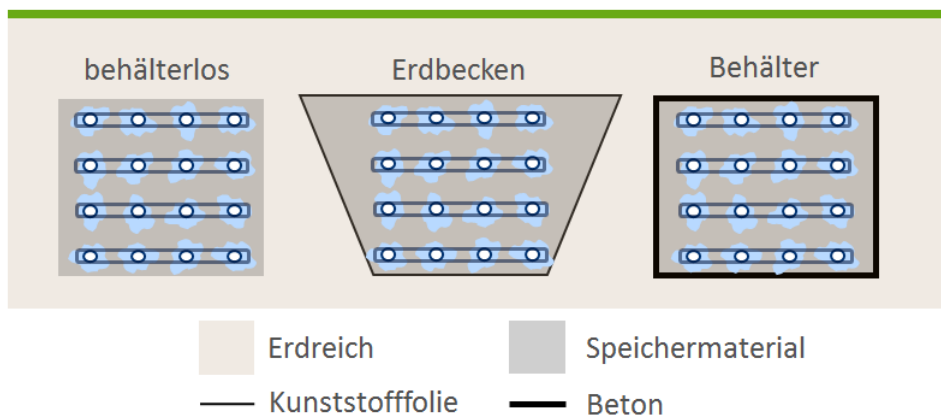
# 1 Aufgabenstellung

Zu Beginn wird die Ausgangssituation und Motivation des Forschungsvorhabens dargelegt. Weiterhin werden die Gesamtziele des Projektes erläutert und die beteiligten Projektpartner mit ihrer jeweiligen Expertise vorgestellt.

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Motivation des Forschungsvorhabens war es, eine platzsparendere Lösung für oberflächennahe Geothermie zu entwickeln und umzusetzen. Besonders in urbanen Gebieten scheitert der Einsatz oberflächennaher Geothermie oftmals an zu geringen verfügbaren Flächen. Als Lösung dafür wurde der sogenannte Erdeisspeicher entwickelt. Er besteht aus flachen Erdwärmekollektoren, die auf mehreren Ebenen übereinander angeordnet sind. Das Erdreich zwischen und um die Ebenen wird gezielt vereist, um die latente Wärme der Bodenfeuchte zu nutzen. Weiterhin kann auf derselben Fläche ein größeres Erdvolumen thermisch erschlossen werden als bei einem normalen einlagigen Kollektorfeld. Durch die Nutzung der Phasenumwandlung kann im Sommer viel Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau eingespeichert und quasi ohne Verluste in den Winter verschoben werden. Der Erdeisspeicher ist somit eine Mischung aus Wärmequelle und Wärmespeicher.

Das vorliegende Forschungsprojekt baut auf den Erkenntnissen des Vorhabens ErdEis (FKZ: 03ET1382) und +Eins (FKZ: 0327431R) auf. In ErdEis wurden verschiedene Speichertypen und deren Einbringungsweise betrachtet; in Abbildung 1 sind drei Speichertypen beispielhaft dargestellt. Zusätzlich wurde die Vereisung von Erdreich in Laborexperimenten untersucht, ein bodenphysikalisches Eismodell numerisch umgesetzt und in der Software DELPHIN der TU Dresden implementiert. Messdaten aus +Eins wurden tiefergehend ausgewertet und dienen zum Entwurf von grundsätzlichen Betriebsszenarien und deren Umsetzbarkeit.



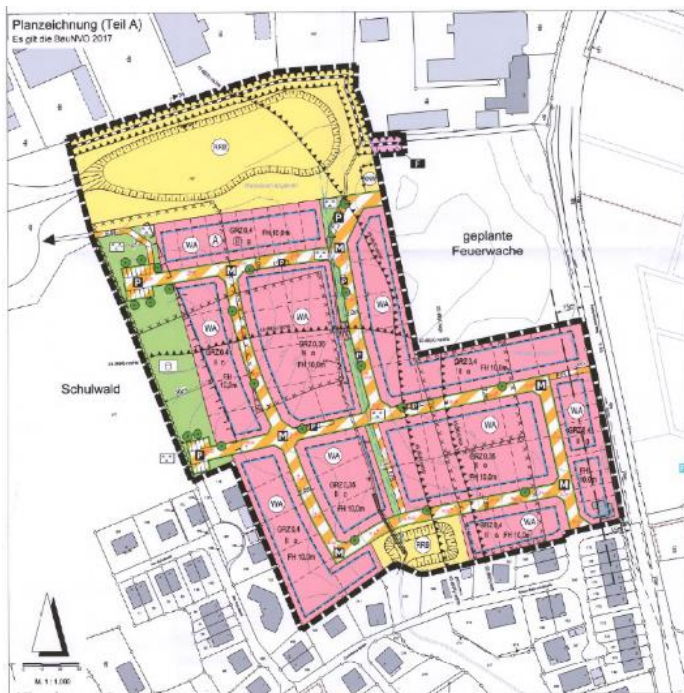
**Abbildung 1: Speichertypen für saisonale oberflächennahe Erdwärmespeicher (Städinger, Stockinger, & Jensch, 2019)**

Da die Ergebnisse eine positive Bewertung ergaben, konnte die praktische Umsetzung anvisiert werden. Die Energie Plus-Concept GmbH und TU Dresden hatten bereits als Partner in ErdEis zusammengearbeitet. Mit der Schleswiger Stadtwerke GmbH wurde ein innovativer Partner gefunden, der die Potentiale eines Erdeisspeichers in Kombination mit oberflächennahen Kollektoren und

einem Kalten Nahwärmenetz sah und bereit war, zeitliche und finanzielle Risiken in Kauf zu nehmen. Die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg mit dem GeoZentrum Nordbayern brachte die notwendige bodenkundliche Expertise in das Konsortium ein und die RWTH Aachen beteiligte sich mit ihrer Kompetenz zur Netz- und Anlagenmodellierung.

Die Grundidee des Erdeisspeichers für ein Wohn- oder Mischgebiet besteht darin, im Winter Wärmepumpen über ein Kaltes Nahwärmenetz mit Quellwärme zu versorgen. Die Temperatur des Wärmeträgermedium im Kalten Nahwärmenetz sinkt dabei mit der Zeit unter 0 °C. Dadurch wird dem Erdreich um die Kollektorebenen des Erdeisspeichers herum Wärme entzogen und das im Boden gebundene Wasser teilweise eingefroren. Im Vergleich zu einem reinen Wasser-Eisspeicher als Betonbaukörper ist eine thermische Abkopplung vom umgebenden Erdreich nicht möglich. Da die Temperatur des Erdeisspeichers jedoch fast ganzjährig unterhalb der Erdreichstemperatur liegt, führt dies hauptsächlich zu Wärmegewinnen statt -verlusten. Der Erdeisspeicher stellt damit einen innovativen Mittelweg zwischen einem reinen Eisspeicher und Erdwärmekollektoren dar. Weiterhin sollten die Baukosten deutlich niedriger als bei einem klassischen Eisspeicher liegen. Der Gegenstand der Untersuchungen im Projekt ist der Erdeisspeicher als Anlagenbauteil, aber auch die Einbindung in das Kalte Nahwärmenetz mit anderen Wärmequellen.

In Abbildung 2 ist die Planzeichnung des B-Plans 100 „An den Wichelkoppeln“ zu sehen. In rosa sind die Bauplätze markiert, die mit Einfamilienhäusern und zwei Reihenhausblöcken bebaut werden. Insgesamt sollten 61 Baugrundstücke entstehen. Im Nordosten – außerhalb des gestrichelten Rahmens – sollte eine Feuerwache entstehen, die wie die Wohngebäude über das Kalte Nahwärmenetz versorgt werden sollte. Im Norden und im Westen befinden sich mit dem großen Regenrückhaltebecken (in Gelb) und einer Freifläche (in Grün) zwei unbebaute Flächen, die geothermisch genutzt werden sollten.



**Abbildung 2: B-Plan 100 „An den Wichelkoppeln“ (Stand Januar 2020)**

Die praktische Umsetzung bedeutet im Hinblick auf die Ergebnisse von ErdEis eine deutlich höhere Komplexität des Gesamtsystems. Um die Wechselwirkungen und Energieströme zwischen Erdespeicher, anderen Wärmequellen, Netz und Verbrauchern zu untersuchen, dienen zum einen Simulationsmodelle und zum anderen ein wissenschaftliches Monitoring.

Bei der Simulation konnte auf Vorarbeiten aufgebaut werden. Das Simulationsprogramm DELPHIN wurde bereits in +Eins zu einfachen Bodensimulationen genutzt, dort allerdings noch ohne Berücksichtigung des Gefrierens und Auftauens. In ErdEis wurde ein Eismodell implementiert und an gemessenen Labordaten von akademischen Böden verifiziert. Bei der Netzsimulation stellte die RWTH Aachen Modelica-Bibliotheken und Eingabeskripte. Die einzelnen Komponenten konnten damit relativ schnell modelliert werden, das Gesamtsystem im Zusammenwirken war aber zu Projektbeginn noch nicht abbildbar. Zudem war die Simulation in Teilen erheblich zu langsam für praktische Untersuchungen.

Das Monitoring soll zur Betriebsüberwachung und Betriebsoptimierung dienen, muss aber auch Eingangs- und Vergleichsdaten für die numerische Simulation des Gesamtsystems und der Einzelkomponenten bereitstellen. Die Sensorik und Datenerfassung werden in Kapitel 2.2.1 und 2.2.3 im Detail beschrieben.

Weiterhin werden Erdwärmekollektoren zwar schon seit vielen Jahren im kleinen Maßstab verwendet, die Umweltauswirkungen – besonders im großen Maßstab – sind jedoch noch weitgehend unerforscht. Aus diesem Grund sollten Umweltauswirkungen beim Einbau, Betrieb und bei eventuellen Leckagen oberflächennahester Erdwärmekollektoren untersucht werden.

## 1.2 Gesamtziele des Vorhabens

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens war die Planung und Umsetzung eines Erdeisspeichers in zwei Varianten zur Wärme- und Kälteversorgung des Neubaugebietes „An den Wichelkoppeln“ in Schleswig. Mit dem Erdeisspeicher soll ein Konzept erprobt werden, welches zukünftig auch bei geringen Flächenangeboten eine effiziente Nutzung von oberflächennahester Geothermie ermöglicht. Der Kern der Aufgabe bestand darin, die praxisbewährte Technologie der oberflächennahesten Geothermie mit der theoretischen Wärme- und Kältespeicherung eines potenziellen Erdeisspeichers an einem realen Pilotprojekt technologisch sinnvoll miteinander zu verbinden. Dies erforderte eine Reihe von Forschungsschwerpunkten, die sich thematisch in die folgenden fünf Schwerpunkten unterteilen lassen.

### Technologische und wirtschaftliche Planung und Umsetzung

Mithilfe simulationsgestützter Untersuchungen sollten wissenschaftlich fundierte Aussagen bezüglich des Energiebedarfs des Quartiers, der Auslegung des Kalten Nahwärmenetzes sowie analytische Untersuchungen der Erdeisspeicher ermöglicht werden. Auf Grundlage dieser Simulationen sollte im Anschluss die Auslegung des Kalten Nahwärmenetzes für das gesamte Quartier sowie die hydraulische und technologische Auslegung der Erdeisspeicher erfolgen. Weiterhin sollte eine mögliche Einbindung weiterer Wärmequellen geprüft werden. Dies beinhaltet Solarthermie ebenso wie industrielle Abwärmequellen.

### Messtechnische Erfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten die Wärmequellen und das Kalte Nahwärmenetz sowie weitere für Untersuchungen interessante Punkte des Quartiers mit umfangreicher Messtechnik und Sensorik ausgestattet werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, das Projekt in einer an die Umsetzung in ErdEis II anschließenden Monitoring-Phase fortlaufend wissenschaftlich begleiten zu können. Die Datenqualität für die Auswertungen sollte durch eine fortlaufende Qualitätsprüfung sichergestellt werden. Bereits in der Inbetriebnahme können durch die messtechnische Erfassung verschiedenste Optimierungsmaßnahmen abgeleitet und durchgeführt werden. Darüber hinaus sollte im Quartier eine Verbrauchsvisualisierung für die Bewohner zur Sensibilisierung für das eigene Energieverhalten im Rahmen des Projektes umgesetzt werden.

### Untersuchung nichttechnischer Hemmnisse

Ein weiteres Ziel war die Untersuchung des Erdeisspeichers auf nichttechnische Hemmnisse, wobei mögliche Auswirkungen durch die Einbringung des Systems auf Flora und Fauna und die spätere Vereisung des Bodens beobachtet werden sollten. Von ebenso großer Bedeutung wurde eine Entwicklung neuer Verfahren zur Sicherstellung der Dichtigkeit des Systems und eine Untersuchung des Einflusses verschiedenster Frostschutzmittel auf die Umwelt im Falle einer Leckage eingestuft. Ein weiteres zu überwindendes nichttechnisches Hemmnis stellte die Entwicklung von neuartigen Abrechnungsmodellen dar. Da der Erdeisspeicher neben der Wärme- auch die Kälteversorgung der angeschlossenen Gebäude übernehmen soll, bedarf es völlig neue Denkansätze für ein geeignetes Abrechnungsmodell.

### **Komponentenentwicklung**

Um die Kosten für zukünftige Anlagen zu reduzieren, sollten im Rahmen des Projektes innovative Verlegungsmöglichkeiten für Erdeisspeicher untersucht werden. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Abrechnung der aus dem Netz gelieferten Energie in Form von Wärme und/oder Kälte. Hierfür sollen neuartige Zähler zur Abrechnung des Energiebezugs entwickelt werden, die die vorher erwähnten neuartigen Abrechnungsmodelle technisch überhaupt möglich machen. Um auch auf die Volatilität sowohl innerhalb des Quartieres als auch aus dem umgebenden öffentlichen Stromnetz reagieren zu können – und somit zur Sicherstellung einer sicheren Stromversorgung beizutragen – sollten eine quartiersübergreifende Mess-, Steuer und Regelungstechnik entwickelt und die hierfür notwendigen Algorithmen implementiert werden. Darüber hinaus steht die Weiter-Entwicklung von selbstlernenden Wärmepumpen für den Einsatz in einer Netzstruktur im Fokus, mit deren Hilfe die Effizienz des Gesamtsystems nochmals gesteigert werden kann.

### **Projektkoordination und Wissenstransfer**

Parallel zur Projektkoordination sollte für den Wissenstransfer ein Auslegungswerkzeug für Erdeisspeicher entstehen. Mithilfe dieses Werkzeuges sollen Planer zukünftig einfach und schnell das ungefähre Potenzial des Erdeisspeicher abschätzen können. Dadurch soll der Erdeisspeicher eine größere Beachtung und einen schnelleren Weg in weitere Projekte finden.

### 1.3 Projektpartner

Das Konsortium setzt sich aus zwei Unternehmen und drei Hochschulen zusammen. Mit der Schleswiger Stadtwerke GmbH und der Energie PLUS Concept GmbH sind zwei Partner dabei, die bei einem Großteil der bisher angestoßenen Projekte mit Großkollektoranlagen beteiligt sind. Dazu kommen mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, der Technischen Universität Dresden und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen drei renommierte Hochschulen, die alle in ihren Fachbereichen an verschiedenen Fragestellungen der oberflächennahen Geothermie forschen. Im Folgenden werden die Partner einzeln vorgestellt.

#### 1.3.1 Schleswiger Stadtwerke GmbH

Die Stadtwerke SH GmbH & Co. KG ist seit dem 1. Januar 2020 die Dienstleistungsgesellschaft mit Sitz in Rendsburg für die Schleswiger Stadtwerke GmbH, die Stadtwerke Eckernförde GmbH und die Stadtwerke Rendsburg GmbH. Die Stadtwerke SH übernehmen die Führung der Betriebe und der Geschäfte der drei Stadtwerke. Konkret engagieren sich die Stadtwerke an den drei Standorten für eine nachhaltige Energieversorgung, die Förderung von E-Mobilität, die Steigerung des regionalen Digitalisierungsanteils und das Entgegenwirken des Fachkräftemangels sowie des Klimawandels. Dafür sorgen knapp 500 Mitarbeitende, darunter Auszubildende in sechs Berufen. Ein Teil des Konzeptes der Stadtwerke SH ist das unternehmerische Engagement und die Weiterentwicklung von Unternehmensbereichen wie der Glasfasertelekommunikation und Wärmekonzepten wie der „Kalten Nahwärme“. Die Stadtwerke SH betreiben aktuell sechs Kalte Nahwärmenetze mit rund 380 Wärmepumpen, im Wesentlichen in einem Leistungsbereich von 4,8 kW für Einfamilienhäuser und bis zu 50 kW für Mehrfamilienhäuser. Zwei weitere Kalte Nahwärmenetze befinden sich aktuell im Bau.

Kontaktdaten:

Schleswiger Stadtwerke GmbH

Werkstraße 1, 24837 Schleswig

Ansprechpartner: Patrick Lucki

Telefon: +49 (0) 4621 801487

E-Mail: [p.lucki@stadtwerke-sh.de](mailto:p.lucki@stadtwerke-sh.de)

Internet: <https://www.stadtwerke-sh.de/>

#### 1.3.2 Energie PLUS Concept GmbH

Die Energie PLUS Concept GmbH ist ein Ende 2018 gegründetes Unternehmen mit Sitz in Nürnberg. Der Fokus des Gründers Prof. Dr.-Ing. Volker Stockinger lag in der Bildung eines Bindeglieds zwischen Praxis und Forschung. So sollen einerseits neueste wissenschaftliche Erkenntnisse innerhalb kurzer Zeit in die Praxis überführt und anwendbar gemacht werden. Auf der anderen Seite können relevante Fragestellungen aus der Praxis an die Forschung weitergegeben werden, um anwendungsnahe Forschung betreiben zu können.

Das Unternehmen fungiert als Consultant für Stadtwerke, Kommunen und Projektentwickler. Die Leistungen erstrecken sich dabei von der Erstellung von Siedlungs- und Quartierskonzepten, der Simulation oberflächennaher Geothermie über Monitoring und Betriebsoptimierung bis hin zur



Fördermittelberatung. Dabei besitzt die Energie PLUS Concept insbesondere bei oberflächennaher Geothermie und Kalter Nahwärme eine herausragende Expertise.

Neben dem nun abgeschlossenen Forschungsvorhaben ErdEis II (FKZ: 03ET1634B) wirkt die Energie PLUS Concept auch beim Anschlussvorhaben ErdEis III (FKZ: 03EN3068C) mit. Darüber hinaus ist das Unternehmen am EU-Forschungsvorhaben REWARDHeat beteiligt. Dort forschen rund 30 europäische Partner an modernen Fernwärmenetzen mit niedrigen Temperaturen.

Kontaktdaten:

Energie PLUS Concept GmbH

Blumenstraße 1, 90402 Nürnberg

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Volker Stockinger

Telefon: +49 (0) 911 235544 01

E-Mail: [v.stockinger@energie-plus-concept.de](mailto:v.stockinger@energie-plus-concept.de)

Internet: [www.energie-plus-concept.de](http://www.energie-plus-concept.de)

### 1.3.3 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ist die größte Universität Nord-Bayerns mit einem Ausgabevolumen von über 800 Millionen Euro und ca. 38.300 Studierenden (WS 2021/22) und stellt einen wesentlichen Bestandteil der regionalen Wirtschaftsleistung dar. Das Angebot von 267 verschiedenen Studiengängen (WS 2021/22) aus einem breit gefächerten Bildungsspektrum, macht die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zu einem derzeit einzigartigem Vorreiter im Bereich der Vernetzung und Interdisziplinarität. Diese Tatsache wird unterstützt durch das Leitbild der Universität: Bewusstsein für Tradition und Innovation. So erreichte die Bildungseinrichtung in intensiver Zusammenarbeit mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen und der Wirtschaft eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von Konzepten und Technologien für die Zukunft.

Die Arbeitsgruppe Oberflächennahe Geothermie (Lehrstuhl für Geologie) als Teil des GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg umfasst das große Themengebiet flacher, erdgekoppelter geothermischer Systeme. Dabei stehen die Wärmetransportprozesse und deren beeinflussende Faktoren unter Realbedingungen im Fokus. Mit Hilfe von geophysikalischen Untersuchungsmethoden und der Ermittlung von petro- und pedophysikalischen Parametern werden groß- und kleindimensionale Interpretationen durchgeführt und Nutzungspotentiale bestimmt. Des Weiteren untersucht die Arbeitsgruppe Oberflächennahe Geothermie im Zuge von Netzausbau-Erdkabel-Projekten bodenkundliche Aspekte in Bezug auf Wärmetransportprozesse. Erdkabel, wie sie beispielsweise zur Hochspannungsgleichstromübertragung genutzt werden, haben aufgrund von regional variierenden Bodenbeschaffenheiten ungleiche Auswirkungen auf das System Boden. Es besteht daher die Notwendigkeit, die Interdependenzen zwischen Trassenführung sowie Wärme- und Wasserhaushalt der betreffenden Böden bereits im frühen Stadium der Trassenplanung mit zu betrachten. Durch Messung der physikalischen Eigenschaften von Böden, dem georeferenzierten Clustern von digitalen Flächendaten, sowie dem Einsatz von Simulationsmodellen, werden Daten geliefert, die eine standortoptimierte Verlegung von Erdkabeln in das System Boden zulassen.

Aktuelle Projekte der Arbeitsgruppe sind:

- ALE: Erarbeitung eines Handlungsleitfadens zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale in ländlichen Gemeinden
- Koordination ZIM Kooperationsnetzwerk Oberflächennahste Geothermie und Kalte Nahwärme 4.0 (FKZ: 16KN085501)
- GEO4CIVHIC: Most Easy, Efficient and Low-Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings
- geoPGT (FKZ: ZF4022803CL8) Entwicklung einer innovativen kostengünstigen Systemprüfung von verfüllten Erdwärmesonden mit hoher lokaler Auflösung
- KNW-Opt (FKZ: 03EN3020C): Bodenkundliche Untersuchungen von Großkollektoranlagen
- Felduntersuchungen Südlink: Koordination und bodenkundliche Begleitung von Testfeldern (Industrieprojekt: TenneT TSO GmbH)
- Geologisch-thermische Simulationen an Erdkabeln / Potentialkarten (Industrieprojekte: Amprion AG / 50Hertz)

Kontaktdaten:

Geozentrum Nordbayern

Schlossgarten 5, 91054 Erlangen

Ansprechpartner: Dr. David Bertermann

Telefon: +49 (0) 9131 85 25824

Fax: +49 (0) 9131 85 29295

E-Mail: [david.bertermann@fau.de](mailto:david.bertermann@fau.de)

Internet: <https://www.gzn.nat.fau.de>

### 1.3.4 Technische Universität Dresden

Die Technische Universität Dresden ist eine Universität des Landes Sachsen mit rund 30.600 Studierenden (Wintersemester 2021/22), 600 Professuren, und ca. 8.600 Beschäftigten. Mit 124 Studiengängen und 17 Fakultäten hat sie eines der breitesten Fächerspektren in Deutschland. Zusammen mit acht anderen Universitäten für technische Studiengänge gründete sie 2006 die TU9 und ist dort das einzige Mitglied aus den neuen Bundesländern.

Ab der dritten Runde der Exzellenzinitiative wurden an der TU Dresden zwei Exzellenzcluster und ein Graduiertenkolleg gefördert. Im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder, deren Förderungsphase im Herbst 2019 begann, war die Universität mit drei geförderten Exzellenzclustern erfolgreich und setzte sich zudem als eine von elf Universitäten in der Förderlinie Exzellenzuniversitäten durch. Die Universität setzt im Rahmen des Dresden-Concept auf interdisziplinäre Kooperationen mit anderen renommierten Forschungseinrichtungen der Stadt.

Das Institut für Bauklimatik forscht in zahlreichen nationalen und internationalen Drittmittel-Projekten. Wichtigste Themen sind neben allen Teilgebieten der Bauphysik das energieoptimierte Bauen, Energiekonzepte für Gebäude und Quartiere, Material- und Bauteilforschung sowie historische Gebäude. Seit mehr als 25 Jahren werden am Institut detaillierte Modelle entwickelt und zur Verwendung in eigenen Projekten, aber auch zum Wissenstransfer in die Praxis in nutzerfreundliche

Software umgesetzt. Die Modellierung wird durch Messungen im bauphysikalischen Labor des Instituts und durch zahlreiche Projekte im Sanierungsbereich, bzw. denkmalgeschützte Bauten validiert.

Während der Schwerpunkt der numerischen Simulationsentwicklung ursprünglich auf gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransportsimulationen lag, beschäftigt sich das Institut seit 2009 intensiver mit raumklimatischer Modellierung und der energetischen Gebäude- und Quartierssimulation.

Im Rahmen des Projekts ErdEis II beschäftigt sich das Institut mit der Modellierung und Simulation der Wärme- und Feuchteprozesse im Erdreich einschließlich des Gefrierens und Auftauens, der geothermischen Wärmequellen und des Kalten Nahwärmenetzes.

### **1.3.5 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**

Die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) ist mit 47.173 Studierenden in 150 Studiengängen die größte technische Hochschule in Deutschland. Jährlich schließen >6.500 Studierende und >900 Doktoranden ihr Studium an der RWTH ab. Die Zahl ausländischer Studierender (10.590 Studierende aus 137 Ländern) und das große internationale Netzwerk der RWTH mit über 100 Universitäten weltweit („formalisierte Kooperationen“) unterstreichen das hohe internationale Ansehen der Hochschule. Der Jahreshaushalt der Hochschule beträgt ca. 1.049 Mio. €, wovon rund 403,7 Mio. € durch Drittmittel gedeckt werden. Die RWTH setzt sich aus 260 Instituten in 9 Fakultäten zusammen. Sie bietet 36 Graduiertenprogramme an, darunter neun von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Graduiertenkollegs. Die RWTH ist eine von 11 deutschen Exzellenzuniversitäten und erhält zusätzliche Mittel für drei Exzellenzcluster aus der Exzellenzinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

In ErdEis II brachte sich der Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH ein. Der Lehrstuhl ist Teil des E.ON Energy Research Centers der RWTH und beschäftigt sich mit Fragestellungen aus dem Bereich der Gebäudeenergie-technik und urbaner Energiesysteme. Das Institut verfügt über umfassende Expertise im Bereich der Gebäudeautomation und dem Quartiersenergiemanagement mit der Analyse der Interaktion zwischen Gebäuden und der Bewertung der Flexibilitätspotentiale durch unterschiedliche Betriebsstrategien und der Berücksichtigung dieser Aspekte in einem integralen Planungs- und Bauprozess. Das Institut ist Teil von zwei laufenden Reallaboren der Energiewende und ist mit seinen über 100 Mitarbeitern und Studentischen Hilfskräften an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben beteiligt.

Kontaktdaten:

RWTH Aachen University

Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Mathieustraße 10, 52074 Aachen

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Telefon: +49 (0) 241 80 49760

E-Mail: [dmueller@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:dmueller@eonerc.rwth-aachen.de)

Internet: <https://www.eonerc.rwth-aachen.de>

## 2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsvorhabens vorgestellt. Die Gliederung orientiert sich dabei an den Arbeitspaketen (AP) des Projektantrages.

### 2.1 AP 1 Technologische und wirtschaftliche Planung und Umsetzung

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens war die erstmalige Umsetzung eines Erdeisspeichers (EES). Dieses AP enthält die komplette Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme der EES und des restlichen Wärme- und Kälteversorgungskonzeptes. Die Auslegungen wurden dabei mit Hilfe von Simulationsmodellen wissenschaftlich untermauert.

#### 2.1.1 AP 1.1 Rechnergestützte Planungsoptimierung

Im Forschungsvorhaben sollte die Planung und Auslegung der EES, des Netzes und ggf. anderer Wärmequellen durch die Nutzung von Simulationen unterstützt werden. Durch die möglichst realitätsnahe Simulation des späteren Betriebes sollten unnötig große Sicherheitszuschläge vermieden und dadurch Kosten eingespart werden.

Zu Beginn des Projektes lag der Bebauungsplan für das Baugebiet „An den Wichelkoppeln“ bereits vor. Zudem wurden Baugrunduntersuchungen auf dem Gelände durchgeführt und die Ergebnisse mit Angaben zu Grundwasserständen und Bodenbeschaffenheit an die Partner weitergegeben.

##### 2.1.1.1 Konzipierung der Wärmequellen

Da die tatsächliche Leistungsfähigkeit des EES bisher nicht real getestet werden konnte und die Verlässlichkeit der Simulationen hinsichtlich des EES noch nicht garantiert werden konnte, sollte der EES nicht die einzige Wärmequelle sein, sondern durch weitere Wärmequellen unterstützt werden. Von der Stadt Schleswig kam der Wunsch, auf dem Dach der Feuerwache moderne Photovoltaik-thermische Module (PVT-Module) zu installieren. Weiterhin sollten einlagige Erdwärmekollektorfelder – sogenannte Großkollektoranlagen (GKA) – den EES unterstützen. Diese Unterstützung durch andere Wärmequellen entspricht auch der teilweisen Funktion des EES als Wärmespeicher, der eine aktive Regeneration im Sommer benötigt.

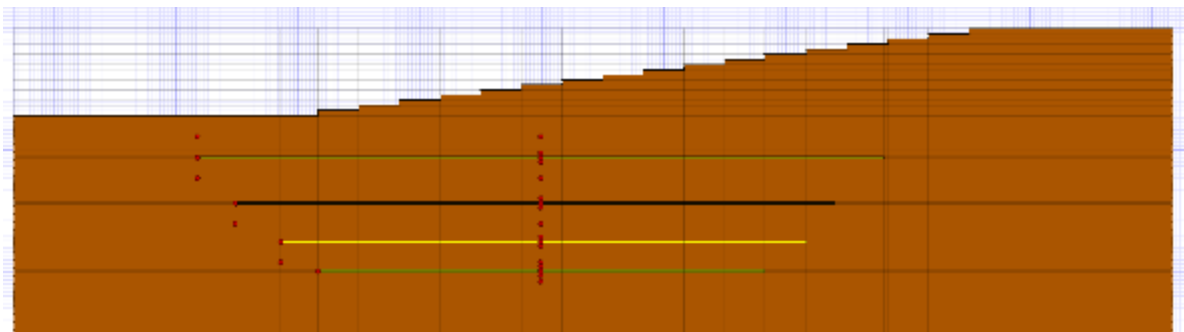
Regenrückhaltebecken (RRB) werden seit einigen Jahren in quasi jedem Neubaugebiet gefordert. Da sie nicht überbaut werden können und das Erdreich darunter meist eine höhere Feuchtigkeit besitzt, könnten sie sich sehr gut für oberflächennahe Geothermie eignen. Um diesen Vorteil gegenüber einer Installation unterhalb einer Freifläche untersuchen zu können, wurde sich dafür entschieden, jeweils einen EES und eine GKA sowohl unter dem RRB im Norden als auch unter der Freifläche im Westen des Baugebietes zu installieren. Sie sollen dabei an beiden Standorten identisch aufgebaut werden, um möglichst genaue Vergleiche zu ermöglichen.

##### 2.1.1.2 Simulation der Erdeisspeicher und Großkollektoranlagen

Die Energie PLUS Concept GmbH (EPC) erstellte mit der Software DELPHIN zunächst erste Simulationen zur Grobdimensionierung der EES und der GKA. Die EES sollten quadratisch umgesetzt werden; es wurde entschieden, ca. die obersten 5 m des Erdreichs thermisch zu erschließen. Dafür sollten

vier Kollektorebenen mit einem vertikalen Abstand von 1 m und mit einer Überdeckung von rund 1,5 m installiert werden. Die Überdeckung der GKA sollte ebenfalls 1,5 m betragen. Aufgrund noch offener Angaben zur Geländemodellierung zur Begradigung des Baugebietes konnte in den Simulationen die Feuchte des Bodens und die Höhe des Grundwassers – zwei sehr entscheidende Faktoren für den möglichen Wärmeentzug – nicht abschließend eingestellt werden. Dadurch ließen sich nur grobe Schlüsse zur Leistungsfähigkeit ziehen. Daher flossen in die Dimensionierung auch Erfahrungen aus anderen Projekten von Seiten der Schleswiger Stadtwerke GmbH (SSW) und der EPC ein. Der genaue Aufbau und die Größen der EES und GKA sind in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

Nach dem Einbau des EES und der GKA unter der Freifläche (siehe Kapitel 2.1.2) wurden sie von der Fa. Steinhäuser per GPS vermessen. Anhand dieser Parameter wurden die zweidimensionalen DELPHIN-Simulationen für den EES und die GKA unter der Wiese angepasst (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3: DELPHIN-Simulation des Erdispeichers unter der Freifläche mit Einbauparametern**

Die genaue Position der eingebauten Messfühler wurde ebenfalls erfasst und möglichst realitätsgetreu in der DELPHIN-Simulation umgesetzt. Mit diesen Modellen können zu einem späteren Zeitpunkt die Simulationen mit den Messdaten verglichen werden.

#### 2.1.1.3 Simulation des PVT-Kollektors

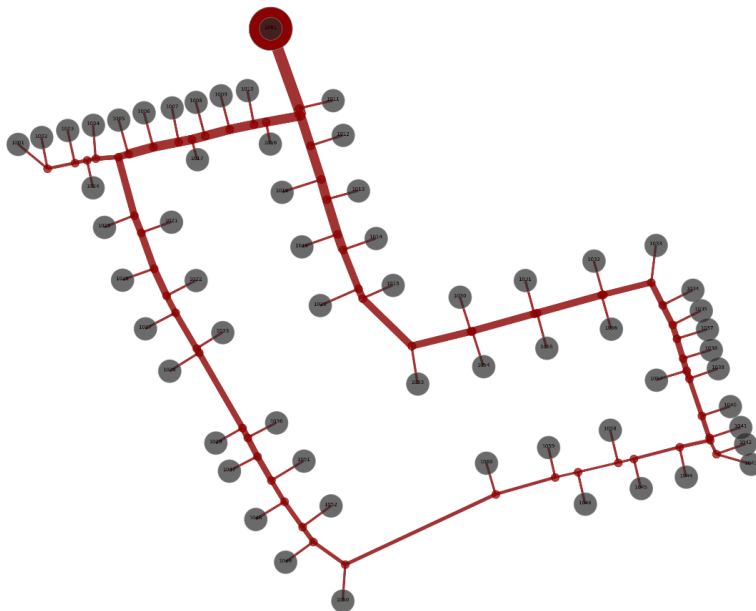
Von Seiten der Stadtwerke war gewünscht, moderne PVT-Module auf dem Dach der Feuerwache anzubringen und in das Versorgungskonzept einzubinden. Die PVT-Module liefern sowohl Strom als auch Wärme. Die Anzahl und Größe der Module stand mit 20 Modulen á 2 m<sup>2</sup> ziemlich zum Anfang der Planung fest. Es wurde festgelegt, dass die Geothermiequellen auch ohne PVT-Kollektor ausreichen. Damit war die Simulation des PVT-Kollektors für die Planung nicht relevant, sondern wurde erst bei der Entwicklung der gekoppelten Simulation in Betracht gezogen (siehe Kapitel 2.1.1.5).

#### 2.1.1.4 Simulation des Kalten Nahwärmenetzes

Das Kalte Nahwärmenetz (KNW-Netz) – im Projekt auch Sekundärnetz genannt – wurde zunächst für die Planung von der RWTH mit Modelica, speziell hinsichtlich der Druckverluste, modelliert. Für die Wärmegewinne und -verlust des KNW-Netzes wurde zunächst zur Abschätzung ein vereinfachtes DELPHIN-Modell verwendet. Die Simulationskopplung von KNW-Netz, Wärmebedarfen und den EES und GKA wurde erst im Lauf des Projektes entwickelt und stand zu diesem Zeitpunkt für die Netzplanung noch nicht zur Verfügung.

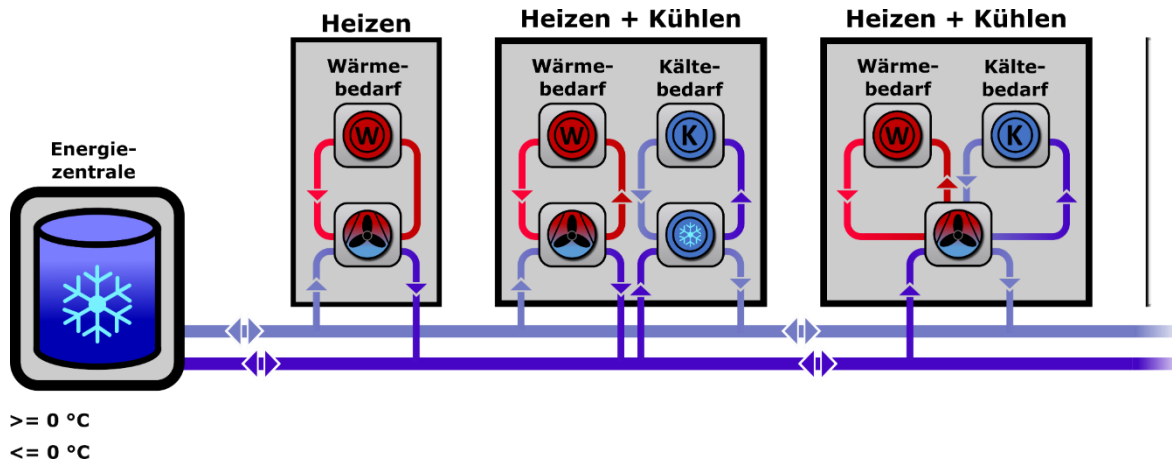
### Simulationsmodell der RWTH mit Modelica

Zunächst wurden die für eine erfolgreiche Durchführung des Projektes erforderlichen Simulationsmodelle und Methodik analysiert und notwendige Erweiterungen, speziell im Bereich der Nutzung für die Simulation von Wärmenetzen der 5. Generation, durchgeführt. Hierzu zählt die Nutzung des Open-Source und frei verfügbaren Programms *QGIS* zur Erstellung der benötigten Netztopologie auf Basis von OpenStreetMaps-Daten und des frei zugänglichen Bebauungsplans der Stadt Schleswig. Das so skizzierte Netz wurde mit Hilfe des Geo austauschdatenformats *GEOJSON* an das Open-Source Tool *uesgraphs* weitergegeben. Damit konnte eine graphenbasierte Darstellung (exemplarisch dargestellt in Abbildung 4) der Netztopologie erfolgen. Darüber hinaus wurde das öffentliche Python-Paket *uesgraphs* hinsichtlich der automatisierten Auslegung von Wärmenetzen der 5. Generation erweitert und ermöglicht hierbei die Berücksichtigung einer mittleren Leistungszahl von Wärmepumpen zur Rohrdurchmesser-Dimensionierung.



**Abbildung 4: Darstellung der Rohrdurchmesser mit Hilfe des Graphenframeworks *uesgraphs***

Diese automatisierte Erstellung der Netzsimulation wurde hinsichtlich des Exports von Netzmodellen der 5. Generation stark angepasst. So wurden verschiedene Einspeisemodelle und Hausübergabestationen, wie in Abbildung 5 dargestellt, implementiert, welche sich durch ihre Nutzung im Bereich der KfW stark von konventionellen Netzen unterscheiden. Die so erstellten Simulationsmodelle sind voll funktionsfähig und konnten bereits für erste Plausibilitätsstudien zur Effizienz des Gesamtsystems und des Netzbetriebs genutzt werden.



**Abbildung 5: Schematische Darstellung des Netzes mit Eisspeicher und verschiedenen Gebäudeübergabesystemen**

Hinsichtlich der Untersuchung auf unterschiedliche Auslegungseinflüsse wurde vor allem der Einfluss des Trinkwarmwassersbedarfs auf die Gesamtsystemeffizienz untersucht. Hierfür wurden verschiedene Simulationsmodelle in unterschiedlicher Detaillierungstiefe entwickelt und getestet. Es hat sich herausgestellt, dass ein guter Kompromiss zwischen Simulationszeit und Genauigkeit für den Anwendungsfall der Systemauslegung gefunden werden kann.

Im Weiteren wurde der Einfluss der Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Rohrnetz genauer untersucht. Hierbei wurde das in Modelica verwendete Simulationsmodell mit Hilfe des Finite-Volumen-Modells aus DELPHIN kalibriert. Hierbei wurde unter anderem die standardisierte Functional-Mockup-Schnittstelle (Functional Mockup Interface / FMI) verwendet, welche in DELPHIN während dieses Projektes implementiert wurde. Das Ergebnis der Kalibrierung ermöglicht es, die Wärmeübertragung zwischen dem im Erdreich verlegten Rohrleitungen genauer zu berücksichtigen. Weitere Untersuchungen und die Entwicklung eines verbesserten Ersatzmodells in Modelica wurden durchgeführt, konnten allerdings noch nicht für die Anwendung in der Netzsimulation optimiert werden. Die Komplexität des Leitungsmodells in Kombination mit dem Gesamtsystemmodell führt hierbei zu stark erhöhten Rechenzeiten. Aus diesem Grund muss für zukünftige Arbeiten eine erneute Vereinfachung der Modellierung angestrebt werden.

Der Fokus der Simulation der RWTH lag im Projekt auf der Unterstützung der hydraulischen Auslegung des Netzes. Hierbei wurde der Einfluss der Rohrdimensionierung auf die benötigte Pumpenergie sowie die dabei auftretenden maximal notwendigen Drücke und die entsprechenden Massenströme untersucht. Es wurden vier verschiedene Rohrdimensionierungen mit jeweils einem zentralen Pumpenfall und einem dezentralen Pumpenfall simuliert. Für beide Simulationsvarianten gilt, dass der Referenzauslegungsfall der SSW als technisch und wirtschaftlich umsetzbarer Fall angesehen werden kann. Eine Überdimensionierung des Netzes hätte aus hydraulischer Sicht Vorteile bieten können, welche mit den zusätzlichen Kosten für größere Nenndurchmesser abgewogen werden sollten. Eine Unterdimensionierung und somit die Wahl kleinerer Rohrdurchmesser war nach den zugrundeliegenden Simulationen nicht zu empfehlen. Aus energetischer Sicht stellte sich der dezentrale Pumpenfall als der günstigere dar, allerdings bleiben hier die technischen Eigenschaften der

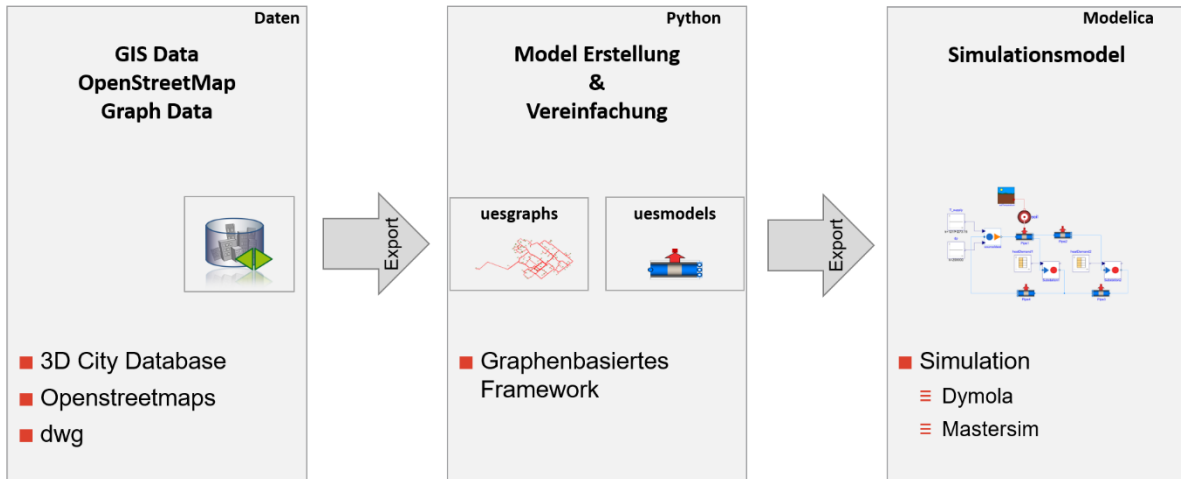
dezentralen Pumpen zu prüfen. Ein möglicher Kompromiss wurde in einem sogenannten Hybridnetz, eine Kombination aus dezentralen Pumpen und einer zentralen Zusatzpumpe, gesehen. Die durchgeführten Simulationen mit einer zusätzlichen zentralen Pumpe, welche die Druckverluste der Energiezentrale, GKA und der EES im Starklastfall überwindet, führten zu einer sichereren Versorgungssituation. Bei einem reinen dezentralen Pumpenbetrieb wurde die Versorgungssicherheit durch die Betriebsgrenzen der geplanten, zum Einsatz kommenden Pumpen begrenzt. Die zusätzliche zentrale Pumpe ermöglicht den Betrieb der dezentralen Pumpen im zulässigen Betriebsbereich und sorgt somit für eine Erhöhung der Versorgungssicherheit.

Zur Bewertung des Gesamtsystems der KNW mit EES, GKA, dem hydraulischen Netz und den angeschlossenen Gebäuden wurde eine gekoppelte Simulation mit Hilfe der FMI-Schnittstelle realisiert. Hierbei wurde das Netzmodell mit den angeschlossenen Hausübergabestationen und Wärmepumpen in eine FMU (Functional Mockup Unit) überführt. Die gleiche Überführung in eine FMU wurde für die DELPHIN Simulationsmodelle für den EES und die GKA realisiert. Alle drei Modelle wurden mittels Co-Simulation zu einer gekoppelten Simulation verbunden, siehe dazu auch Kapitel 2.1.1.5. Hierbei konnte eine erhebliche Verbesserung der Genauigkeit der Simulation im Vergleich zu den getrennten Simulationsdurchführungen erzielt werden. Hierbei werden die Einflüsse des trägen und zugleich komplexen Erdreichmodells direkt an die Netzsimulation und somit mit der Wärmebereitstellung in den Gebäuden gekoppelt. Diese Art der Simulationsdurchführung ist gerade im Bereich der Wärmenetze 5. Generation ein großer Fortschritt und sollte in zukünftigen Arbeiten weiterhin angestrebt werden.

Grundlegender Bestandteil des Projektes war die simulative Unterstützung zur hydraulischen Auslegung des KNW-Netzes der SSW. Hierbei wurden öffentlich verfügbare Simulationsmodelle für den Anwendungsfall angepasst und zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt (<https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>). Durch diese Veröffentlichung ist es sowohl Wissenschaftlern als auch Fachplanern möglich, die Modellierungssprache Modelica zur dynamischen Netzsimulation KNW-Netze zu verwenden.

Im Bereich der thermischen Netzsimulation von KNW-Netzen wurde die automatisierte Modellerstellung, schematisch dargestellt in Abbildung 6, im Rahmen des Projektes weiterentwickelt. Hierbei wurde eine Schnittstelle zum frei verfügbaren GIS Programm QGIS entwickelt, welche im Rahmen von zukünftigen Forschungsprojekten weiter genutzt werden kann. Ein weiterer Fokus lag auf der Entwicklung eines detaillierteren Erdreichmodells zur genaueren Abschätzung der Wärmeübertragung des Netzes mit dem Erdreich. Hierbei wurde der Grundstein für eine zukünftige Weiterentwicklung der Modelle und deren Anwendung in der Simulation von Netzen der 5. Generation gelegt.





**Abbildung 6: Ablauf automatisierte Modellerstellung**

Die wissenschaftlichen Ergebnisse konnten im Rahmen des IBPSA Project 1 vorgestellt werden.

Mögliche Nutzer sind andere Wissenschaftler und Planer von KNW-Netzen für Liegenschaften. Die im Projekt verwendeten Simulationsmodelle sind open-source verfügbar und werden unter anderem im Rahmen der AixLib-Bibliothek weiterentwickelt (<https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>). Die Werkzeuge TEASER (<https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>) und uesgraphs (<https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs>) zur automatisierten Erstellung von Gebäudemodellen bzw. thermischen Netzmodellen sind ebenfalls open-source verfügbar. Des Weiteren wurde der betrachtete Anwendungsfall als einer von drei in einer Fachzeitschriftenpublikation zur automatisierten Generierung von thermo-hydraulischen Netzsimulationen KNW-Netze publiziert (<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/12/4372>).

Der vollständige Bericht der RWTH befindet sich in Anhang 6.1.

### Simulationsmodell in DELPHIN

Die Hauptfunktion des KNW-Netzes ist der Transport des Wärmeträgermediums von den Wärmequellen zum Wärmeverbraucher, den dezentralen Wärmepumpen. Da die Mediumstemperatur im KNW ähnlich wie bei den Geothermiequellen fast ganzjährig unterhalb der umgebenden Erdreichstemperatur liegt, nimmt das KNW bilanziell Wärme auf und kann als großer, in die Länge gezogener Erdwärmekollektor angesehen werden. Aus diesem Grund müssen die Rohrleitungen auch nicht gedämmt werden, da der Wärmeaustausch mit dem Erdreich vorteilhaft ist.

In der Planungsphase sollten die Netzgewinne bzw. -verluste grob abgeschätzt werden, um die Größe der EES und GKA bestimmen zu können. Dazu wurden vereinfachte DELPHIN-Modelle erstellt, aus denen für verschiedene Rohrdurchmesser bei einem abgeschätzten Mediumstemperaturverlauf die spezifischen Wärmegewinne/-verluste pro Meter ermittelt werden konnten. Mithilfe der groben Durchmesser und Rohrlängen der Vorplanung des KNW konnten die Wärmegewinne/-verluste grob abgeschätzt werden. DELPHIN wurde in den letzten Jahren entsprechend weiterentwickelt, um damit unter anderem auch den Wärmeaustausch zwischen Medien in Rohren und dem Erdreich zu simulieren. Bei den Simulationen wird das Erdreich zweidimensional hydrothermisch mit

Berücksichtigung der Eisbildung simuliert und Einflussgrößen wie die Bodenfeuchte, Grundwasserströmungen und das Außenklima berücksichtigt. Dafür wurde die Simulation für Boden- und Kollektorberechnung im Rahmen von +Eins an Messwerten verifiziert und die Eisbildungsmodellierung im Projekt ErdEis mit Laborversuchen abgeglichen.

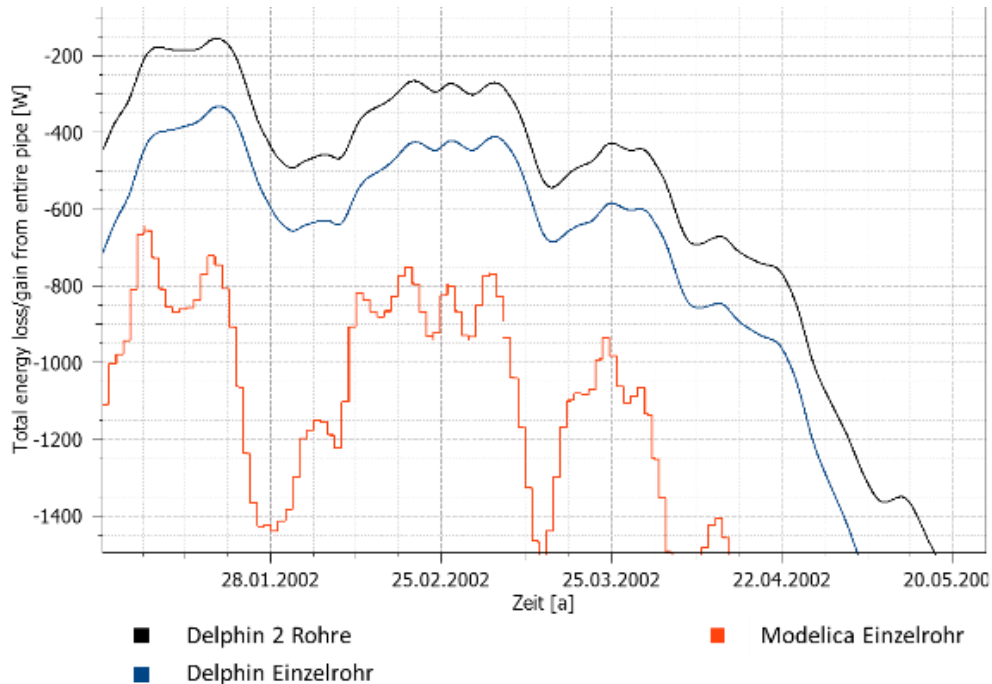
Für einen späteren Vergleich der Netzsimulation mit Messdaten ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet, da viele Effekte nicht berücksichtigt werden. So sind die Ergebnisse stark vom Temperaturprofil abhängig, das für die Mediumstemperatur angenommen wird. Weiterhin wurden die verschiedenen Abschnitte des KNW-Netzes separat voneinander simuliert und nicht in Reihe geschaltet. Im Falle einer gekoppelten Simulation, bei der alle Komponenten direkt miteinander verbunden sind, können deutlich realistischere Ergebnisse erwartet werden.

### **Thermischer Vergleich der Rohrmodelle in DELPHIN und Modelica**

Wie bereits erwähnt, ist das Ziel der gekoppelten Simulation eine genauere Berechnung der Wärmegewinne des Netzes und erneuerbaren Wärmequellen. Die Wärmeübertragung zwischen Fluid und Erdreich wird in den beiden beschriebenen Ansätzen, dem Modelica-Modell und dem DELPHIN-Modell eines Rohres im Erdreich, unterschiedlich betrachtet.

Der Ansatz in Modelica (Heijde & u.a., 2017) im oben beschriebenen Fall a) nimmt eine eindimensionale radialsymmetrische Wärmeleitung im Erdreich an. Das Erdreich wird also in mehreren Kreisingen um das Rohr diskretisiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass in ausreichendem Abstand die ungestörte Erdreichtemperatur vorliegt, welche als Randbedingung angegeben werden kann. In DELPHIN, Fall b) wird das Erdreich hingegen zweidimensional um das Rohr diskretisiert. Es besteht somit die Möglichkeit, an der Erdoberfläche verschiedene Klimarandbedingungen wie kurzweilige Strahlung, langweilige Strahlung und thermische Konvektion anzulegen. Die Erdreichtemperatur im Bereich um das Rohr stellt sich dann als Ergebnis der Berechnung ein. Dabei besteht auch die Möglichkeit zwei nebeneinanderliegende Rohre mit verschiedenen Fluidtemperaturen abzubilden, wie sie typischerweise als Vor- und Rücklauf in einem Nahwärmenetz vorhanden sind.

Um die Ergebnisse beider Modelle zu vergleichen, wurde eine Referenzsimulation mit identischen Parametern für beide Modelle durchgeführt. Es wurde jeweils der Massenstrom und die Eintrittstemperatur vorgegeben und die Austrittstemperatur aus einem 100 m langem Rohr mit einem Außendurchmesser von 148 mm berechnet. Dabei wurde bei dem DELPHIN-Modell sowohl ein einzelnes als auch zwei nebeneinanderliegende Rohre modelliert. Das Modelica-Modell geht von einem einzelnen Rohr aus. Die Simulation wurde für einen Zeitraum von 3 Jahren durchgeführt, wobei nur die erste Hälfte des dritten Jahres ausgewertet wurde, um ein Einschwingen des Erdreichs zu ermöglichen. Der Wärmestrom zwischen Fluid und Erdreich ist in Abbildung 7 dargestellt. Ein negativer Wert bedeutet dabei, dass Wärme vom Erdreich in das Rohr fließt.

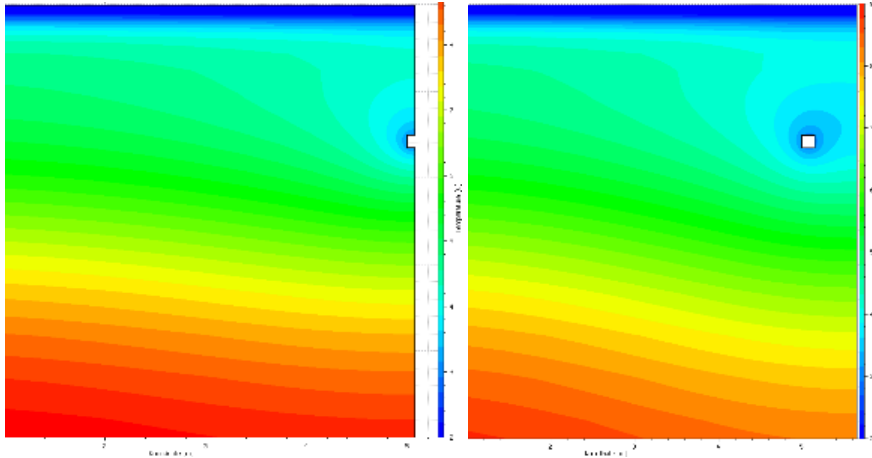


**Abbildung 7: Berechnete Wärmegewinne des DELPHIN- und des Modelica-Modells für die erste Hälfte des Jahres**

Es ist klar zu erkennen, dass bereits zwischen den beiden Ansätzen in DELPHIN ein deutlicher Unterschied auftritt. Wird ein einzelnes Rohr im Erdreich abgebildet, sind die Wärmegewinne ca. 50 % höher als bei dem realitätsnäheren Doppelrohr. Der mit dem Modelica-Modell berechnete Wärmestrom weicht noch deutlicher von dem DELPHIN Doppelrohr ab. Er ist um bis zu 400 % höher, was aus der stark vereinfachten Berechnung resultiert. Die Vorgabe einer festen Temperatur in einer bestimmten Entfernung des Rohrs vereinfacht stark das tatsächliche Temperaturfeld und überschätzt somit den Wärmegewinn teilweise drastisch. Das Temperaturfeld der DELPHIN-Modelle ist in Abbildung 8 dargestellt. Durch die Nutzung der Symmetrie ist jeweils nur die Hälfte des Simulationsgebiets dargestellt. Werden die unterschiedlichen Vor- und Rücklauftemperaturen berücksichtigt, müssen im rechts dargestellten Fall beide Leitungen diskretisiert werden; eine Nutzung der Symmetrie ist dann nicht möglich.

Es ist erkennbar, dass sich die Temperaturen an verschiedenen Positionen im Erdreich deutlich unterscheiden und sich ein relativ komplexes Temperaturfeld einstellt. Dieses lässt sich nur unzureichend mit einer radialsymmetrischen eindimensionalen Geometrie beschreiben, wie im Modelica-Modell angenommen. Obwohl ein Abgleich mit Messdaten noch nicht möglich ist, ist erkennbar, dass das detaillierte Modell das Zusammenwirken der oberen Klimarandbedingung und dem Erdreich als unterhalb liegendem Simulationsbereich realistischer beschreibt.

Daraus wird deutlich, dass das KNW-Netz als separates Modell unter Berücksichtigung der realen Geometrie betrachtet werden sollte. In Modelica wurde dies von der RWTH mit einer Modellierung nach (Glück, 2008) realisiert.



**Abbildung 8: Temperaturfelder der beiden DELPHIN-Modelle im Vergleich. Links: Einzelrohr, Rechts: Doppelrohr**

#### 2.1.1.5 Simulationskopplung und Gesamt-Simulationsmodell

Auswertungen von Messdaten von Projekten mit Kollektorfeldern als Teil eines KNW-Netzes haben gezeigt, dass das Netz wesentlich zum Verhalten des Systems beiträgt. Der Wärmeaustausch zwischen dem KNW-Netz und Erdreich spielt eine erhebliche Rolle, so dass das KNW-Netz auch als ein Kollektor betrachtet werden muss und deshalb nicht vernachlässigt werden sollte. Ein wesentliches Ziel im Projekt war es, ein vollständiges Simulationsmodell des KNW-Netzes zusammen mit dem EES, den GKA und dem PVT-Kollektor zu entwickeln.

##### DELPHIN-Modelica-Kopplung

In der ersten Projektphase wurde die Kopplung der Modelle des Kollektors in DELPHIN und des KNW-Netzes in Modelica mit Hilfe von FMI-Schnittstellen durchgeführt. Parallel zur Berechnung mit Modelica erschien aber auch der Ansatz einer Kopplung mehrerer DELPHIN-Modelle zur vereinfachten Abbildung des KNW-Netzes vielversprechend. Dieser wurde in der späteren Projektphase verfolgt.

Das Netzmodell der RWTH in Modelica (Dymola) bildet das KNW-Netz zusammen mit Übergabestationen und Wärmepumpen der einzelnen Gebäude ab und berücksichtigt auch den Wärmeaustausch des Netzes mit dem umgebenden Erdreich in einem vereinfachten Ansatz. Die EPC entwickelte in Zusammenarbeit mit der TU Dresden (TUD) Simulationsmodelle des EES und der GKA mit der hygrothermischen Simulationssoftware DELPHIN.

Die Modelle arbeiten als einzelne gekapselte Elemente mit nach außen sichtbaren Schnittstellen. Für die gekoppelte Simulation müssen diese Schnittstellen verknüpft werden. Diese Verbindung sowie die Simulationssteuerung muss von einem separaten Programm, dem sogenannten Simulationsmaster, übernommen werden.

Am Institut für Bauklimatik der TUD wurde eine Software „MasterSim“ entwickelt, die diese Aufgaben – Verknüpfung der Einzelmodelle (FMUs) und Steuerung der Simulation – übernehmen kann. Dazu werden zunächst die Einzelmodelle importiert. Um die Verknüpfung für die Simulation zu

erstellen, werden die einzelnen Schnittstellen, d. h. Daten-Eingänge und -Ausgänge, der Modelle verbunden. Die FMUs können als Symbole frei angeordnet werden; die Schnittstellenverbindungen werden mit Linien dargestellt.

Je nach Art des Modells können sowohl eine als auch mehrere Eingaben und Ausgaben vorhanden sein. Skalare Eingabedaten wie z. B. Klimawerte können im FMU-Modell integriert sein oder auch vergleichbar zu einer FMU in MasterSim verknüpft werden. Um die Ausgaben von FMUs zusammenzufassen, z. B. zur Mittelwertbildung bei der Zusammenführung der Rückläufe getrennt simulierter Kollektoren oder den einzelnen Ebenen im EES, können ebenfalls einfache FMUs genutzt werden.

Mit diesen Mitteln wurde zunächst eine Kopplung des KNW-Netzmodells der RWTH mit den mit den DELPHIN-Modellen für die EES und GKA in MasterSim umgesetzt. Das Netzmodell erhält eine Einlasstemperatur (d. h. die Vorlauftemperatur des Netzes) und stellt eine Auslasstemperatur und einen Massenstrom zur Verfügung. Das Netz umfasst auch die Wärmepumpen zusammen mit den Wärmebedarfsprofilen der Gebäude. Der Massenstrom wird in der Simulation anhand der Anforderungen an die Wärmepumpen berechnet und im Netz durch eine zentrale Pumpe geregelt.

Die EES und GKA werden hier jeweils durch zwei verschiedene Modelle abgebildet: Ein Rohrmodell (eine eigens dafür erzeugte FMU) und ein Erdreichmodell (mit DELPHIN erzeugt). Diese Modelle erhalten ihre Eingangsdaten vom Netz und liefern wiederum ihre Ergebnisdaten dem Netz als dessen Input. Eine genaue Beschreibung des Rohrmodells findet sich in Anhang 6.3.

Dieser Modell-Prototyp des Gesamtsystems in Schleswig war grundsätzlich rechenfähig, allerdings lagen die Simulationszeiten noch deutlich zu hoch, um z. B. Variationsstudien durchzuführen.

Gegen Ende des Projektzeitraums wurde daher mit der zwischenzeitlich an der TUD entwickelten Software Sim-Vicus ein alternatives Netzmodell erstellt, dies wird im Folgenden vorgestellt.

### **Gekoppelte Simulation des Gesamtsystems**

Im weiteren Projektfortschritt wurde die gekoppelte Simulation durch EPC und TUD weiter ausgearbeitet und an die Planungsdaten angepasst. Die SSW lieferten die Rohrlänge und Durchmesser des Primär- und Sekundärnetzes. Unter dem Primärnetz versteht man dabei das Rohrnetz, welches die Wärmequelle mit der Energiezentrale verbindet. Das Sekundärnetz ist das KNW-Netz (siehe auch Kapitel 2.1.2). Aus diesen Angaben erstellte die EPC DELPHIN-Modelle für Primär- und Sekundärnetz. Das Primärnetz besteht aus Leitungen mit unterschiedlichen Durchmessern und Längen, da jeder EES zwei und jede GKA eine eigene Rücklaufleitung zurück zur Energiezentrale besitzt. Da die Rohrleitungen nebeneinander liegen, aber an unterschiedlichen Stellen enden, konnte der reale Aufbau nicht exakt im 2D-Modell nachgebildet werden. Es wurde für das Primärnetz deshalb entschieden, im Modell alle Vorlaufleitungen in einer etwas größeren Leitung (DN225) zusammenzufassen und ebenso für den Rücklauf diesen Durchmesser zu verwenden. Im Gegenzug wurde die gesamte Rohrlänge gekürzt. Die dadurch entstehende Abweichung ist für das Gesamtsystem vernachlässigbar und kann in Zukunft möglicherweise durch genauere Simulationsmodelle verringert werden.

Aufgrund der oben beschriebenen Vor- und Nachteile, die Simulation des Netzes mit Dymola-Modica durchzuführen, wurde in der letzten Projektphase ein Gesamtmodell mit der im Projektzeitraum

an der TUD entstandenen Software Sim-Vicus erstellt. Diese ermöglicht neben der energetischen Gebäudesimulation die thermohydraulische Simulation von Nahwärmenetzen.

Zur Simulation nutzt die Software den ebenfalls an der TUD entwickelten Solver NANDRAD. Durch den sehr effizienten Solver läuft die Berechnung deutlich schneller. Je nach Anwendungsschwerpunkt haben beide Ansätze ihre Berechtigung. Dymola-Modelica stellt ein sehr flexibles und allgemeines Werkzeug dar und kann auf viele durch die Community entwickelte Bibliotheken und Module zurückgreifen. Sim-Vicus/NANDRAD bietet dagegen durch die Spezialisierung den Vorteil der höheren Effizienz der Lösung und damit deutlich geringere Laufzeiten.

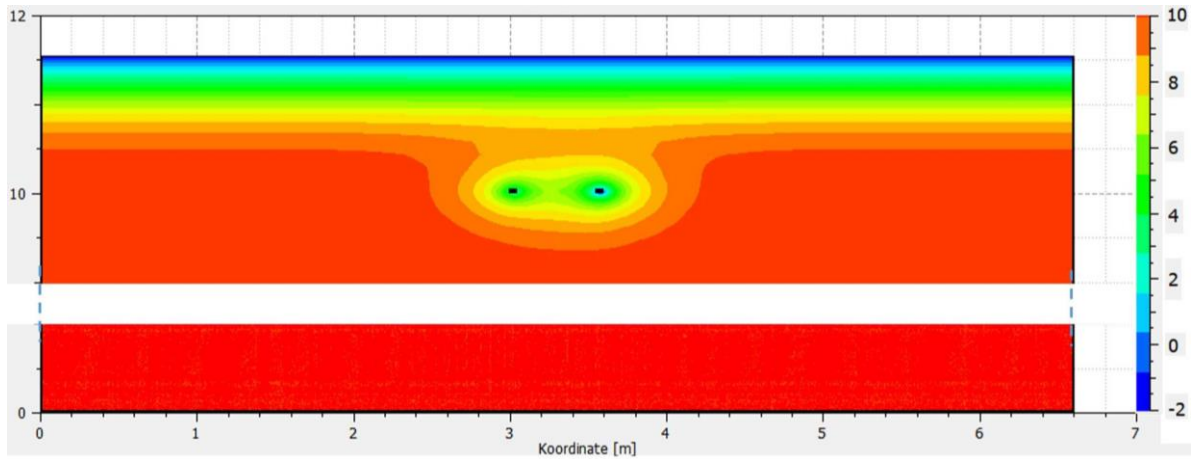
Da auch diese Software über eine FMI-Schnittstelle verfügt, kann eine Kopplung des Netzwerks mit anderen FMUs erfolgen. Im konkreten Fall für Schleswig werden die thermischen Randbedingungen der Rohre im KNW-Netz nicht vorberechnet oder festgelegt, sondern mit einem DELPHIN-Modell gekoppelt. Das DELPHIN-Modell simuliert während der Laufzeit die Rohrleitung im Erdreich mit realistischen Klimabedingungen. Dabei wird Vor- und Rücklauf modelliert, so dass auch die Wechselwirkung zwischen Vor- und Rücklauf berücksichtigt werden kann. Für jeden Durchmesser im Netz wird dafür ein DELPHIN-Modell erstellt.

Die GKA und EES werden hydraulisch als Rohrleitungen entsprechender Länge und Durchmesser parametrisiert. Für die thermische bzw. hygrothermische Berechnung wird ebenfalls je ein DELPHIN-Modell benutzt. Da die EPC bereits detaillierte Modelle für diese Bauteile erstellt hat, die mit den eingemessenen GPS-Daten abgeglichen sind, wurde auf diese zurückgegriffen.

Die Kopplung erfolgt auch hier in MasterSim. Das Netzmodell ist abschnittsweise mit je einem Rohrmodell gekoppelt.

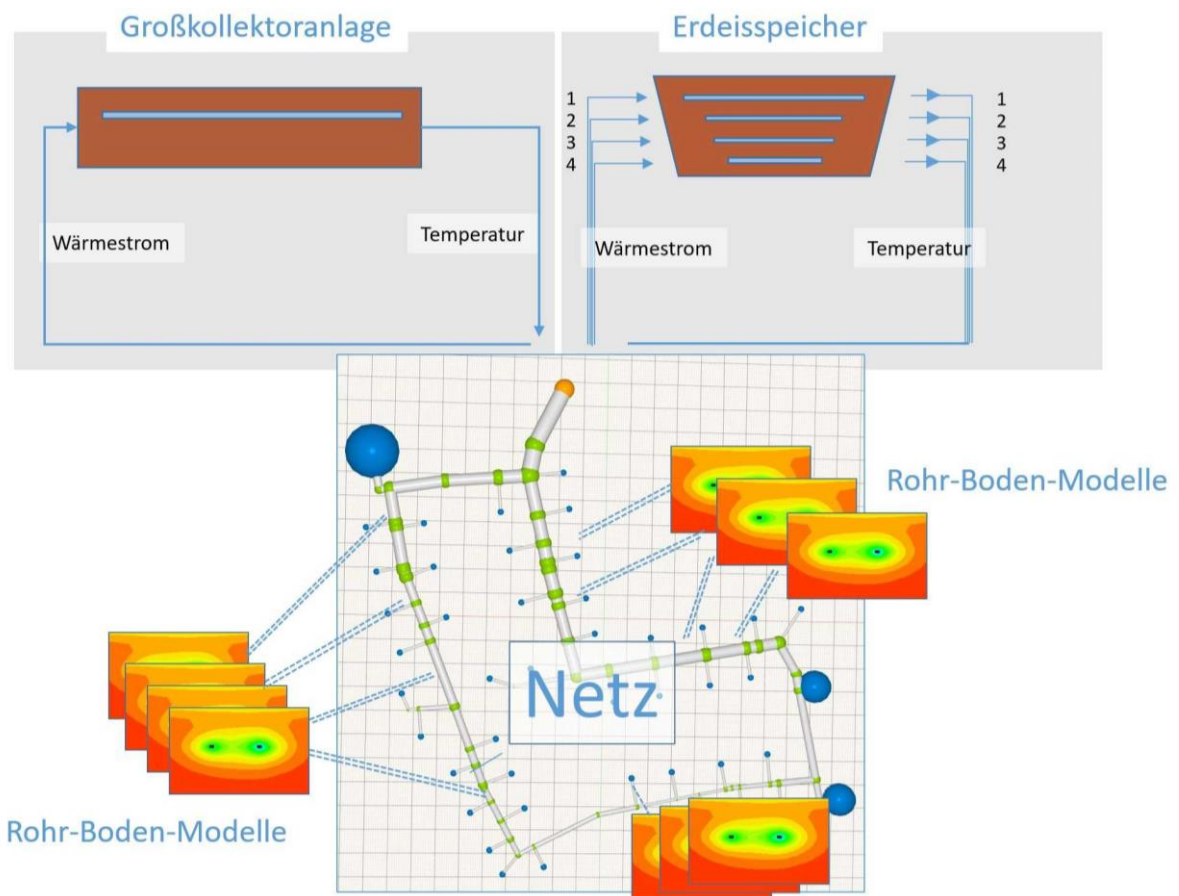
Für die Simulation des PVT-Kollektors wurden verschiedene Modelle eruiert. Dabei ist es notwendig, dass sich die Modelle sinnvoll in die bisher erstellten Komponenten einfügen, d. h. mit einer FMU-Schnittstelle verknüpft werden können. Für die Arbeiten im Projekt ist dabei vor allem der thermische Ertrag von Belang. Das umgesetzte Hydrauliksystem ermöglicht es, die Abwärme des PVT-Kollektors entweder vor oder hinter den Geothermiequellen einzuspeisen. Somit können entweder die Geothermiequellen zielgenau aktiviert und regeneriert oder die Vorlauftemperatur des Netzes weiter angehoben werden. Die Einbindung des PVT-Kollektormodells in die Gesamtsimulation ist im Folgeprojekt vorgesehen.

Abbildung 9 zeigt eine 2D-Darstellung der simulierten Temperaturen im Sekundärnetz mit Vor- und Rücklauf an einem Wintertag. Da das Netz im Winter durch die tiefen Temperaturen den umliegenden Boden auskühlt, stellt es analog zu den EES und GKA eine Wärmequelle dar. Um das thermische Verhalten des Erdreichs und damit den Wärmeertrag des Netzes auch über lange Betriebszeiträume (>25 Jahre) korrekt abzubilden, wird ein relativ großer unterer Bereich des Bodens bis 10 m Tiefe berücksichtigt. Horizontal wird das Berechnungsgebiet so weit ausgedehnt, dass quasi adiabate Randbedingungen gelten (kein seitlicher Wärmestrom).



**Abbildung 9: Berechnung der Erdrich- und Fluidtemperaturen im Netz-Teilmodell. Darstellung der DELPHIN-Ergebnisdatei (Tiefe verkürzt, nicht maßstäblich)**

Das Schema der Kopplung ist in Abbildung 10 dargestellt. Das Netz selbst wird durch NANDRAD berechnet, die Randbedingungen der Rohre durch DELPHIN-Simulationen. Die drei DELPHIN-Rohrmodelle (je eines pro Nennweite der verwendeten Rohre) werden den längendiskretisierten Abschnitten des Sekundärnetzes für Vor- und Rücklauf zugewiesen.



**Abbildung 10: Schematische Darstellung der Kopplung der Modelle**

### 2.1.1.6 Parallele Weiterentwicklungen

Zur Erstellung der energetischen Simulation waren eine Reihe von Zwischenschritten und Untersuchungen notwendig, so zu Fragen der Modellbildung, Diskretisierung, notwendige Größe des Simulationsgebiets, Rechenzeit vs. Genauigkeit.

Aus diesen Themen sollen hier zwei Fragestellungen vorgestellt werden.

Die Materialeigenschaften des Bodens sind von entscheidender Bedeutung für die Performance eines EES oder einer GKA. Vor allem die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität beeinflussen die Performance stark. Diese Eigenschaften müssen somit auch in Simulationsrechnungen möglichst gut abgebildet werden. Das bedeutet einerseits realitätsnahe Materialfunktionen, andererseits müssen diese Funktionen auch so umgesetzt werden, dass numerisch keine Probleme auftreten, die die Rechenzeit stark verlängern. Dies trifft insbesondere auf die Eisbildung im Boden zu.

Weiterhin müssen die Abmessungen und geometrische Dimensionierung des EES und des umgebenden Erdreichs so genau abgebildet werden, dass qualitativ hochwertige Ergebnisse entstehen. Andererseits bedeutet genauere Modellierung im Rechenmodell eine höhere Elementanzahl und damit höhere Rechenzeiten. Ein Punkt dabei ist die Frage, ob eine zweidimensionale Modellierung für den EES ausreicht oder ob aufgrund der relativ geringen Abmessungen der 3D-Effekt eine Rolle spielt. Der DELPHIN6-Rechenkern bietet die Möglichkeit einer 3D-Modellierung. Daher sollte abgeschätzt werden, wie groß und wie praxisrelevant die Abweichung von zwei- zu dreidimensionaler Berechnung ist.

#### **Hygrothermische Bodenmodellierung**

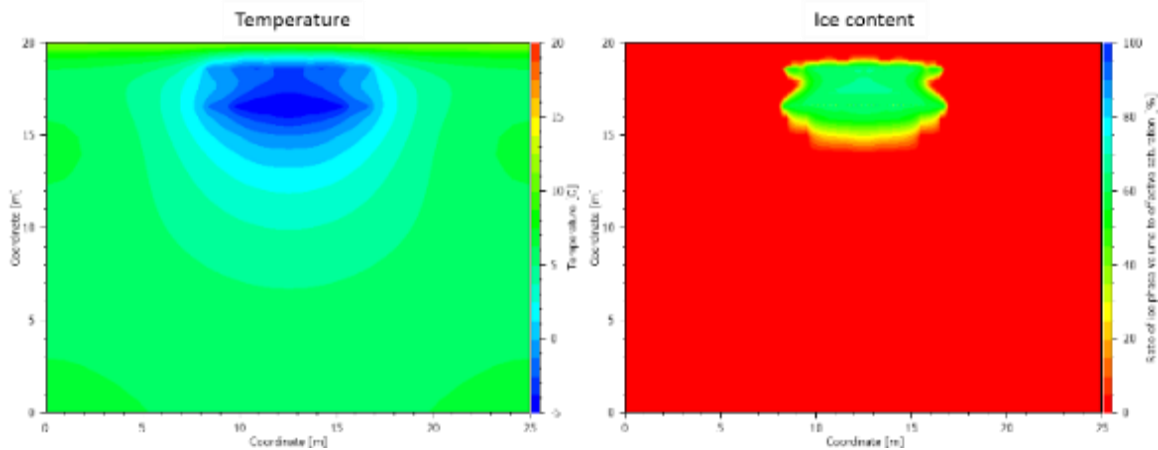
Eine der Forschungsfragen ist, wie die hygrothermischen Materialeigenschaften von Böden angemessen charakterisiert werden können. Angemessen bedeutet hier: Die Materialcharakterisierung sollte den Anforderungen moderner Simulationswerkzeuge entsprechen, und das Verfahren sollte schnell, sicher und einfach zu bedienen sein. Daher wurde im Berichtszeitraum eine Software „Soil-Generator“ entwickelt, die wesentliche Teile des Verfahrens automatisieren kann. Da Microsoft Excel weit verbreitet ist und die Funktionalität für den hier geforderten Zweck ausreicht, wurde als Nutzeroberfläche Microsoft Excel genutzt und auf eine separat programmierte Oberfläche verzichtet. Die Funktionen sind als VisualBasic-Makros implementiert.

Das Verfahren und die Materialfunktionen sind im Anhang 6.2 detailliert beschrieben.

Die auf Excel-Basis implementierte Software SoilGenerator ermöglicht die schnelle und komfortable Generierung von Bodeneigenschaften gemäß der Materialdateispezifikation für die Simulationssoftware DELPHIN. Ein Paket mit der SoilGenerator Version 1.3.2, dem DELPHIN5-Solver und drei vom Solver benötigten dynamischen Link-Bibliotheken (dlls) ist frei verfügbar.

Gegenüber den bisher verwendeten Materialsätzen zeigt sich eine bessere und konsistentere Abbildung der Bodeneigenschaften und ein numerisch stabileres Verhalten in Simulationen. Als Beispielprojekt zeigt Abbildung 11 die Temperatur- und Eisgehaltsfelder eines Bodens zu einem Zeitpunkt im Winter.





**Abbildung 11: Temperatur- und Eisgehaltfeld einer Bodensimulation mit einem Kollektorfeld (Simulationsgröße 20 x 25 m)**

Eine experimentelle Validierung dieses Verfahrens im Realmaßstab an Messdaten wird noch Teil der künftigen Forschungsaktivitäten sein.

### 2D versus 3D-Modellierung der Erdeisspeicher

Die Modellierung hygrothermischer Bauteile kann je nach zu berechnendem Fall ein-, zwei- oder dreidimensional erfolgen (1D, 2D, 3D). Dabei wird im Normalfall eine möglichst einfache Modellierung angestrebt, um den Eingabeaufwand und die Berechnungszeiten/Rechneranforderungen in sinnvollen Grenzen zu halten. Die dabei notwendigen Vereinfachungen führen allerdings auch zu systematischen Abweichungen des Modells zur Realität.

Eine eindimensionale Modellierung ist nur für flächige, quasi unendlich breite Bauteile zulässig, wie bspw. Wände ohne geometrische oder materialbedingte Störstellen. Ein geothermischer Kollektor oder EES wird üblicherweise zweidimensional abgebildet, indem durch das Erdreich senkrecht geschnitten wird. Das impliziert eine adiabate Grenze des Berechnungsgebietes in z-Richtung, wodurch der Kontakt zum ungestörten Erdreich in eine Ebene vernachlässigt wird, d. h. der seitliche Randeinfluss wird unterschätzt. Je größer der geothermische Speicher ist, desto geringer wird sich der dadurch entstehende Fehler auswirken. Die Performance eines Kollektors wird dadurch unterschätzt, sodass der Fehler auf der sicheren Seite liegt; diese Modellierung ist somit zulässig.

Dennoch stellt sich die Frage, wie groß diese Abweichung ist und ob es sinnvoll sein könnte, die Berechnungsgenauigkeit durch eine 3D-Modellierung zu verbessern. Mit der Software DELPHIN ist eine dreidimensionale Modellierung und Simulation grundsätzlich möglich (z. B. beschrieben auf <https://www.energiwendebauen.de/projekt/software-zur-hygrothermischen-planung-von-baukonstruktionen/>). Die 3D-Modellierung ist allerdings sehr aufwendig, mit mehreren „von Hand“ auszuführenden Arbeitsschritten verbunden und damit fehleranfällig und für die Ingenieurspraxis noch nicht einsetzbar. Deshalb wurde zunächst eine Abschätzung an einem stark vereinfachten Kollektormodell durchgeführt.

Die möglichen Modelloptionen werden in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt. Dabei ist das Erdreich jeweils hell und der Bereich des Kollektors blau dargestellt.

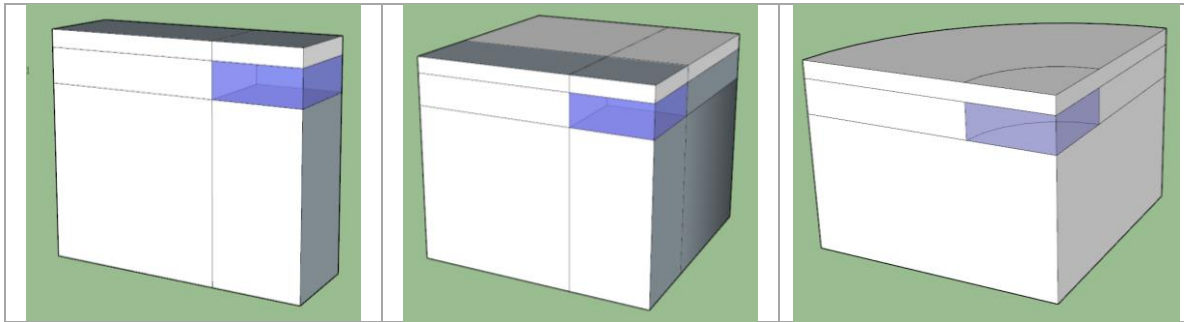


Abbildung: Mögliche 2D / 3D Berechnungsmodelle für Kollektor / Erdspeicher. Hell dargestellt ist das Erdreich, blau der Bereich des Wärmeentzugs bzw. der Wärmeeinspeisung.

*2D: senkrechter Schnitt mit definierter Länge in die z-Richtung (in DELPHIN üblicherweise 1 m), keine Berücksichtigung von Transportprozessen in z-Richtung.*

*3D: geometrisch realistische Modellierung mit Bodenmaterial und Transportprozessen in z-Richtung. Im Bild ist ein Viertel eines Kollektors dargestellt.*

*3D-rotationssymmetrisch: Kann die Geometrie annähernd zylindrisch angenähert werden, ist eine 2D-Modellierung möglich, die dreidimensionale Verhältnisse abbildet.*

### Abbildung 12: Modelloptionen

Durch Ausnutzung von Symmetrieebenen kann die Berechnung deutlich beschleunigt werden. So wird üblicherweise nur eine Hälfte eines EES gerechnet. Liegt eine annähernd quadratische Geometrie vor, muss nur ein Viertel des Berechnungsgebiets modelliert werden.

Zunächst sollen die 2D- und die 3D-rotationssymmetrische Modellierung verglichen werden. Dafür wird ein Kollektorfeld von 10 x 10 m angenommen, wobei der Entzugsbereich 1 m unter der Erdoberfläche beginnt und bis in eine Tiefe von 3 m reicht. Das entspricht in der Größenordnung einer zweilagigen GKA oder eines EES. Als Belastung wird ein berechnetes Wärmeentzugsprofil für die Winterperiode angesetzt.

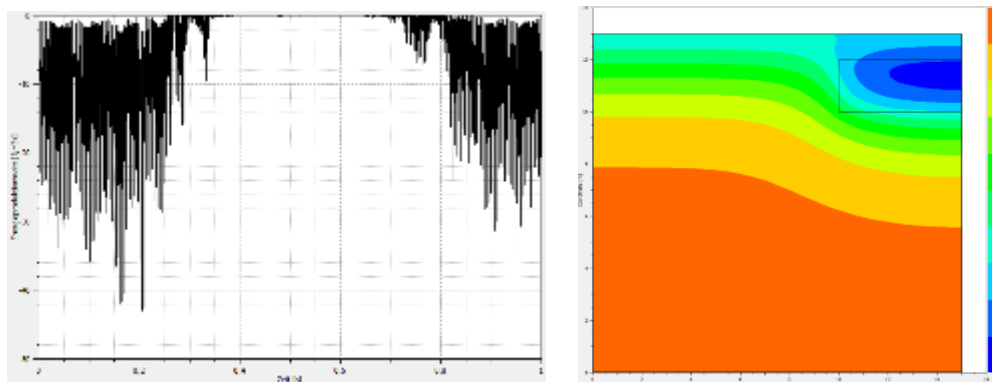


Abbildung 13: Entzugsprofil für die Berechnung und Temperaturfeld am Ende der Heizperiode

Die mittlere Temperatur des Wärmeentzugsbereichs, die näherungsweise der Kollektoraustrittstemperatur entspricht, zeigt einen deutlichen Unterschied, wobei die niedrigste Temperatur in der 3D-Modellierung sich um etwa 2 K unterscheidet.

Für den Betrieb eines Kollektors oder Speichers gibt es anlagenbedingt eine untere Grenztemperatur. Betrachtet man die kumulierten Wärmemengen bis zu dem Zeitpunkt, an dem diese Grenztemperatur erreicht ist, so kann man dies als maximal mögliche Wärmeentzugsmenge ansehen. Diese kann für einen Vergleich der Ertrags- bzw. Speicherkapazitäten herangezogen werden.

Für die 3D-rotationssymmetrische Modellierung ergibt sich daraus eine Mehrkapazität von etwa 15 % gegenüber einer reinen 2D-Modellierung. Bei größeren Objekten wird dieser Betrag geringer werden und vernachlässigbar sein, bei sehr kleinen Kollektoren wird der 3D-Effekt darüber liegen. Eine komplette 3D-Modellierung dürfte aufgrund der oben beschriebenen Vereinfachungen nochmals einen geringfügig größeren Betrag ergeben.

Für die angegebenen Speichergrößen kann der Mehrertrag für die Bemessung zunächst vernachlässigt werden, da der Aufwand für eine komplette 3D-Modellierung sowohl hinsichtlich der Erstellung des Rechenmodells als auch der Rechenkapazität erheblich ist. Zudem liegt die 2D-Berechnung auf der sicheren Seite. Ein ausführlicherer Vergleich kann bei Bedarf im Folgeprojekt mit Abgleich zu Messdaten erfolgen.

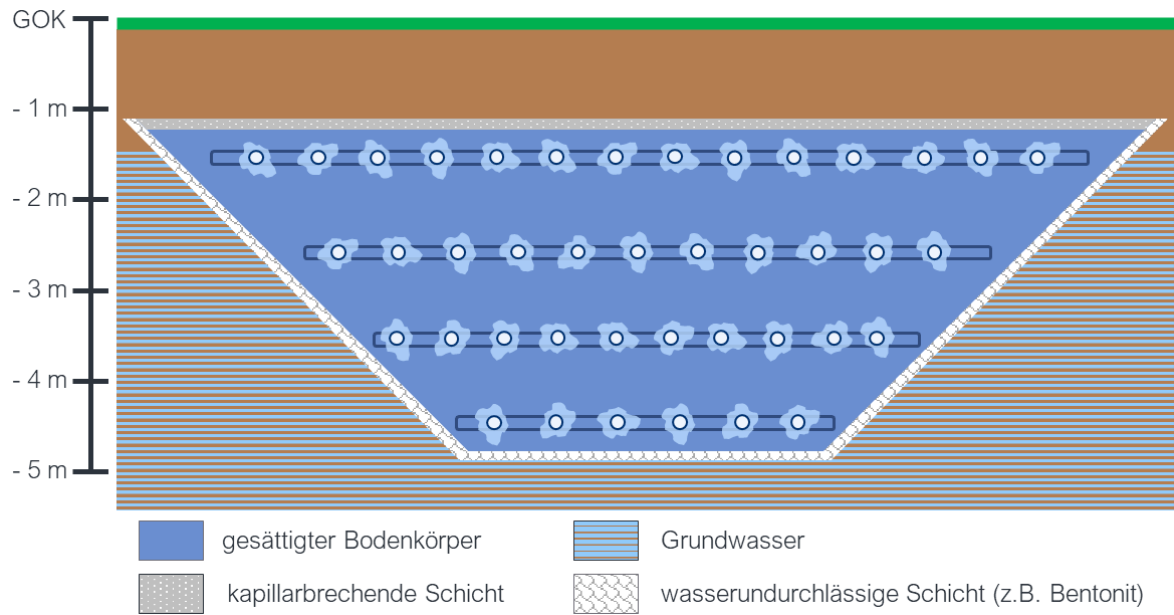
## **2.1.2 AP 1.2 Planung und Umsetzung des zentralen Erdeisspeichers**

In diesem Kapitel wird die Planung und Umsetzung der EES, aber auch der GKA beschrieben. Darüber hinaus wird auch auf die baulichen Hindernisse bei der Installation eingegangen.

### **2.1.2.1 Planung**

Im Vorgängervorhaben ErdEis wurden mehrere Varianten zur Realisierung eines EES entwickelt. Die für das Forschungsvorhaben ErdEis II relevante Variante ist in Abbildung 14 dargestellt. Die EES-Variante zeichnet sich durch eine wasserundurchlässige Bentonit-Schicht aus, welche wie eine Wanne um den EES installiert ist. Oberhalb der obersten Kollektorlage ist eine kapillARBrechende Kiesschicht, welche dazu beiträgt, dass möglichst wenig Feuchtigkeit nach oben aus der Bentonit-Wanne verloren geht, aber dennoch Regenwasser versickern und sich in der Wanne sammeln kann. An trockenen Standorten soll somit eine möglichst hohe Feuchte des Erdreichs um den EES erreicht werden. Ein feuchtes Erdreich erhöht die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, was sich sehr positiv auf die Leistungsfähigkeit und Speicherkapazität des EES auswirkt. Das Baugebiet in Schleswig weist einen sehr hohen Grundwasserpegel und eine hohe Bodenfeuchte auf. Daher wäre eine Bentonit-Wanne zur Steigerung der Bodenfeuchte nicht notwendig. Allerdings kann dadurch der thermische Einfluss des Grundwassers reduziert werden, wodurch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Baugebiete mit einem trockneren Erdreich gesteigert werden könnte.

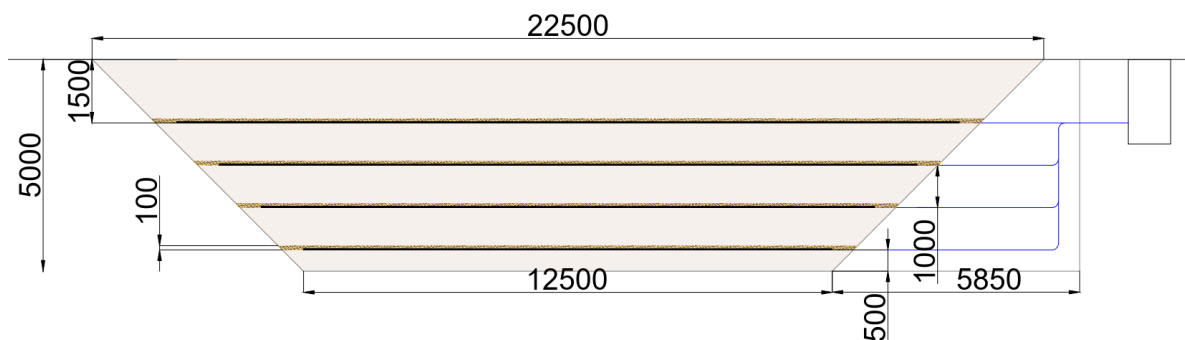
Die Kollektorebenen wurden trichterförmig angeordnet, sodass die Ebenen nach unten immer kleiner werden. Mittels dieser Anordnung können die Installationskosten deutlich reduziert werden. Genaueres hierzu ist in Kapitel 2.4.1 zu finden.



**Abbildung 14: Schematische Darstellung einer Variante zur Realisierung des Erdeisspeichers**

Die in Abbildung 14 vorgestellte Variante wurde hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und der technischen Umsetzbarkeit untersucht. Der Einbau der wasserundurchlässigen Bentonit-Wanne hat sich als kostenintensiv und nicht nachhaltig herausgestellt. Im Erdreich des Baufeldes liegt eine Lehmschicht vor, die auf natürliche Weise den stetigen Wasserfluss innerhalb des EES unterbindet. Aus diesem Grund wurde der Einbau der wasserundurchlässigen Bentonit-Schicht und die Kiesschicht nicht ausgeführt.

In Abbildung 15 ist das finale Konzept des EES dargestellt. Insgesamt werden 1.000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche auf vier quadratischen Ebenen verteilt.

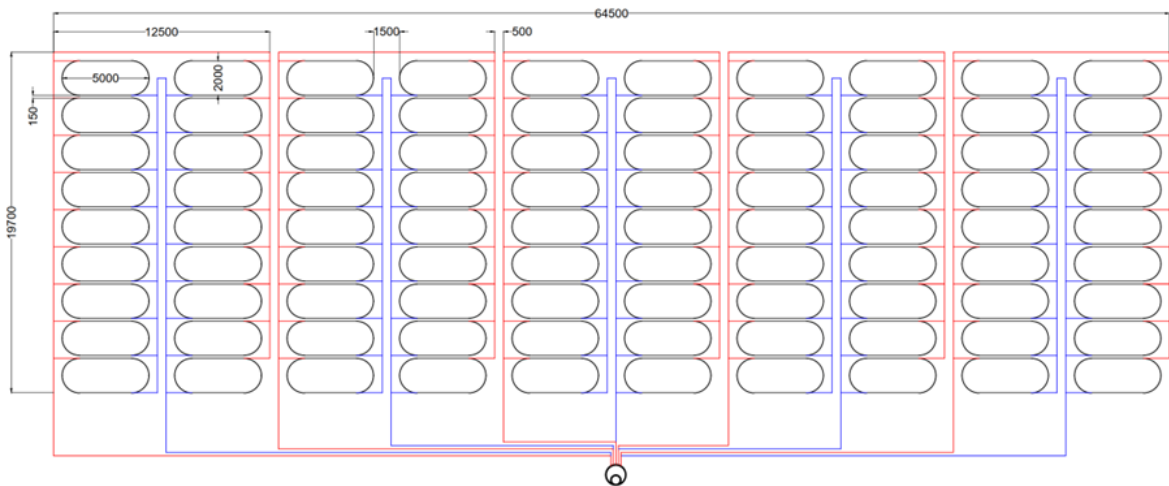


**Abbildung 15: Finale Planung des Erdeisspeichers**

Da ein EES vor allem als Speicher fungiert und es sich bei dem Konzept um eine Pilotanlage handelt, sollte nicht der komplette Wärmebedarf über EES, sondern auch über eine einlagige GKA gedeckt werden. Die Dimensionierung der EES und der GKA erfolgte auf Basis der Erfahrungswerte aus bereits realisierten Projekten sowie auf Erkenntnissen erster Erdreichsimulationen des Baugebiets. Wie bereits im Kapitel 2.1.1 erläutert, fehlten Informationen zur genauen Bodenfeuchte und

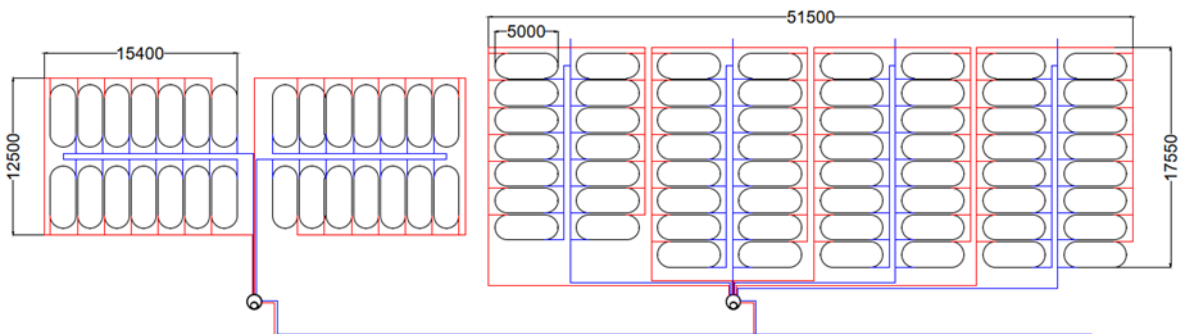
Grundwasserhöhe, um eine exakte Simulation der GKA durchzuführen. Aus diesem Grund wurde ein Sicherheitszuschlag in Höhe von 25 % bei der Dimensionierung der GKA festgelegt.

Die GKA unter der Freifläche und unter dem RRB wurde jeweils von 1.000 m<sup>2</sup> auf 1.250 m<sup>2</sup> Kollektorfläche vergrößert. Statt ursprünglich vier gleiche Kollektorstränge wurden fünf Stränge geplant. Der fünfte Strang, der den Sicherheitszuschlag darstellt, wird im Betrieb jedoch abgesperrt und nur im Notfall zur Quellwärmebereitstellung geöffnet. Die Vergleichbarkeit zwischen den EES mit einer gesamten Kollektorfläche von jeweils 1.000 m<sup>2</sup> und den GKA unterhalb der Freifläche und unterhalb des RRB bleibt somit weiterhin bestehen.



**Abbildung 16: Ausführungsplanung der Großkollektoranlage (Stand 09.04.2020)**

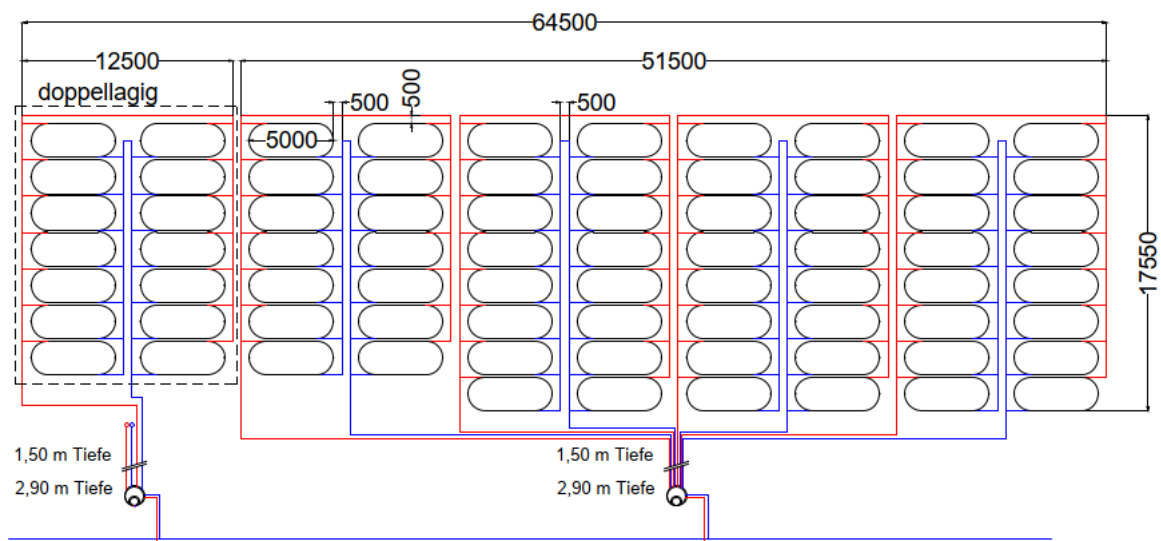
Aufgrund einer Modellierung des Baugebietes und dem erhöhten Platzbedarf, welcher für die Böschung an der Westseite der Freifläche bereitgestellt werden musste, wurde der einlagige Kollektor schmäler und länger ausgeführt. Dazu wurden jeweils zwei Kollektormodule pro Strang entfernt, der fünfte Strang um 90° gedreht und die zuvor entfernten Kollektormodule zum fünften Strang hinzugefügt bzw. ein neuer sechster Strang gebildet. Der Ausführungsplan der GKA unterhalb der Freifläche ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 17: Ausführungsplanung Großkollektoranlage unter Freifläche**

Die zur Verfügung stehende Fläche im RRB wurde aufgrund der Errichtung eines Vorflutgrabens kleiner als ursprünglich angenommen. Der fünfte und sechste Strang der GKA, welche unter der Freifläche als Reservestränge hinzugekommen sind, wurden übereinander in Sandwichbauweise in einem Abstand von 1,5 m positioniert, siehe Abbildung 18.

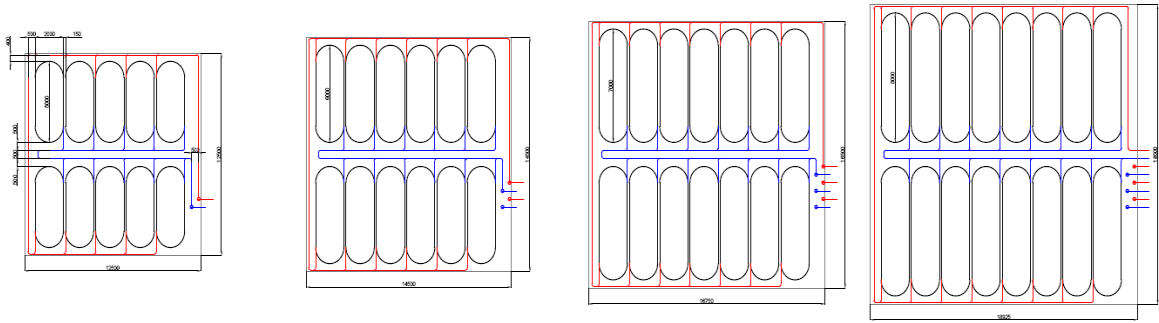
Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Vergleichbarkeit mit dem einlagigen Kollektor unter der Freifläche weiterhin gegeben, da sowohl unter der Freifläche als auch unter dem RRB nur das „Hauptfeld“, bestehend aus vier Strängen, untersucht wird. Diese vier Stränge der beiden GKA wurden baugleich verlegt und die Messfühler positionsgleich installiert. Der Einfluss der Reservestränge auf der jeweils linken Seite wird auch bei einer doppelten Lage vergleichbar sein. Zudem sind die Stränge nur als Reservestränge geplant und sollen im Forschungszeitraum nicht zum Einsatz kommen.



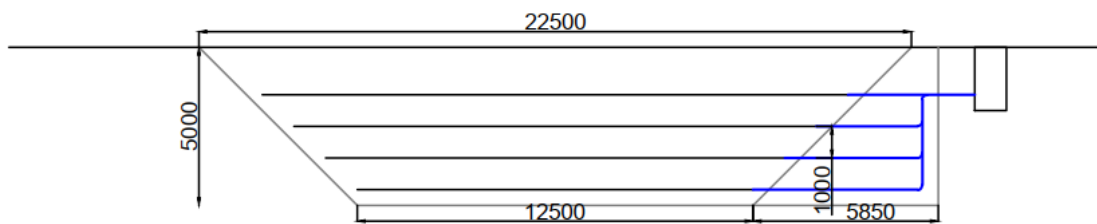
**Abbildung 18: Ausführungsplan Großkollektoranlage unter Regenrückhaltebecken**

Sowohl die Stränge der GKA als auch die der EES werden über ein Tichelmann-System an einen wasserdichten Schacht angebunden. Bei den EES wird jeweils die 1. (oberste) Ebene an einen wasserdichten Schacht und die Ebenen 2-4 an einen weiteren wasserdichten Schacht angebunden. Die Ausführungspläne des EES sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt. Der EES unterhalb der Freifläche und der unterhalb des RRB wurden identisch aufgebaut.

Die Vorläufe aller Schächte werden wiederum parallel zueinander in einem Graben zum Technikgebäude – der sogenannten Energiezentrale – geführt. Die jeweiligen Rückläufe werden in einen gemeinsamen Rücklauf eingebunden. In der Energiezentrale werden alle Vorläufe auf einem Verteilerbalken zu einem gemeinsamen Vorlauf, der zum Baugebiet gelegt wird, verbunden. Die Energiezentrale stellt somit die Schnittstelle zum KNW-Netz dar (siehe dazu auch Abbildung 23).



**Abbildung 19: Ausführungsplanung Erdeisspeicher (Draufsicht)**



**Abbildung 20: Ausführungsplanung Erdeisspeicher (Seitenansicht)**

### 2.1.2.2 Bauliche Umsetzung

Im Zeitraum vom 01.09.2020 – 02.10.2020 wurden die GKA sowie der EES unterhalb der Freifläche errichtet. Aufgrund der vorhandenen Bodenneigung im Baufeld musste der Untergrund für die GKA kaskadenförmig angelegt werden, um über die Gesamtfläche eine konstante Überdeckung zu schaffen (Abbildung 21).

Die Kollektoren der GKA wurden horizontal eingebracht. Die Kollektoren für den EES wurden auf vier Ebenen ebenfalls horizontal übereinander nach der „Sandwichbauweise“ eingebaut. Die Kollektoren sind in 10 cm steinfreien Sandschichten eingebettet. Die steinfreien Sandschichten schützen die Kollektoren vor einer mechanischen Beschädigung. Der Sand lässt sich gut verdichten, was die Wärmeübertragung im Erdreich verbessert.

Zwischen den vier Kollektorlagen im EES befindet sich zusätzlich eine Füllbodenschicht von etwa 0,9 m Höhe. Die Überdeckungshöhe für die GKA sowie für die EES beträgt ca. 1,40 m, wobei die Geländeoberkante beim EES unter der Freifläche schief ist und sich dadurch an manchen Stellen eine größere Überdeckung ergibt.

Im Zeitraum vom 01.07.2021 – 31.08.2021 wurde das Erdreich für die GKA sowie für den EES unterhalb des RRB ausgehoben.

Im Bereich des RRB weist das Erdreich eine hohe Bodenfeuchtigkeit auf und der Grundwasserspiegel liegt bei etwa 2,00 m Tiefe (bezogen auf die Geländeoberkante des nicht modellierten Baufeldes). Die Sohle des RRB befindet sich etwa 1,50 m unterhalb der ursprünglichen Geländeoberkante,

sodass bei den Erdarbeiten für den EES und GKA nach etwa 50 cm mit Grundwasser zu rechnen ist. Für die bauliche Umsetzung ist daher eine Absenkung des Grundwasserspiegels erforderlich. Die Absenkung des Grundwasserspiegels erfolgt mittels einer Tiefendrainage. Zusätzlich zu der Tiefendrainage mussten Pumpen eingesetzt werden, um die geschlossene Wasserhaltung aufrechtzuerhalten. Abgeschlossen wurden die Baumaßnahmen mit der Dichtigkeitsprüfung.



**Abbildung 21: Einbau Großkollektoranlage unterhalb der Freifläche**



**Abbildung 22: Geschlossene Wasserhaltung beim Einbau des Erdispeichers unterhalb des Regenrückhaltebeckens**



### 2.1.2.3 Bauliche Hindernisse

Der hohe Grundwasserspiegel unterhalb des RRB hat die bauliche Umsetzung deutlich erschwert und verteuert. Wie bereits erwähnt, musste für den Zeitraum des Einbaus eine Tiefendrainage sowie eine geschlossene Wasserhaltung errichtet werden. Insgesamt haben drei Pumpen über einen Zeitraum von 35 Tagen den Grundwasserspiegel abgesenkt. Trotz der umfangreichen Vorbereitungen konnte das Grundwasser nicht auf die gewünschte Tiefe abgesenkt werden. Beim Einbau der Kollektoren für den EES unterhalb des RRB drang das Wasser kontinuierlich in die Baugrube. Es mussten zusätzliche Pumpen in Betrieb genommen werden, um das Oberflächenwasser abzupumpen.

Des Weiteren war der Wiedereinbau des gesättigten Bodens aus dem RRB nicht möglich. Der Aushub war zu weich, um mit Baumaschinen eine Verdichtung und Modellierung der Sohle durchzuführen. Um die Tragfähigkeit des Bodens zu erhöhen, wurde der Aushub mit Sand vermengt.

Bei der Befüllung des KNW-Netzes wurden große Mengen Luft im System eingeschlossen. Die SSW haben daraufhin an mehreren Punkten im Netz Luftabscheider installiert, um das Netz zu entlüften. Es hat sich gezeigt, dass die Entlüftung des Netzes ein langwieriger Prozess ist.

### 2.1.3 AP 1.3 Hydraulische Auslegung des Kalten Nahwärmenetzes

In diesem Arbeitspaket wurde das KNW-Netz hydraulisch ausgelegt und Betriebsvarianten entwickelt.

#### 2.1.3.1 Untersuchte Netzarten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde untersucht, ob das KNW-Netz als passives, aktives oder hybrides Netz realisiert wird.

Bei einem passiven Netz entsteht die Umwälzung im gesamten Wärmenetz durch dezentrale Wärmepumpen der angeschlossenen Haushalte. Der Betrieb eines passiven Netzes ist von der Förderhöhe der jeweiligen dezentralen Sole-Umwälzpumpe in den Wärmepumpen abhängig. Die Sole-Umwälzpumpe, welche in diesem Forschungsprojekt eingesetzt wird, weist eine Förderhöhe von 5,6 mWS auf. Bei einem insgesamt Druckverlust durch alle Komponenten von größer als 560 mbar würde es zur Unterversorgung der Wärmepumpen mit Sole kommen. Die Druckverluste setzen sich aus den Druckverlusten über die Erdwärmequellen, der hydraulischen Weiche in der Energiezentrale inkl. der Messeinrichtungen, dem Hausanschluss und den Hausinstallationen inkl. der Wärmetauscher in den Wärmepumpen zusammen. In Tabelle 1 sind die Druckverluste aufgelistet.

**Tabelle 1: Druckverluste im Wärmenetz**

Druckverlust Erdwärmequellen	3,30 mWS
Druckverlust Hausanschluss	0,50 mWS
Druckverlust Hausinstallationen	0,76 mWS
Druckverlust Energiezentrale	5,80 mWS

Bei einem aktiven Netz wird die Umwälzung über eine zentrale Umwälzpumpe im Netz realisiert. Sobald die Wärmepumpen durch eine Wärme- oder Kälteanforderung starten, erfolgt die

Versorgung mit Sole mittels der zentralen Umwälzpumpe. Die Umwälzpumpen in den jeweiligen Gebäuden leisten keinen Beitrag zur Umwälzung. Die Wärmepumpenanlagen müssen über eine Absperrklappe verfügen, um von der zentralen Umwälzpumpe mit Sole versorgt zu werden.

Die Druckverlustberechnung für die Erdwärmequellen, die Hausanschlüsse und die Hausinstallationen hat ergeben, dass für den passiven Betriebsfall bei voller Auslastung der Druckverlust maximal 104 mbar betragen darf, um eine Unterversorgung der Wärmepumpen zu vermeiden. Umfangreiche Untersuchungen der Druckverluste haben gezeigt, dass einige Wärmepumpen bei einem passiven Netz unter Vollastbetrieb (maximaler Volumenstrom, 100 % Gleichzeitigkeit) von einer Unterversorgung betroffen sein können. Ein aktives Netz unterliegt dieser Problematik nicht. Allerdings gibt es aktuell keinen Hersteller, der dezentrale Wärmepumpen ohne interne Sole-Umwälzpumpe und mit integrierter Absperrklappe als Serienprodukte vermarktet. Für den Betrieb von aktiven Netzen sind deshalb Sonderanfertigungen notwendig, was zu hohen Investitionskosten führt.

Ein Hybridnetz, bestehend aus aktivem und passivem Netz, ermöglicht die Nutzung von seriell produzierten Wärmepumpen und gleichzeitig die Sicherstellung der ausreichenden Versorgung dieser mit Sole in jedem Betriebspunkt. Entsprechend der Simulationsergebnisse aus Kapitel 2.1.1 und den Gesprächen mit den Wärmepumpenherstellern wurde das KNW-Netz als Hybridnetz konzipiert.

#### 2.1.3.2 Hydraulischer Aufbau des Hybridnetz

In Anhang 6.4 ist das Hydraulikschema für das Baugebiet „An den Wichelkoppeln“ dargestellt. Das Hybridnetz wird technisch durch einen Bypass parallel zu den redundant ausgelegten Umwälzpumpen realisiert. Der Bypass kann durch ein automatisches Motorventil getrennt werden. Sobald die Bypässe zwischen Vor- und Rücklauf über die automatischen Motorventile (M3 und M11) geschlossen werden, kann die zentrale Umwälzpumpe ausgeschaltet und der Bypass parallel zur zentralen Umwälzpumpe geöffnet werden. Es liegt ein passives Netz vor. Für den Fall, dass die dezentralen Sole-Umwälzpumpen in den Wärmepumpen den Druckverlust im gesamten Wärmenetz nicht überwinden können, kann die zentrale Umwälzpumpe eingeschaltet und der Bypass parallel zu den zentralen Umwälzpumpen über das automatische Motorventil M2 geschlossen werden. Die zentrale Umwälzpumpe unterstützt dann aktiv die dezentralen Sole-Umwälzpumpen in den Wärmepumpen und überwindet die Druckverluste im Wärmenetz. Es liegt ein aktives Netz vor.

Der Sammler ist das zentrale Bauteil in der Energiezentrale. Er bindet die Umweltenergie aus den einzelnen Quellen ein und führt sie über einen Vorlauf dem KNW-Netz zu. Die Einspeisung der einzelnen Umweltenergiequellen kann über die automatischen Absperrventile an den Vorläufen zu- oder abgeschaltet werden. Dadurch können unterschiedliche Betriebszustände untersucht werden.

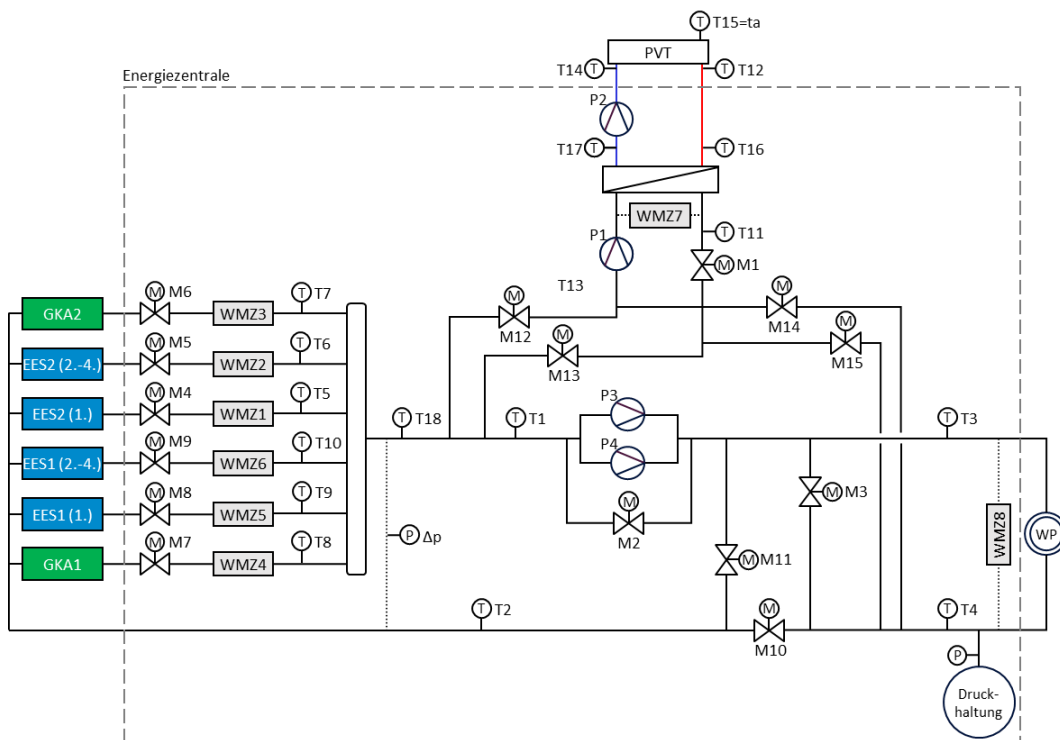
Die hydraulische Weiche ermöglicht eine Entkopplung des KNW-Netzes vom Umweltenergiequellennetz (=Primärnetz). Sobald die Bypässe zwischen Vor- und Rücklauf über die automatischen Motorventile (M3 und M11) geöffnet und das Motorventil M10 geschlossen werden, liegen zwei separate Netze vor. Hierdurch kann das KNW-Netz isoliert vom Primärnetz betrachtet werden.

Die PVT-Anlage besitzt einen eigenen Kreislauf und ist nur über einen Plattenwärmeübertrager mit dem restlichen Netz verbunden. Die Errichtung eines zusätzlichen Solekreislaufs ist dadurch

begründet, dass eine Temperaturabsenkung der Umgebungsluft unterhalb von  $-20\text{ °C}$  zum Einfrieren des KNW-Netzes führen würde. Das Wärmeträgermedium der PVT-Anlage besteht zu 35 % aus Glysofor und zu 65 % aus destilliertem Wasser, um auch bei Temperaturen unterhalb von  $-20\text{ °C}$  eine Zerstörung der PVT-Module zu verhindern.

Des Weiteren muss die Sole auf das Dach der Feuerwehrwache gefördert werden, was einen Systemdruck von 2,0 bar erfordert. Ein Netzdruck von 2,0 bar würde jedoch die zulässigen Eintrittsdrücke der dezentralen Wärmepumpen überschreiten. Die Errichtung zweier Solenetze hat somit zum einen den Vorteil, dass die spezifischen Anforderungen des Gesamtsystems aus techno-ökonomischer Sicht besser erfüllt werden und zum anderen kann das Regenerationspotenzial durch die PVT-Module genauer untersucht werden.

In der folgenden Abbildung ist das Hydraulikkonzept in einer vereinfachten Variante ohne Sicherheitseinrichtungen oder Ähnliches dargestellt.



**Abbildung 23: vereinfachtes Hydraulikschema**

### 2.1.3.3 Mögliche Betriebsvarianten des Hybridnetzes

Das Forschungsprojekt bietet mit seiner Mischung unterschiedlicher Wärmequellen die Möglichkeit, unterschiedliche Betriebsweisen dieser Quellen zu testen und zu untersuchen. Insgesamt wurden fünf Betriebsvarianten entwickelt, mit denen verschiedene Kombinationen und Betriebsweisen gefahren werden können. Die Betriebsvarianten (im Hydraulikschema mit „Fall“ bezeichnet) 1-3, 4 und 5 sind in Anhang 6.5 grafisch dargestellt. In Tabelle 2 sind die einzelnen Betriebsvarianten beschrieben.

**Tabelle 2: Vorstellung der Betriebsvarianten**

Betriebsvariante	Beschreibung
1	GKA & EES regenerieren sich selbstständig. Das KNW-Netz versorgt sich selbstständig.
2	GKA & EES werden mit der PVT-Anlage regeneriert. Das KNW-Netz versorgt sich selbstständig.
3	GKA & EES regenerieren sich selbstständig. Das KNW-Netz wird durch die PVT-Anlage bei der Versorgung unterstützt.
4	Die Sole wird durch die PVT-Anlage vorgewärmt und fließt anschließend durch die GKA & EES sowie durch das KNW-Netz.
5	Die Sole wird zunächst durch die GKA & EES erwärmt und im Nachgang zu der PVT-Anlage geleitet, bevor sie ins KNW-Netz fließt.

Das Hydraulikkonzept bietet mithilfe der Varianten die Möglichkeit, unterschiedliche Betriebsweisen wissenschaftlich zu untersuchen.

So können mit Variante 1 die Geothermiequellen vom Netz entkoppelt und untersucht werden, inwieweit sich die Quellen rein gegenseitig regenerieren können. Zusätzlich kann ermittelt werden, unter welchen Bedingungen die Netzgewinne ausreichen, um den Wärmebedarf allein zu decken.

Mit Variante 2 und 3 kann der Geothermie- und der Netzkreislauf jeweils durch die PVT-Anlage unterstützt werden. So kann separat untersucht werden, wo und besonders wann die Abwärme der PVT-Anlage optimal im Gesamtsystem genutzt werden kann.

Variante 4 und 5 konzentrieren sich auf den Gesamtbetrieb bei Nutzung aller Wärmequellen. Hierbei können Erfahrungen aus Variante 2 und 3 helfen, optimale Betriebsstrategien für den Gesamtbetrieb zu entwickeln.

Die Wärmeeinspeisung aus den PVT-Kollektoren über den Wärmetauscher in das KNW-Netz muss begrenzt werden, um negative Auswirkungen hinsichtlich der Lebensdauer und der Leistungsfähigkeit des KNW-Netzes zu vermeiden. Hierfür wurden für die betroffenen Betriebsvarianten Bedingungen definiert, die im Folgenden erläutert werden:

- Da die Versorgungsrohre im KNW-Netz aus Polyethylen bestehen, darf die Systemtemperatur 25 °C nicht überschreiten, um eine frühzeitige Materialermüdung zu vermeiden. Des Weiteren sollten die Netztemperaturen im Sommer nicht oberhalb von 18 °C liegen, da sonst keine Kühlung der Gebäude möglich ist.
- Betriebsvariante 2 (siehe Tabelle 2) ermöglicht die Regeneration der Erdwärmekollektoren. Es muss sichergestellt werden, dass die Kälteanforderung der Gebäude weiterhin gedeckt werden kann. Ab einer Kollektortemperatur von über 14 °C wird die Umwälzpumpe für das KNW-Netz der PVT-Kollektoren abgeschaltet.

- Um die Gebäude stets kühlen zu können, wird bei den Betriebsvarianten 3, 4 und 5 die Netztemperatur des KNW-Netzes auf 18 °C begrenzt.
- Aus wirtschaftlichen Gründen sollte die thermische Seite der PVT-Anlage nur betrieben werden, wenn die Differenz zwischen PVT-Austrittstemperatur und Kollektortemperatur bzw. Rücklauftemperatur mindestens 3 K beträgt. Über das Motorventil M1 wird die übertragene Wärmemenge auf das KNW-Netz geregelt (siehe Anhang 6.5). Der Durchfluss durch den Wärmeübertrager wird so eingestellt, dass die Grädigkeit des Wärmeübertragers 3 K beträgt.

Aufgrund der Verzögerungen im Forschungsvorhaben werden die einzelnen Betriebsvarianten im Anschlussvorhaben ErdEis III untersucht und ausgewertet.

### 2.1.4 AP 1.4 Sektorenkopplung

Die Kopplung der Sektoren Wärme, Elektrizität und Verkehr gewinnt zunehmend bei der Konzeptionierung, Planung und Realisierung von Quartieren an Bedeutung. In dem Neubaugebiet „An den Wichelkoppeln“ werden technische Systeme integriert, die eine Kopplung zwischen den Sektoren ermöglichen. Im Folgenden werden die einzelnen Systeme vorgestellt und die Kopplungsmöglichkeiten erläutert.

#### 2.1.4.1 PVT-Module

In Zusammenarbeit mit der Stadt Schleswig wurden auf dem Dach der Feuerwehrrache PVT-Module installiert. Insgesamt wurden 20 Module in drei Reihen mit einer Gesamtfläche von rund 40 m<sup>2</sup> in Westausrichtung aufgestellt. Die PVT-Module sind gegenüber der Dachhaut um 15° geneigt, siehe Abbildung 24.



**Abbildung 24: PVT-Anlage auf dem Dach der Feuerwehrrache**

Die Gesamtleistung der PVT-Anlage liegt bei 7,6 kWp. Die hydraulische Anbindung der PVT-Module an das KNW-Netz wurde im Hydraulikschema berücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.3). Die Abwärme der PVT-Anlage kann durch das Hydraulikkonzept an verschiedenen Stellen eingespeist und so zielgenau genutzt werden.

Die PVT-Anlage ermöglicht die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme und elektrischer Energie. Die bereitgestellte elektrische Energie kann einen dezentralen Stromspeicher laden. Eine weitere Möglichkeit ist die Entwicklung von Betreibermodellen, in denen der Strom innerhalb des Quartiers (als Haushaltsstrom oder für den Verkehrssektor in Form von Ladestationen) und auch netzübergreifend vermarktet werden kann. Die Wärme aus der PVT-Anlage kann zukünftig dazu beitragen, dass die Kollektorfelder, gesteuert über die Energiezentrale, kontrolliert regeneriert werden. Da sich der genaue Wärmeertrag der PVT-Anlage bisher schwer simulativ darstellen lässt, wurde dieser bei der Simulation der EES und der GKA noch nicht berücksichtigt. Im Betrieb muss darauf geachtet werden, dass das KNW-Netz nicht zu warm wird, um ausreichendes Kühlpotenzial für die Gebäude jederzeit vorhalten zu können.

#### 2.1.4.2 Wärmepumpenanlage

Die SSW bieten den zukünftigen Eigentümern des Baugebietes zwei Wärmepumpen-Konfigurationen an, um sich an das KNW-Netz anzuschließen. Die erste Konfiguration beinhaltet eine Sole-Wasser-Wärmepumpe für Einfamilienhäuser mit einem integrierten 170 Liter Edelstahl-Warmwasserspeicher und einer Heizleistung von 5,6 kW. Die zweite Wärmepumpen-Konfiguration beinhaltet eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einem zusätzlichen Brauchwasserspeicher und einer Heizleistung von 4,8 kW. Der Brauchwasserspeicher hat zwei Kammern. In der einen Kammer befindet sich das Brauchwasser mit einem Speichervolumen von 205 Litern. In der zweiten Kammer befindet sich das Heizungswasser mit einem Speichervolumen von 71 Litern. In dem Brauchwasserspeicher ist ein Heizstab integriert.

Mit der zweiten vorgestellten Wärmepumpen-Konfiguration wird das Ziel verfolgt, zukünftig lokal auf dem Dach erzeugten PV-Strom für die Wärmeerzeugung zu nutzen. Der eingebaute Heizstab im Brauchwasserspeicher ermöglicht eine direktelektrische Wärmeerzeugung. Die privaten Haushalte erhalten mit diesem Paket die Möglichkeit, die lokal erzeugte elektrische Energie in Wärme umzuwandeln (Power-to-Heat). Dies kann sich bspw. zu Zeitpunkten anbieten, zu denen PV-Strom erzeugt wird, aber der Batteriespeicher bereits voll und die Einspeisevergütung in das Stromnetz niedrig ist. So kann der Direktnutzungsgrad des PV-Stroms erhöht und teilweise das öffentliche Stromnetz entlastet werden, da Produktionsspitzen direkt dezentral verringert werden können.

### 2.1.4.3 Glasfaser

Im gesamten Baugebiet wurden Glasfaserkabel verlegt. Mit der Einbringung der Glasfasertechnologie wurde die Infrastruktur für eine hohe Datenübertragung geschaffen. Dies ist die Grundlage um ein District Energy Management System (DEMS) zu entwickeln und anzuwenden. Die Übertragung der Daten in Echtzeit unterstützt das DEMS bei der zukünftigen Steuerung der Energieflüsse im Neubaugebiet, welche die verschiedenen Sektoren nicht getrennt, sondern gekoppelt betrachtet.

Im Neubaugebiet „An den Wichelkoppeln“ wurden die vorgestellten Systeme integriert, um die drei Sektoren Wärme, Elektrizität und Verkehr miteinander zu koppeln. Im Anschlussvorhaben ErdEis III sollen auf Basis der eingesetzten Technologie das DEMS entwickelt werden, bei denen private Haushalte ihre erzeugte Energie innerhalb des Quartiers und auch netzübergreifend vermarkten können. So kann die Sektorenkopplung noch weiter erhöht werden.

Diese verstärkte direkte Nutzung vor Ort wird in den nächsten Jahrzehnten immer wichtiger werden, da immer größere Energiemengen dezentral erzeugt und von den Netzen aufgenommen bzw. verteilt werden müssen. Wenn ein Teil dieser Energie, besonders zu Produktionsspitzenzeiten wie Sommertagen, bereits vor Ort genutzt werden kann, kann das die Stromnetze enorm entlasten.

### 2.1.5 AP 1.5 Systematische Inbetriebnahme

Die SSW haben für die Errichtung der EES die Abstimmungsarbeiten mit den ausführenden Unternehmen fortlaufend koordiniert und beaufsichtigt. Das KNW-Netz, die Energiezentrale sowie die Technologien zur Erschließung der Umweltenergiequellen wurden Ende November 2021 mit der Befüllung durch des Wärmeträgermedium technisch fertiggestellt. Anfang Juni 2022 wurden sämtliche Baumaßnahmen beendet und die systematische Inbetriebnahme abgeschlossen.

Mit der EPC wurden für die ersten Betriebsjahre sowie über die Laufzeit des Forschungsvorhaben hinaus ein Konzept zur Fahrweise der ersten Jahre entwickelt, siehe Abbildung 25.

Jahr	ErdEis II		ErdEis III									
	2022		2023		2024		2025		2026		2027	
Jahreszeit	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
EES Wiese	-	bei Bedarf	natürlich	bei Bedarf	natürlich	vereisen	aktive Reg.	vereisen	Regeneration optimiert	vereisen	Regeneration optimiert	vereisen
EES RRB	-	bei Bedarf	natürlich	vereisen	aktive Reg.	vereisen	aktive Reg.	vereisen		vereisen		vereisen
GKA Wiese	-	-	-	bei Bedarf	natürlich	bei Bedarf	natürlich					
GKA RRB	-	-	-	bei Bedarf	natürlich	bei Bedarf	aktive Reg.					

**Abbildung 25: Konzept für die Fahrweise während der wissenschaftlichen Untersuchung**

Der Anstieg der Bauzinsen sowie der Wegfall von Förderprogrammen führten unter anderem dazu, dass Anfang 2022 keine Wohngebäude errichtet wurden. Der Bau der ersten Einfamilienhäuser begann im Spätsommer 2022. Die Fertigstellung der ersten Gebäude wird im Frühjahr 2023 erwartet. Im ersten Jahr (2023) wird voraussichtlich ein Viertel der Grundstücksflächen bebaut sein. Der Wärmebedarf ist dementsprechend gering. Aus diesem Grund soll zunächst nur dem EES unter dem RRB

Wärme entzogen werden, um ihn einfrieren zu können. Der andere EES und die GKA werden nur bei Bedarf zugeschaltet. Im Sommer kann der EES unter dem RRB mithilfe der Gebäudekühlung aktiv regeneriert werden. Der andere EES und die beiden GKA können abgesperrt und die natürliche Regeneration beobachtet werden.

Im zweiten Winter (2024-2025) können, wenn genug Häuser errichtet wurden, beide EES vereist werden. Im Sommer können die EES mithilfe der PVT-Module auf der Feuerwache regeneriert werden. Je nachdem, ob die GKA benötigt wurden, kann jeweils eine GKA natürlich bzw. aktiv regeneriert werden, um beide Regenerationen miteinander vergleichen zu können.

Im dritten Winter (2025-2026) sollte das Baugebiet nahezu vollständig bebaut sein, sodass beide EES und GKA voll in Betrieb sind. Bis Ende 2027 können verschiedene Betriebs- und Regenerationsvarianten getestet werden. Diese werden im Rahmen von ErdEis III und basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Jahre entwickelt und getestet.

Sobald alle wissenschaftlichen Untersuchungen abgeschlossen sind, kann auf eine möglichst wirtschaftliche Fahrweise gewechselt werden, um für die Bewohner niedrigere Kosten zu erzielen. Auch diese möglichst wirtschaftliche Fahrweise soll im Rahmen von ErdEis III entwickelt werden.



## 2.2 AP 2 Messtechnische Erfassung

Um den EES, aber auch das Gesamtkonzept, wissenschaftlich auswerten zu können, war es essenziell, Messkonzepte zu entwickeln und umzusetzen. Es sollten mit den EES, GKA, der Einbindung des PVT-Kollektors, der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR) der Energiezentrale, dem KNW-Netz und den dezentralen Wärmepumpen alle relevanten Komponenten des Gesamtkonzeptes mit Messtechnik ausgerüstet werden. Alle Daten fließen in einer Datenbank zusammen. Dies erleichtert die wissenschaftliche Auswertung und ermöglicht es, das Gesamtsystem zu optimieren. Ein Fokus liegt auch auf der Qualitätsprüfung der erhobenen Messdaten. Weiterhin sollen relevante Messdaten den Bewohnern in Form einer App allgemeinverständlich zugänglich gemacht werden, um die Akzeptanz des Projekts zu fördern.

### 2.2.1 AP 2.1 Erdeisspeicher

Das AP 2.1 hatte zum Ziel, ein messtechnisches Gesamtkonzept zu entwickeln, welches sowohl die Vorgänge innerhalb des EES als auch die im Erdreich erfassen sollte. Nach der Fertigstellung der geothermischen Anlagen sowie dem kompletten Verbau der Messtechnik aber noch vor dem regulären Anlagenbetrieb sollten messtechnische Untersuchungen mit Hilfe eines für diese Art der oberflächennahen Wärmequelle entwickelten Thermal-Response-Test (TRT) durchgeführt werden.

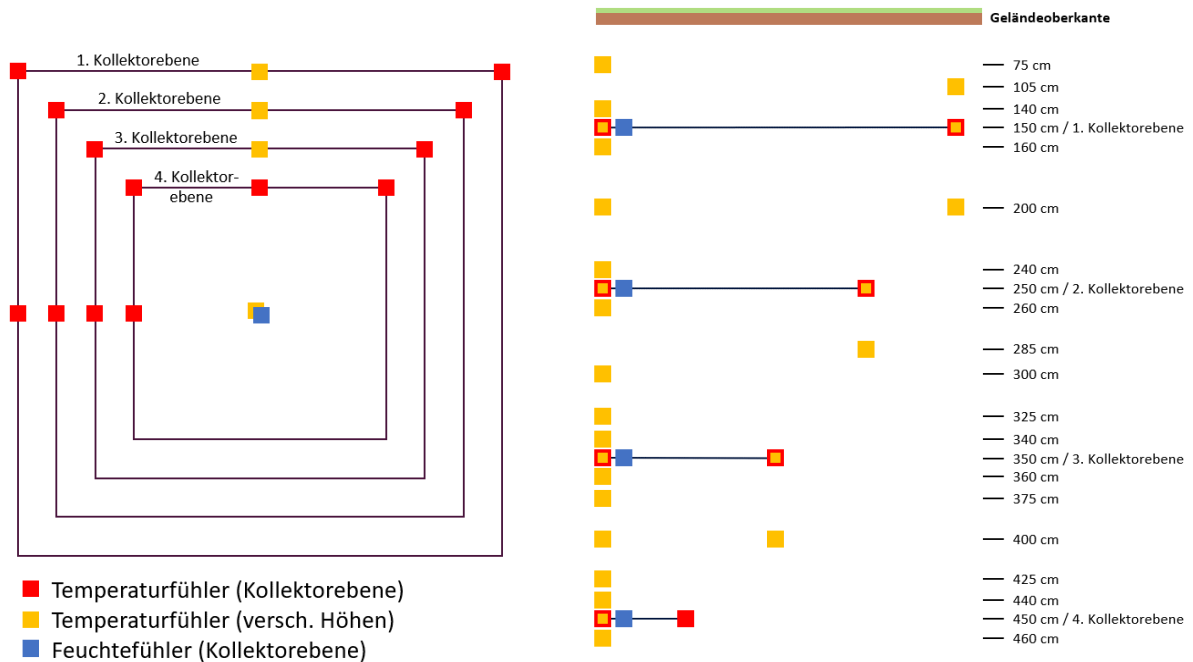
Bei der messtechnischen Erfassung des EES wurden die Schächte, in welchen die Kollektorebenen zusammenlaufen, mit Einschraubtemperaturfühlern im Vor- und Rücklauf ausgestattet. Da sowohl die 1. Kollektorebene als auch die unteren drei Ebenen jeweils eigene Leitungen mit eingebautem Volumenstromsensor zurück zur Energiezentrale besitzen, kann zusammen mit den Einschraubtemperaturfühlern die im EES aufgenommene bzw. abgegebene Wärmemenge sehr genau bestimmt werden.

Darüber hinaus wurde das Erdreich um und zwischen den Kollektorebenen sehr feinmaschig mit Temperatur- und Feuchtefühlern versehen, wie Abbildung 26 zu entnehmen ist. Zudem wurden in der Mitte des EES Temperaturfühler über die komplette Tiefe in einer hohen Auflösung eingebracht. Darüber hinaus wurden zwei Ecken und zwei Seiten mit Messtechnik ausgestattet. Die Auswahl der Ecken basierte auf der Entscheidungsgrundlage, die Einflüsse des Grundwasserstroms (in der Vogelperspektive von links nach rechts) abbilden zu können. Die Bodenfeuchte wird bei jeder Kollektorebene in der Mitte des Kollektorfeldes erfasst.

Der EES unter dem RRB wurde mit Sensorik nach identischem Messkonzept ausgestattet, allerdings wurde sich hier auf eine Ecke und eine Seite des Kollektorfeldes beschränkt. Um die Messergebnisse mit ungestörtem Erdreich vergleichen zu können, wurde eine Referenzmessstelle mit etwas Abstand zu den EES errichtet. Bei der Referenzmessung wird die Erdreichstemperatur in 50 cm Abständen bis in eine Tiefe von 4 m erfasst und die Feuchte in 1 m Abständen aufgezeichnet.

Die Messergebnisse dienen zur genauen Erfassung der Temperaturverteilung zwischen den Ebenen und bieten die Möglichkeit ein möglichst gleichmäßiges Einfrieren des Erdreichs zu realisieren. Weiterhin können so die verwendeten Simulationswerkzeuge validiert werden. Für diesen Zweck wurde

auch eine Wetterstation auf dem Dach der Energiezentrale installiert, um passende Eingangsparameter für die Simulationsmodelle zu generieren.



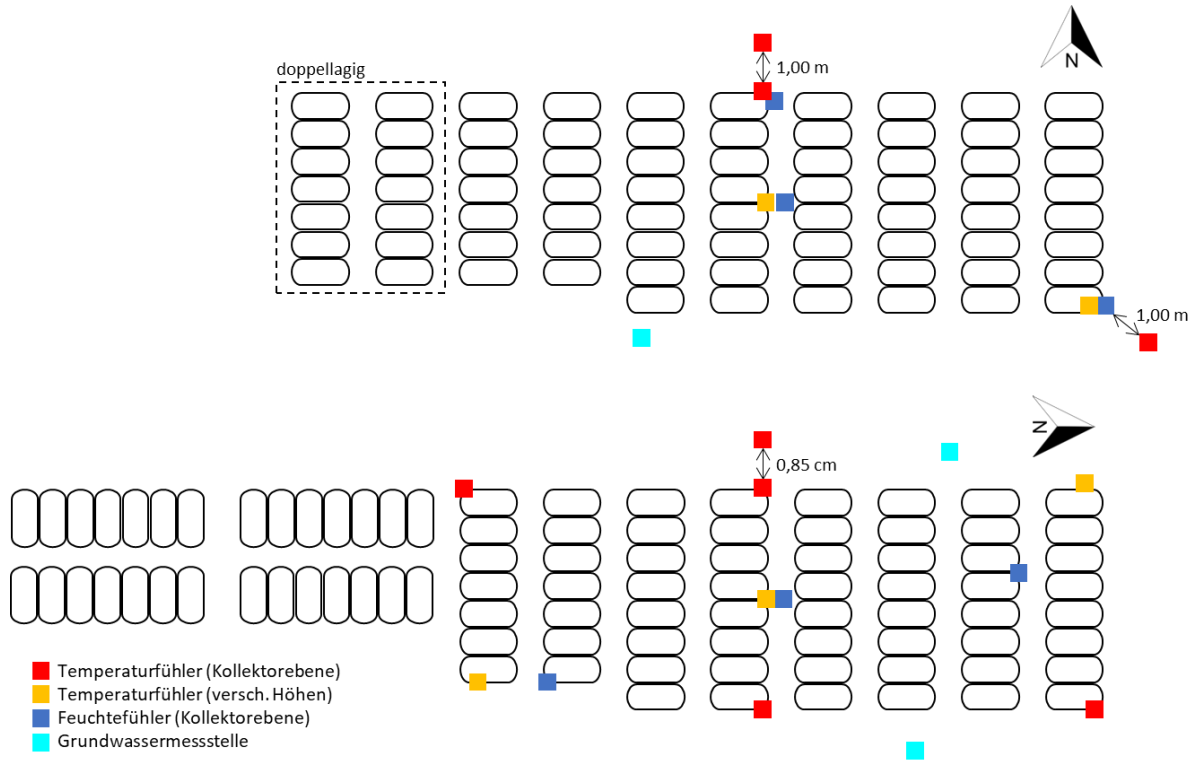
**Abbildung 26: eingebaute Messtechnik Erdeisspeicher unter Freifläche (links: Vogelperspektive, rechts: Querschnitt)**

Um später im Betrieb möglichst gut abschätzen zu können, wie ausgelaugt bzw. regeneriert die GKA sind, wurden sie ebenfalls mit Messtechnik ausgestattet. Neben Temperaturfühlern wurden Feuchtefühler sowie Grundwassermessstellen eingebaut. Die beiden letztgenannten dienen vor allem zur weiteren Validierung der verwendeten Simulationswerkzeuge.

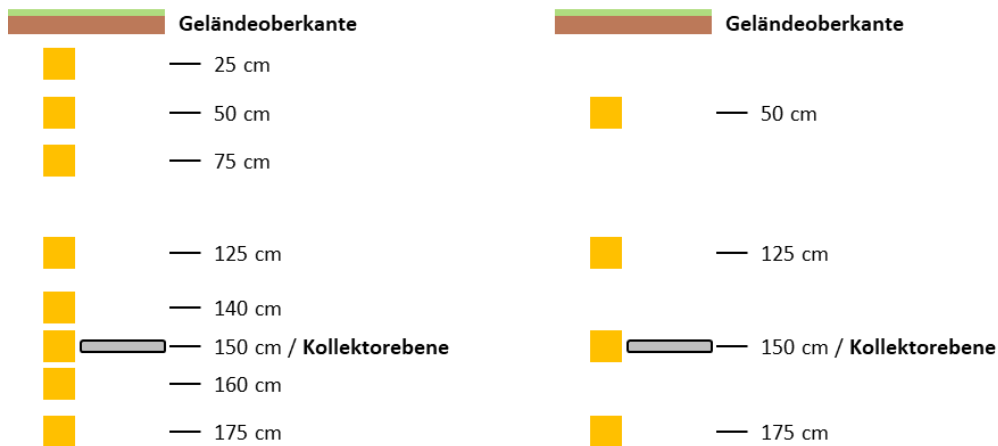
In Abbildung 27 sind die Positionen der Messfühler für beide GKA dargestellt. In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass die Kollektoren der Hauptfelder identisch angeordnet wurden. Lediglich die Reservestränge auf der linken Seite sind unter dem RRB doppellagig und unter der Freifläche gedreht angeordnet.

Die Messfühler wurden bei beiden GKA an vergleichbaren Positionen installiert. So können beim späteren Monitoring mögliche Unterschiede zwischen der Performance einer GKA unter einem RRB und einer GKA unter einer Freifläche ermittelt werden.

In Abbildung 28 sind die Querschnitte der Messstellen dargestellt. In der Mitte der Kollektorfelder wurde eine sehr hohe Auflösung an Temperaturfühlern installiert (linke Abbildung), an den Ecken ist sie etwas geringer (rechte Abbildung).



**Abbildung 27: eingebaute Messtechnik Großkollektoranlagen (oben: Regenrückhaltebecken, unten: Freifläche)**



**Abbildung 28: eingebaute Messtechnik Großkollektoranlagen Querschnitt (links: Mitte des Feldes, rechts: Ecke des Feldes)**

Im September 2020 starteten die Arbeiten für die westliche GKA und den westlichen EES unter der Wiese. Die Messtechnik konnte während des Einbaus der Kollektormodule nach dem erarbeiteten Messkonzept installiert werden. Allerdings mussten kleine Veränderungen vorgenommen werden, um das Messkonzept an die sich ergebenden Umstände vor Ort anzupassen. Ein Beispiel dafür sind die Messfühler, die beim EES unterhalb des RRB in 1 m Entfernung zur jeweiligen Kollektorebene

direkt in das Erdreich eingebracht werden sollten. Hier war es aufgrund der Beschaffenheit des Erdreichs und dem nachströmenden Grund-/Schichtwasser nicht möglich, diese entsprechend zu platzieren. Deshalb wurde sich entschieden, diese wegzulassen. Ein weiteres Beispiel waren die Messfühler beim EES unter der Freifläche. Diese wurden so umgesetzt, dass der Verteilerkasten auf der Westseite der Anlage aufgestellt und die Anbindeleitung an der Nordseite besser erfasst werden konnte. Im Juli, August und Oktober 2021 wurde die restliche Messtechnik sowie die Referenzmessung eingebracht. Mitte Dezember konnte die Messtechnikfirma mit der phasenweisen Installation, Anschluss und Kalibrierung der einzelnen Komponenten beginnen. Abbildung 29 zeigt einzelne Phasen des Messtechnikeinbaus.



**Abbildung 29: Gitter mit angebrachten Sensoren in der westlichen GKA unter der Freifläche (links), Vierte Kollektorebene EES unter Freifläche (Mitte), Aushub EES unter Regenrückhaltebecken (oben rechts) und GKA unter Regenrückhaltebecken (unten rechts)**

Nach Fertigstellung der geothermischen Anlagen und vor der regulären Inbetriebnahme sollten mit einem speziell für oberflächennahe Wärmequellen entwickelten Thermal-Response-Test-Verfahren weitere messtechnische Untersuchungen durchgeführt werden. Im Zuge einer Marktrecherche zeigte sich allerdings, dass es keinen Hersteller von TRT-Geräten gibt, welche die Anforderungen (Heizleistung bzw. Kühlleistung) erfüllen bzw. überhaupt anbieten. Vor diesem Hintergrund hat sich die Friedrich-Alexander-Universität (FAU) dazu entschlossen, das TRT-Gerät selbst zu bauen. Zunächst wurden die Anforderungen an das selbstgebaute TRT-Gerät mit den involvierten Partnern des Forschungsvorhabens besprochen und festgelegt. Aufgrund der hohen Preise, die für die Einzelkomponenten des TRT-Geräts angefallen wären, lag der Fokus auf der Beschaffung eines gebrauchten Kühlaggregats, welches beispielsweise in Kühl-Lastkraftwagen verbaut wird. Anschließend soll das Kühlaggregat nach den definierten Anforderungen umgebaut werden, sodass es zum Heizen und Kühlen eines Wärmeträgermediums verwendet werden kann. Dazu wurde der geplante Luftwärmetauscher (Luft-WT) ausgebaut und durch einen Wasser-WT ersetzt. Die Sensoren, welche normalerweise für die Temperaturregelung im Laderaum des Fahrzeugs verbaut sind, wurden in den Wasserlauf des Sondenkreislaufs eingebaut. Dadurch kann die Vorlauftemperatur über das ursprüngliche Bedienfeld am Kühlaggregat eingestellt werden. Der Vor- und Rücklauf sollte ähnlich wie bei handelsüblichen TRT-Geräten aufgebaut sein. Eine drehzahlgeregelte Pumpe sorgt für die

Zirkulation des Wärmeträgermediums. An die Pumpe wurde der in das Kühlaggregat adaptierte Flüssigkeits-WT angeschlossen. Zwei Temperatursensoren und ein Mengenzähler erfassen die Daten im Vorlauf. Im Rücklauf befinden sich ebenfalls zwei Temperatursensoren, welche mit einem Datenlogger aufgezeichnet und ausgelesen werden können. Der Aufbau wird auf einem Plattformanhänger montiert, um einen mobilen Einsatz zu ermöglichen (vgl. Abbildung 30).



**Abbildung 30: Mobiles TRT-Gerät im Einsatz (Quelle: Joseph Balda, FAU)**

Nach der Fertigstellung des TRT-Gerätes wurden die einzelnen Elemente in einem Datenblatt zusammengefasst und ihre Eigenschaften in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 3: Übersicht über die technischen Eigenschaften des TRT-Gerätes**

<p><b>Kühlaggregat</b>  Carrier Maxima 1000 DPH  Kraftstoff: Diesel/Elektro  Verbrauch Diesel: 4-6 l/h  Verbrauch Strom: 10-20 kWh  Temperaturbereich: - 30 °C bis + 70 °C  Lautstärke: 101,5 dB  Gewicht: 780 kg  Kühlmittel: R404A (Füllmenge ca. 10 kg)</p>	<p><b>Hydraulik primär</b>  WT im Kältekreislauf bis 30 kW  WT im Dieselmotor Kühlkreislauf primärseitig 20 kW  Absperrhähne zur Temperaturvorwahl (Heizen oder Kühlen)  Ein Mischer zur feineren Temperaturvorwahl  Carrier Steuerung mit automatischer Temperaturregelung für feinste Temperaturregelung</p>
<p><b>Pumpe</b>  Grundfoss Alpha 2  Durchfluss: stufenlos bis 3,5 m<sup>3</sup>/h  Stromaufnahme: 34 W  Max Betriebsdruck: 10 bar</p>	<p><b>Hydraulik Sekundär</b>  Sondenkreisläufe mit 4 Temperatursensoren (PT100)  2 Durchflusszähler SU 8000 Ultraschall</p>

Im Juli 2022 konnte ein Testlauf des TRT-Gerätes durchgeführt werden. Es wurde entschieden, die unterste Ebene des unter dem RRB befindlichen EES abzukühlen. Da entsprechende Simulationen zeigten, dass ein komplettes Einfrieren des Erdreichs nicht in einem realistischen Zeitraum durchführbar wäre, sollte ein Proof-of-Concept stattfinden. Es wird also direkt mit dem Versuch ermittelt, ob ein Abkühlen und damit theoretisch das Einfrieren des Erdreichs möglich wäre.

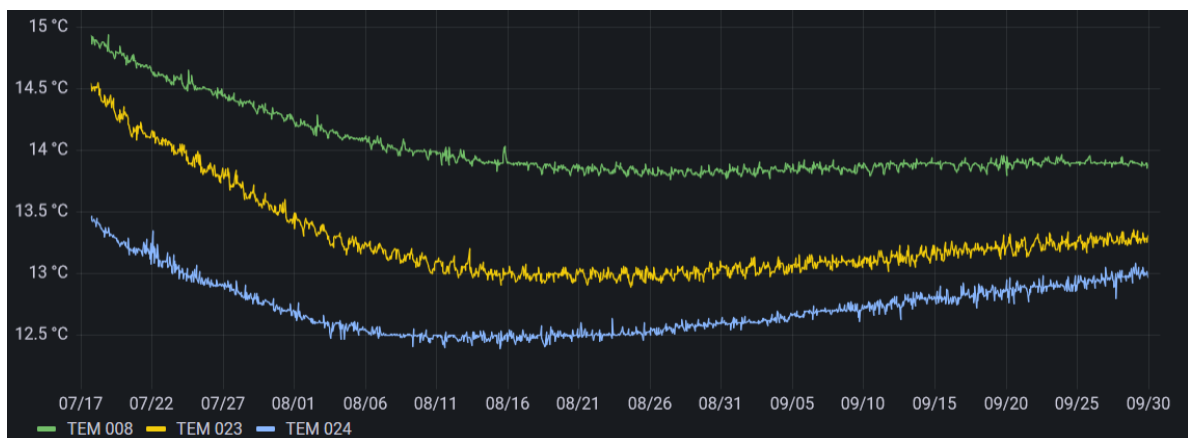
Vom 15.07. bis zum 23.07.2022 konnte der Testlauf durchgeführt werden. Die reine Messdauer betrug 90 h bei einer durchschnittlichen Entzugsleistung von 12,4 kW. Die damit erreichte

Gesamtentzugsmenge lag bei 1.116 kWh und der Durchfluss bei 103.500 l. Mit diesem Setting gelang es über den genannten Zeitraum, das Wärmeträgermedium im Vorlauf um 5,5 K abzukühlen. Im Rücklauf konnte das Wärmeträgermedium immerhin noch eine Abkühlung von 3,6 K vorweisen. Betrachtet man die Messergebnisse der verbauten Temperatursensoren, lässt sich eine Abkühlung der untersten Ebene im Erdreich feststellen. In Abbildung 31 sind die Sensoren in dieser Kollektorebene dargestellt (TEM 008 in der Mitte, TEM 023 an der Seite und TEM 024 an der Ecke der Ebene). Es kann eine geringe Abkühlung um ca. 0,5 K im Versuchszeitraum beobachtet werden.



**Abbildung 31: Temperaturwerte der Sensoren in der untersten Kollektorebene während des TRT-Betriebes**

Es zeigt sich, dass der EES während des Versuchszeitraums relativ gleichmäßig an allen drei Messpunkten abgekühlt wird. Die geringe Abkühlung ist mit der Lage der Sensoren an der Außenseite der Kollektorrohre und dem umgebenden Erdreich erklärbar, welches sehr träge auf den Wärmeentzug reagiert. Diese verzögerte Reaktion des Erdreiches ist gut erkennbar bei einer Betrachtung der Wochen nach dem Wärmeentzug. Obwohl der Test mit dem TRT-Gerät bereits abgeschlossen war, kühlte das Erdreich durch die Trägheit und durch das im System verbliebene Wärmeträgermedium noch weiter nach (vgl. Abbildung 32).



**Abbildung 32: Temperaturwerte der Sensoren in der untersten Kollektorebene nach dem TRT-Betrieb**

Die erreichte Temperaturdifferenz in Bezug auf das Ausgangsniveau beträgt im Maximum 1,5 K. Bis das Erdreich diese maximale Temperaturdifferenz angenommen hat, verging fast ein ganzer Monat. Erst ab Mitte/Ende August stieg die Temperatur im Erdreich wieder an, hatte allerdings bis Ende September, also einen ganzen Monat später, immer noch nicht ihr ursprüngliches Niveau erreicht (vgl. Abbildung 32).

Abschließend ist festzuhalten, dass die Funktionsfähigkeit des TRT-Gerätes bewiesen werden konnte. Mit dem verwendeten Setting war es jedoch nicht möglich, die unterste Kollektorebene zu vereisen, da dafür eine deutlich längere Laufzeit des TRT-Gerätes oder eine höhere Entzugsleistung notwendig gewesen wäre. Mithilfe von weiteren Feldmessungen des TRT-Gerätes auf dem Lagarde-Gelände in Bamberg und der ehemaligen Gösser-Halle in Wien soll verifiziert werden, dass eine höhere Entzugsleistung bzw. eine längere Laufzeit notwendig sind, um die geothermischen Anlagen zu vereisen.

## **2.2.2 AP 2.2 Kaltes Nahwärmenetz**

Im umgesetzten Messkonzept (siehe Kapitel 2.2.1) befinden sich unter anderem Temperaturmessfühler und Durchflussmesser an verschiedenen Stellen der Vor- und Rücklaufleitungen zwischen den Geothermieanlagen bzw. der PVT und der Energiezentrale. Diese Messfühler ermöglichen eine genaue Berechnung des Wärmestroms aus den einzelnen Quellen. Zudem können über mehrere Temperaturmessfühler die Wärmegewinne der Leitungen zwischen Quellen und Energiezentrale ermittelt werden, was eine genauere Analyse der Quellen ermöglicht. An der Schnittstelle zwischen Energiezentrale und KNW-Netz befindet sich ein Wärmemengenzähler, mit dem die durch die Quellen gewonnene Quellwärme ermittelt werden kann. Da auf der Sole-Seite der dezentralen Wärmepumpen die Temperaturen erfasst werden, kann darüber ein Temperaturfeld des Netzes errechnet werden. Aus diesem Grund mussten keine zusätzlichen Temperaturfühler im Netz verbaut und es konnten Investitionskosten gespart werden.

Die Verträge der Bewohner wurden so angepasst, dass eine wissenschaftliche Erfassung und Auswertung der Daten grundsätzlich möglich sind. Zusätzlich werden diesbezügliche Vereinbarungen zwischen den Stadtwerken und den Projektpartnern geschlossen.

Da zum Zeitpunkt des Projektendes außer der Feuerwache noch keine Wärmepumpen angeschlossen sind, können an dieser Stelle keine Ergebnisse der Messdatenauswertung präsentiert werden.

## **2.2.3 AP 2.3 Quartier**

In diesem Arbeitspaket wurde zum einen untersucht, inwieweit das Quartier als solches messtechnisch erfasst werden kann. Neben den bereits im vorherigen Arbeitspaket erwähnten Temperaturfühlern besitzen die dezentralen Wärmepumpen auch Wärmemengenzähler, um die genutzte Quellwärmemenge berechnen zu können. Genauere Informationen zum Heizungs- und Trinkwarmwasserbedarf werden erfasst und den Bewohnern zu Verfügung gestellt; inwiefern solche personenbezogenen Verbrauchsdaten jedoch zur wissenschaftlichen Auswertung verwendet werden dürfen, muss noch geklärt werden.

Zur Erfassung der Daten der Wärmepumpen werden Regeleinheiten mit Netzwerkanbindung in den jeweiligen Gebäuden verbaut. Diese ermöglichen einen sicheren Datentransfer an die Datenbank sowie die Umsetzung eines District Energy Management Systems, welches Gegenstand des Forschungsvorhabens ErdEis III sein wird.

Weiterhin wurde im Rahmen des Arbeitspaketes eine Datenbank aufgebaut, um im Forschungsvorhaben und in etwaigen Anschlussvorhaben einen unkomplizierten Zugriff auf alle verfügbaren Messdaten zu ermöglichen. In diese Datenbank fließen Messwerte aus drei verschiedenen Quellen:

- die Feuchte-, Temperatur- und Volumenstrommessfühler in und um die GKA bzw. EES und in den Leitungen zur Energiezentrale sowie die Wetterstation (von Fa. GSG Geologie-Service GmbH)
- die Daten der MSR-Technik in der Energiezentrale (von Fa. Söth)
- die Daten der dezentralen Wärmepumpen (von Fa. Waterkotte)

Es wurde eine Datenbankstruktur aufgebaut, die das Einlesen der Daten aus diesen drei Quellen sowie eine einheitliche Ablage ermöglicht. Dazu wurde von der Fa. Consolinno Energy GmbH eine Influx DB Datenbank mit „Grafana“ als Werkzeug zur Visualisierung der Daten aufgebaut. Grafana ist eine plattformübergreifende Open-Source-Anwendung zur grafischen Darstellung und Aufbereitung von Daten. Die Forschungspartner haben so die Möglichkeit, mit wenig Aufwand eigene Auswertungen, Graphen und Darstellung zu erstellen. Somit können die Messdaten bestmöglich und effizient ausgewertet werden.

Um die Messstellen in der Datenbank einheitlich und übersichtlich benennen zu können, wurde ein Benennungskonzept entwickelt. Besonders da es für die Zukunft sehr hilfreich ist, Messdaten unterschiedlicher Forschungsvorhaben unkompliziert miteinander vergleichen zu können, sollte das Messkonzept direkt auch auf andere Forschungsvorhaben übertragbar sein. Da die Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm mit dem Forschungsvorhaben KNW-Opt (FKZ: 03EN3020A-F) an einem ähnlichen Punkt stand, wurde das Benennungskonzept in Zusammenarbeit entwickelt. Zudem sind mit der FAU und TUD zwei Projektpartner sowohl bei ErdEis II als auch bei KNW-Opt beteiligt.

Zunächst wurde jedoch nach bereits etablierten Werkzeugen gesucht. Von der Begleitforschung wird das „Buildings Unified Data point naming schema for Operation management“ (BUDO) empfohlen. Es wurde vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Zusammenarbeit mit dem E.ON Energy Research Center aus Aachen entwickelt (RWTH Aachen University, 2020). Beim BUDO-Schema können die Bezeichnungen der Messpunkte in einer Excel-Datei über mehrere Drop-Down-Listen immer weiter verfeinert werden. Zuletzt wird der fertige BUDO-Schlüssel – die Messstellenbezeichnung – ausgegeben. Die einzelnen Kategorien bieten eine Vielzahl von Auswahlmöglichkeiten und sind für Gebäudeenergiesysteme – für die der Schlüssel entwickelt wurde – sehr detailliert und ausreichend. Für Projekte mit erneuerbaren Wärmequellen und Messfühlern im Erdreich sind die Auswahlmöglichkeiten jedoch an den für diese Projekte wichtigen Stellen nicht ausreichend.



Aus diesem Grund wurde sich dazu entschieden, ein neues Benennungskonzept zu entwickeln, das für oberflächennahe Geothermiesysteme geeignet ist. Dabei wurden direkt mögliche Erweiterungen mitgedacht.

In Abbildung 33 ist der Aufbau des Benennungskonzeptes dargestellt.

Projekt\_System\_Subsystem\_Leitung/Medium\_Messgröße\_Zahl(Ergänzung)

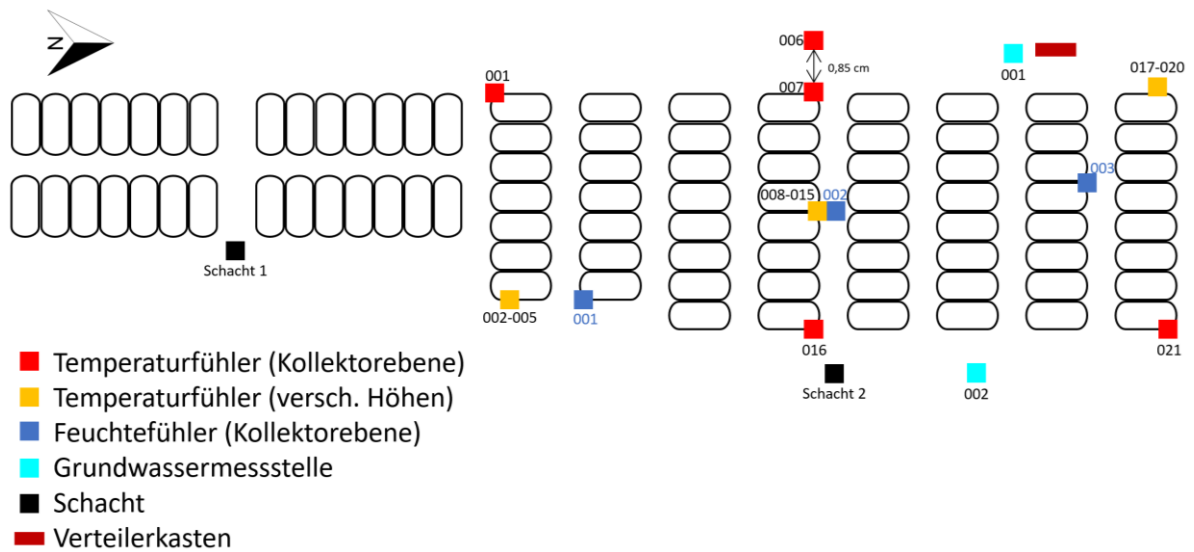
P02\_ENZ1\_KNW1\_RLp\_Tem\_001(beliebig)

### Abbildung 33: Benennungsbeispiel für Messstellenbezeichnung

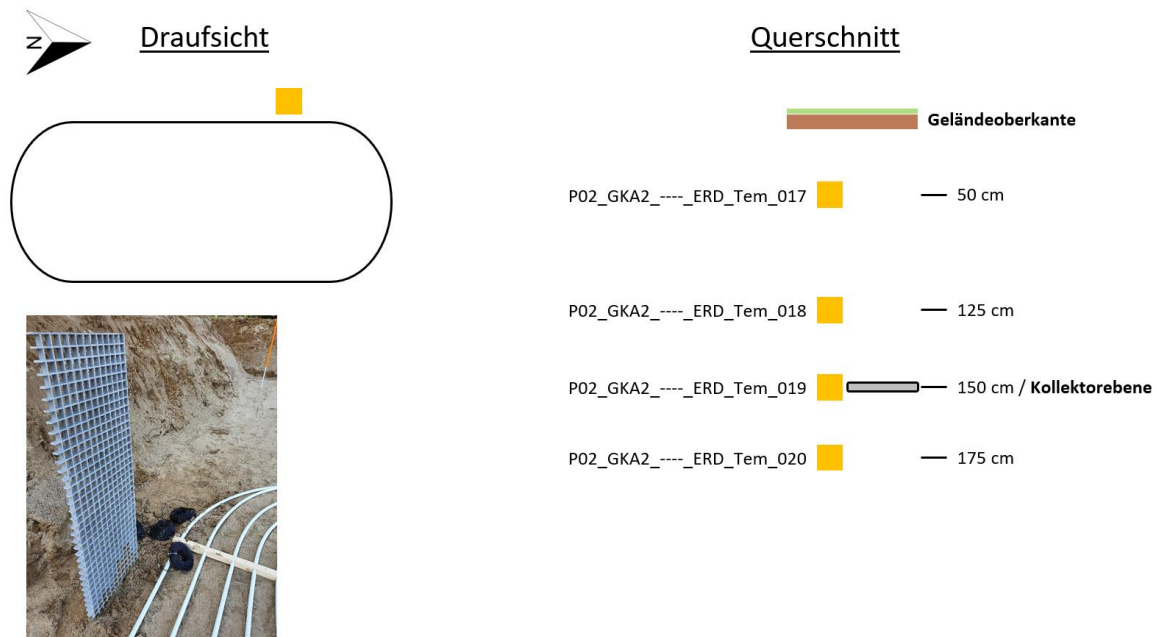
Das Benennungskonzept ist wie viele vergleichbare Konzepte (bspw. der BUDO-Schlüssel oder das Kraftwerk-Kennzeichnungssystem KKS) strukturiert und wird vom größten „System“ nach hinten immer spezifischer. So beginnt der Schlüssel zunächst mit dem Projekt und geht über das „System“ zum „Subsystem“, bis anschließend die Leitung bzw. das Medium definiert wird. Dahinter kommt dann die Messgröße und eine fortlaufende Zahl, falls mehrere Messstellen einen bisher identischen Schlüssel besitzen (bspw. mehrere Temperaturfühler im selben Kollektorfeld). Die einzelnen Stufen sind dabei immer durch Unterstriche voneinander abgegrenzt und haben eine definierte Länge und Verteilung von Buchstaben (B) und Ziffern (Z): BZZ\_BBBZ\_BBBZ\_BBB\_BBB\_ZZZ. Durch den identischen Aufbau können einzelne Datengruppen später leicht herausgefiltert werden (bspw. kann eine Liste mit Messstellen nach der 19. Stelle sortiert werden, was immer der Messgröße entspricht, um eine Liste aller Temperaturfühler zu erhalten). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Ergänzung am Ende des Schlüssels anzuhängen. Diese stehen in Klammern und können eine beliebige Länge und Form haben. Somit können beispielsweise ungewöhnliche Einheiten oder andere Besonderheiten vermerkt werden. Das Beispiel in Abbildung 33 bezeichnet dabei den Temperaturfühler 001, der sich im Rücklauf (primär) des Kalten Nahwärmenetzes 1 innerhalb der Energiezentrale 1 im Projekt ErdEis II befindet. Der Name einer Messstelle beruht damit auf der Zugehörigkeit zu einem System, die genaue Position wird über beigefügte Visualisierungen verdeutlicht.

Die sogenannte Messstellen-Visualisierung soll es ermöglichen, sich über Pläne und Skizzen schnell im Baugebiet zurechtzufinden und Messstellen eindeutig einem Ort zuzuordnen zu können.

Es wurde sich dafür entschieden, die Visualisierungen in Microsoft PowerPoint zu erstellen und die Datei anschließend in eine PDF zu konvertieren. PowerPoint ist quasi von jedem Benutzer anwendbar und Grafiken können selbst erstellt oder Bilder und Texte eingefügt werden. Es sind somit keine speziellen Vorkenntnisse oder Software nötig und Änderungen lassen sich schnell und einfach umsetzen. Durch interne Verlinkungen kann per Mausklick auf ein Objekt automatisch zur dazugehörigen Folie gesprungen werden; diese Verlinkungen bleiben auch bei der Konvertierung in eine PDF erhalten. Somit erhält man eine Visualisierung, durch die man sich einfach und leicht verständlich klicken kann, um die gewünschten Messstellen zu finden. In Abbildung 34 ist beispielsweise die Visualisierung für die GKA unter der Wiese dargestellt. Mit einem Klick auf das gelbe, rechte obere Kästchen gelangt man zur Folie, die in Abbildung 35 dargestellt ist. An der Position sind mehrere Temperaturfühler in unterschiedlichen Höhen angebracht, deshalb ist ein Querschnitt mit Höhenangaben dargestellt. Zusätzlich ist die genaue Position am Kollektor und ein Bild vom Einbau beigefügt.



**Abbildung 34: Beispiel Visualisierung Messstellen – GKA Wiese**



**Abbildung 35: Beispiel Visualisierung Messstellen – GKA Wiese – Gitter mit Messfühlern**

### 2.2.4 AP 2.4 Visualisierung der Energieflüsse für die Bewohner

Durch das Forschungsvorhaben soll den Bewohnern die Möglichkeit eröffnet werden, ihren eigenen Wärmeverbrauch per App einsehen zu können. Die Visualisierung der Energieflüsse für die Bewohner des Quartiers soll mittels einer App für mobile Endgeräte erfolgen. Das Format einer App wurde gewählt, da dies deutlich zeitgemäßer als ein Online-Portal ist und sich davon eine höhere

Nutzungsrate versprochen wird. Im Forschungsvorhaben +Eins (FKZ: 0327431R) zeigte sich bereits, dass ein Großteil der Nutzer durch solch eine Verbrauchsvisualisierung zum Energiesparen angeregt wird. Es zeigte sich aber auch, dass diese bedienerfreundlich sein muss, um diesen Effekt auch langfristig sicherstellen zu können (Stockinger, Jensch, & Grunewald, 2015).

Die Anzahl der visualisierten Datenpunkte wurde niedrig gehalten, um eine übersichtliche, benutzerfreundliche Oberfläche zu schaffen. In Tabelle 4 sind die Datenpunkte aufgeführt, die für die Bewohner visualisiert werden.

**Tabelle 4: Datenpunkte der Verbrauchsvisualisierung**

Datenpunkt	Max. Zeitliche Auflösung	Visualisierte Darstellung	Einheit
Vorlauftemperatur Heizkreis	15 min	Durchschnittswert	°C
Rücklauftemperatur Heizkreis	15 min	Durchschnittswert	°C
Raumtemperatur	15 min	Durchschnittswert	°C
Energieverbrauch Heizkreis	15 min	Graph, Balkendiagramm	kWh
Energieverbrauch Warmwasser	15 min	Graph, Balkendiagramm	kWh
CO <sub>2</sub> -Einsparung	15 min	Durchschnittswert	kg/kWh

Der Nutzer der App kann die Energieflüsse individuell darstellen lassen. Die zeitliche Auflösung (Stundenwerte, 15-min-Werte etc.) sowie die Darstellung (Graph, Balkendiagramm, Tortendiagramm etc.) kann daher variiert werden. In Abbildung 36 sind beispielhafte Darstellungen in der App zu sehen.

Im anschließenden Forschungsvorhaben ErdEis III werden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Darstellung der Daten dann hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit optimiert. Eines der Hauptziele der Visualisierung der Verbrauchsdaten ist eine Sensibilisierung und ein gesteigertes Bewusstsein der Endverbraucher für ihren Energieverbrauch. Daher müssen besonders diese Informationen auf einen Blick ersichtlich sein und ohne Anstrengung oder Recherche seitens der Nutzer eine Einschätzung des eigenen Endenergieverbrauchs zulassen.

Die Datenhaltung für die Endnutzervisualisierung wurde so konzipiert, dass sie auf den dezentralen Geräten in den Gebäuden selbst verbleibt. So muss in der Datenbank kein kompliziertes Rechtemanagement eingerichtet werden, welches nach Projektende von den SSW weitergeführt werden müsste.

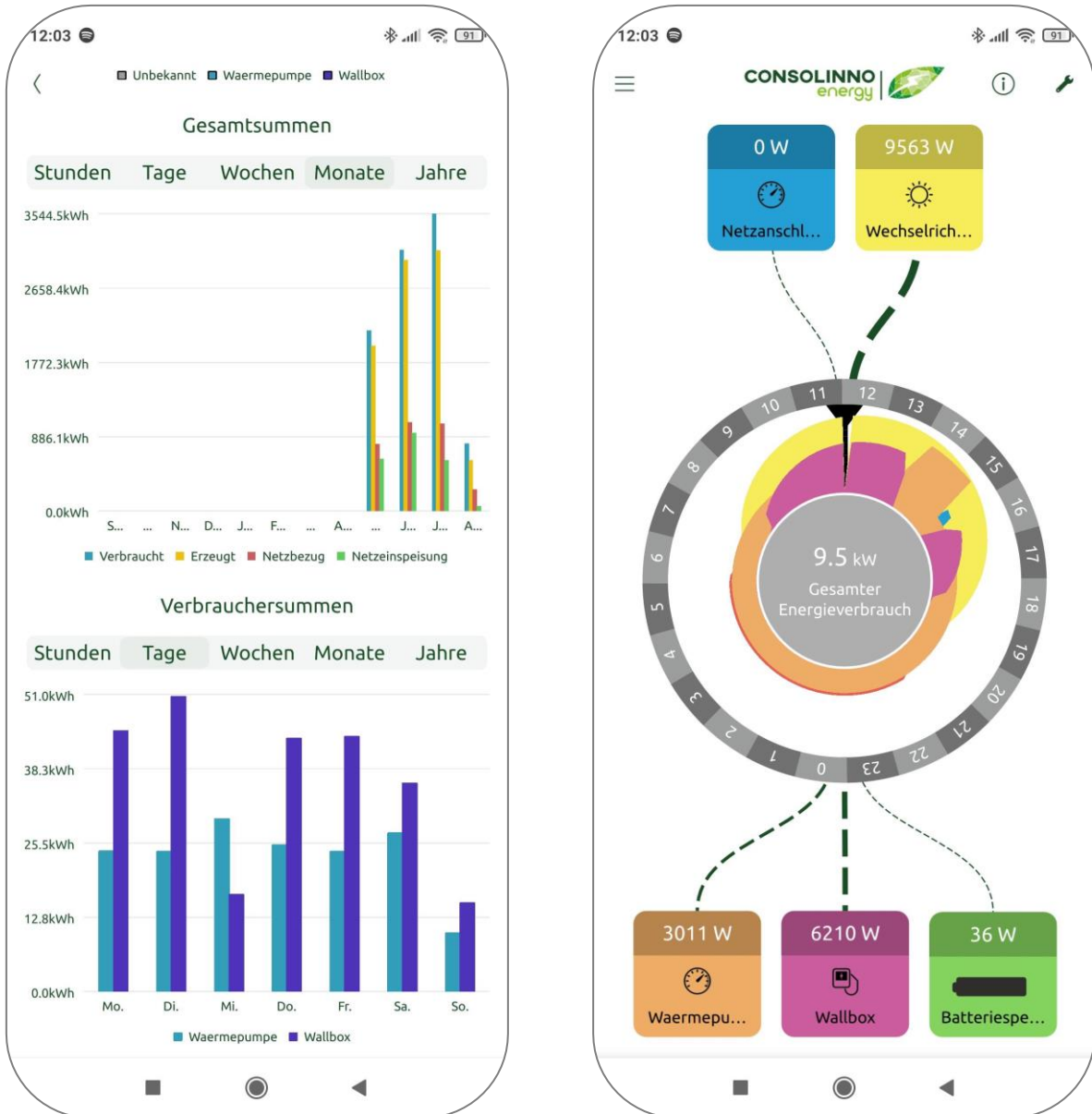


Abbildung 36: Darstellung in der App

## 2.2.5 AP 2.5 Datenqualitätsprüfung

Bei der Sammlung von Messdaten ist es entscheidend, Störungen und fehlerhafte Messwerte frühzeitig und zielsicher erkennen zu können. Über Grafana können automatisch Meldungen per E-Mail oder Microsoft Teams verschickt werden. Im Fall, dass ein Messpunkt keine Daten mehr übermittelt, wird sofort eine Störmeldungen versandt und es kann überprüft werden, warum keine Daten mehr erfasst werden.

Zusätzlich kann für jeden Messpunkt eine Ober- und Untergrenze eingerichtet werden. Sobald dieser erwartete Messbereich über- oder unterschritten wird, versendet das System eine Warnmeldung

und es kann überprüft werden, ob fehlerhafte Messwerte vorliegen. Im Folgenden sind die Messbereiche für die unterschiedlichen Messpunkte dargelegt.

**Tabelle 5: Ober- und Untergrenzen für Datenqualitätsprüfung**

System	Messpunkt	Min. Wert	Max. Wert	Einheit
Erdreich	Temperaturfühler im Erdreich	-10	25	°C
	Feuchtefühler im Erdreich	0	100	%
	Grundwassermessstellen – Temp.	-10	25	°C
	Grundwassermessstellen – Pegel	0	5	m
Schächte	Temperaturfühler in Schächten	-10	25	°C
Energiezentrale	Temperaturfühler VL & RL	-10	25	°C
	Temperaturfühler PVT-Einbindung	-10	90	°C
	Differenzdruck Erdwärmekollektor	4	20	mA
	Drucksensor	4	20	mA
	Wärmemengenzähler	-	-	kWh
	Pumpen – ein/aus	-	-	-
	Pumpen – Störung	-	-	-
	Pumpen – Stellen	0	10	V
	Motorstellventile – Stellung	-	-	Ohm
	Motorstellventile – auf/zu	-	-	-
Wetterstation	Globalstrahlung	0	2000	W/m <sup>2</sup>
	Niederschlagssumme	0	-	mm
	Niederschlag neu	0	-	mm
	Nd-Intensität	0	-	mm/h
	Temperatur	-20	50	°C
	Feuchte relativ	0	100	%
	Feuchte absolut	0	-	g/m <sup>3</sup>
	Taupunkt	-20	50	°C
	Windchill	-20	50	°C
	Luftdruck absolut	900	1100	hPa
	Luftdruck relativ	-200	200	hPa
	Windgeschwindigkeit	0	30	m/s
	Windgeschwindigkeit	0	100	km/h
	Windrichtung	0	360	°
	Windmessungsqualität	0	100	%
	Heizungstemperatur Windmesser	-20	50	°C
	Regensumme letzte Stunde	0	-	mm

	Regensumme Tag	0	-	mm
	Regensumme Monat	0	-	mm
	Regensumme Jahr	0	-	mm
	Regensumme gesamt	0	-	mm
	Regensumme diese Stunde	0	-	mm
	Luftdruck rel. berechnet	-200	200	hPa

Auf eine automatische Korrektur falscher Messwerte oder Interpolation fehlender Messwerte innerhalb der Datenbank wurde bewusst verzichtet, um eine Fehlfunktion oder den Ausfall eines Sensors detektieren zu können.

## 2.3 AP 3 Untersuchung nichttechnischer Hemmnisse

Neben den technischen Herausforderungen der KNW und des EES im Speziellen gibt es auch nicht-technische Hemmnisse, die die Umsetzung verhindern oder erschweren können. Im Forschungsvorhaben wurden einige dieser Hemmnisse untersucht. So wurde der Einfluss des EES auf Flora und Fauna untersucht, um eine Gefährdung erkennen und vermeiden zu können. Weiterhin wurden Rohrverbindungen auf ihre Dichtigkeit geprüft und das Abbauverhalten von Wärmeträgermedien im Erdreich untersucht. Damit soll die Gefahr von Leckagen reduziert und deren Auswirkungen besser einschätzbar gemacht werden.

### 2.3.1 AP 3.1 Einfluss der Einbringung und Vereisung auf die Umwelt

Das Arbeitspaket 3.1 sollte seinen Fokus auf die entstehenden Einflüsse richten, welche durch die Einbringung und die betriebsbedingte Vereisung entstehen. In einer ersten vorbereitenden Messkampagne wurden im Juli 2019 Feldmessungen und Labormessungen entnommener Bodenproben durchgeführt. In-Situ wurde die Wärmeleitfähigkeit gemessen sowie Stechzylinder entnommen, um die entsprechende Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte zu bestimmen. In der Labormesskampagne wurden die Proben zunächst auf ihre Korngrößenverteilung untersucht und anschließend mit der Kon-Lab-Methode die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes bestimmt. Auf eine Variation der Lagerungsdichte wurde bei dieser Methode verzichtet. Stattdessen wurde versucht, die Probenkörper mit einer aus den Feldmessungen vergleichbaren Lagerungsdichte zu erstellen.

Der Hauptaspekt des Arbeitspaketes stellte die Untersuchung von möglichen Hebungsprozessen, Änderungen im Bodengefüge oder Beeinträchtigung von Vegetation und Bodenorganismen dar. Diese können jedoch erst nach dem Einbau der einzelnen Kollektoren und EES und dem Abschluss weiterer Baumaßnahmen erfasst und genauer betrachtet werden. Da eine Untersuchung im Nachgang schwer umsetzbar ist, da sowohl die westliche GKA als auch der westliche EES unterhalb eines Spielplatzes bzw. eines Parkplatzes liegen werden und die nördliche GKA und der nördliche EES unterhalb eines RRB ebenfalls nicht mehr zugänglich sein werden, wurde stattdessen eine Literaturstudie durchgeführt. Diese hatte zum Ziel, etwaige Auswirkungen eines solchen Bauvorhabens zu detektieren und gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten.

In dieser Studie wurden fünf unterschiedliche Punkte angesprochen und diskutiert:

- Direkte Einwirkungen durch den Bau der Anlagen
- Hebungs- und Senkungereignisse des Bodenkörpers infolge der Vereisung
- Verschiebung der Vegetationsperiode durch Herabsetzen der Erdreichtemperatur
- Einfluss auf die Umwelt (insbesondere Fauna) und die Austrocknung des Erdreichs durch Kühlprozesse in den Sommermonaten

#### 2.3.1.1 Einwirkungen durch den Bau der Anlagen

Die ersten großen Eingriffe erfahren die Umwelt und insbesondere der Bodenkörper bei der Einbringung der Anlagen. Die Fläche für die Kollektoren und die EES muss ausgekoffert und nach dem Einbau der Anlagen muss der vorhandene Aushub in Ergänzung mit Bettungsmaterial wieder

eingebraucht werden. Dadurch entstehen Veränderungen in der Lagerungsdichte bzw. in der Zusammensetzung des Bodenkörpers. In dieser Phase nimmt der Einbau insofern Einfluss auf die Umwelt, dass währenddessen keine Möglichkeit der Ansiedlung für Pflanzen und Tiere besteht. Sobald die Anlagen verbaut sind, stellen sie einen Teil des Bodenkörpers. Hier nehmen sie nur in geringem Maße Einfluss auf die Pflanzen und Tierwelt. In diesem Stadium sind sie mit anderen im Boden verbauten anthropogenen Einbringungen wie Abwasserleitungen, Fundamenten etc. gleichzusetzen und stellen lediglich ein physikalisches Hindernis dar wie es auch größere Gesteinsbrocken, dicke Wurzeln oder ein Grundwasserkörper sind.

### 2.3.1.2 Hebungs- und Senkungsereignisse des Bodenkörpers infolge der Vereisung

Nach (Kellner, 2007) wurde anhand einer Beispielprobe aus dem Untersuchungsgebiet „An den Wichelkoppeln“ die zu erwartende Hebung eines 1 cm Bodenwürfels berechnet. Dabei handelt es sich um eine Mischprobe aus einem Baggerschurf, welche einen Sandanteil von über 70 % besitzt. An dieser Stelle etwa ist der westliche EES eingebracht worden. Die entsprechende Feuchtedichte  $\rho$  wurde auf  $2,01 \text{ g/cm}^3$  und der Wassergehalt  $w$  auf 23 % ermittelt.

Für diese Probe ergibt sich demnach eine Hebung von 0,03 cm. Mit dem ermittelten Wassergehalt entspricht dies einer maximalen Hebung von 3 %. Da die verwendete Beispielprobe hinsichtlich Dichte und Wassergehalt ähnliche Eigenschaften wie im Beispiel von (Kellner, 2007) aufweist, wäre eine maximale Hebung durch reinen Frosthubb und eine anschließende Eislinsenbildung zu erwarten. Allerdings handelt es sich im Falle der „Wichelkoppeln“ um einen sandigen und nicht um einen tonigen Boden, weshalb die Wasserhaltekapazität geringer ist und weniger Feuchtigkeit im Boden verbleibt, die gefrieren könnte. Zudem wurden etwaige Parameter wie Wassernachstrom oder Auflast nicht berücksichtigt. (Kellner, 2007) stellte bei seinen Versuchen fest, dass beispielsweise bei einer Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$  ein sandiges Substrat nur um  $1,5 \text{ mm/d}$  gehoben wird, während ein toniges Substrat hingegen um  $2,0 \text{ mm/d}$  angehoben wird. So entspricht eine Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$  etwa einer Auflast von 600 kg. Nimmt man die ausgewählte Sandprobe aus dem Untersuchungsgebiet mit einer Feuchtedichte von  $2,03 \text{ g/cm}^3$ , ergibt sich eine Auflast von ca.  $9.000 \text{ kg/m}^2$ . Es kann also davon ausgegangen werden, dass die entstehende Beeinflussung des Bodenkörpers durch Frosthebung und Eislinsenbildung selbst während einer längeren Frostperiode gering sind. Sichtbare Auswirkungen auf die Oberfläche sollte es auf Basis der durchgeführten Literaturstudie somit keine geben.

### 2.3.1.3 Verschiebung der Vegetationsperiode durch Herabsetzen der Erdreichtemperatur

Durch die Einbringung geothermischer Anlagen ist es möglich, dass sich die Vegetationsperiode kaum merklich um bis zu 2 Wochen infolge von kühleren Bodentemperaturen verschiebt (Rieberer & Em, 2006). Im Falle der „Wichelkoppeln“ ist dieser Aspekt aber als weniger problematisch einzustufen, da es sich bei den betroffenen Flächen um keine bewirtschafteten Gärten oder Äcker handelt. Über dem westlichen EES wird nach Abschluss der Bauarbeiten hauptsächlich Wiese anzutreffen sein und oberhalb des nördlichen EES befindet sich ein RRB. Hinzu kommt, dass die länger gefrorenen Bodenbereiche erst ab einer Tiefe von ca.  $2,50 \text{ m}$  anzutreffen sind und weder Gräser noch die im RRB entstehende Vegetation Wurzeln in dieser Tiefe ausbilden.



#### 2.3.1.4 Einfluss auf die Umwelt (Fauna)

Ein gefrorener Bodenkörper stellt eine Umstellung für die bodenbewohnenden Lebewesen da. Gerade im Bereich des EES sind diese Umstellungen am größten, da das Erdreich in dieser Tiefe normalerweise nicht gefriert bzw. nicht entsprechend niedrige Temperaturen erreicht. Zudem kommt es durch die geothermischen Anlagen auch zu einer längeren Frostperiode im Boden als üblicherweise. Dies sollte jedoch auf längerer Sicht kein Problem für die Tierwelt darstellen. Mikroorganismen verringern ihren Stoffwechsel in Frostperioden, um diese unbeschadet überstehen zu können. Somit bleibt die Grundlage des Nahrungssystems erhalten. Für Kleintiere wie Insekten oder bodenbewohnende Kleinsäuger stellt der Verbau ebenso kein Problem dar, da diese nicht bis in die entsprechenden Tiefen vordringen. Generell kann man im Falle der „Wichelkoppeln“ in erster Linie davon ausgehen, dass Kleinsäuger wie der Maulwurf diesen Bereich möglichst meiden, da sie nicht genügend Freifläche zur Verfügung haben und ein Großteil des Gebietes für die Erstellung des Baugebietes stark anthropogen überprägt wurde, bspw. durch Nivellierungsprozesse des gesamten Geländes und damit verbundenen Aufschüttungen oder Abtragungen sowie durch das Anlegen von gepflasterten Straßen und Schotterwegen. In den Gärten werden Kleinsäuger und Maulwürfe meist bekämpft und deren Lebensräume beschnitten. Ebenso bietet sich der Bereich des RRB aufgrund der periodischen Überschwemmung als eher ungünstiger Lebensraum für Kleinsäuger und Maulwürfe an.

#### 2.3.1.5 Austrocknung durch Kühlprozesse infolge größerer Wärmeemission

Eine Austrocknung ist im Gebiet der „Wichelkoppeln“ nicht zu erwarten. Bodenfeuchtemessungen aus dem Bereich der Erdkabel ergeben keine für die Vegetation signifikante Austrocknung (Uther, Trüby, Aldinger, Brakelmann, & Stammen, 2009), (Trüby & Aldinger, 2013) und (Brüggmann, Jungnitz, & Uther, 2015). Erdkabel werden in einer ähnlichen Tiefe wie die oberste Kollektorlage der „Wichelkoppeln“ verlegt. Durch den Betrieb kommt es, ähnlich wie beim Kühlbetrieb von Erdwärmekollektoren, zu einer Aufheizung. Im Falle der Erdkabel liegt diese Betriebstemperatur bei 50 °C, also weitaus höher als bei den Erdwärmekollektoren, bei welchen die durchströmende Sole eine maximale Temperatur von ca. 18 °C erreichen wird. Dennoch konnte an der Oberfläche nur ein geringer Temperaturanstieg von 3 bis 5 K festgestellt werden (Ahmels, Brandmeyer, Bruns, Grünert, & Voß, 2016). Durch diese Erkenntnis lässt sich feststellen, dass bei einem Betrieb der Erdwärmekollektoren sehr wahrscheinlich kaum merkliche Temperaturdifferenzen auftreten werden. Etwaige wärmebedingte Verdunstungsverluste können i. d. R. unter den in Deutschland herrschenden klimatischen Bedingungen durch Niederschlag ausgeglichen werden (Ahmels, Brandmeyer, Bruns, Grünert, & Voß, 2016). Innerhalb der humiden Klimaten, in denen sich der Standort befindet (>850 mm im langjährigen Mittel 1981 – 2010), steht der Wasserdampftransport immer hinter dem Flüssigwassertransport an. Durch ausreichende Regenfälle, nachströmendes Grund- oder Schichtwasser und schmelzendes Eis sollte genug Wasser vorhanden sein, zumal es in dieser Tiefe keine Bedeutung für Pflanzen hat. Lediglich die Effizienz der geothermischen Anlage würde durch den geringen Wassergehalt im Boden gesenkt werden. Zudem sollte die Veränderung des Temperaturunterschiedes durch das Aufheizen des Bodens infolge von Kühlprozessen anfangs noch von dem bestehenden gefrorenen Wasser ausgeglichen werden.

Sämtliche aufgezeigte Prozesse wirken sich auf die Lagerungsdichte aus. Damit verbunden ist auch eine Änderung der Porenraumzusammensetzung. Diese beiden wiederum beeinflussen aber auch direkt oder indirekt die zuvor aufgezeigten Prozesse mit Ausnahme der Einflüsse, die durch den Einbau der Anlagen entstehen. So wirkt sich beispielsweise eine erhöhte Lagerungsdichte negativ auf die Durchwurzelbarkeit, also auf das Pflanzenwachstum, aber positiv auf die Wärmeleitfähigkeit aus (Bertermann & Schwarz, 2017). Dies zeigt, wie wichtig ein ordnungsgemäßer Einbau und das Einbringen von Bettungsmaterial in Verbindung mit dem ursprünglichen Boden sind (Lehmann, 2013); (Suttner, 2013). Weiterhin sollte beachtet werden, dass die Änderungen dieser Parameter nicht nur negative oder positive Einflüsse auf ihre Umwelt haben, sondern auch den Wirkungsgrad der geothermischen Anlagen verändern können.

Bei der geplanten Nachnutzung der Flächen auf dem Gebiet der „Wichelkoppeln“ sollten sich sowohl auf die Umwelt als auch auf den Wirkungsgrad der geothermischen Anlagen keine negativen Auswirkungen ergeben. Für die Zukunft ergeben sich noch zahlreiche weitere Aspekte aus verschiedenen Forschungsbereichen. Das Projekt ErdEis II hat mit seinem langfristigen und detaillierten Monitoring, das im Anschlussvorhaben ErdEis III fortgeführt wird, eine Basis dafür geschaffen.

Der vollständige Bericht zum Einfluss der Einbringung und Vereisung eines EES auf die Umwelt ist in Anhang 6.7 zu finden.

### 2.3.2 AP 3.2 Vermeidung von Undichtigkeiten und Einfluss auf die Umwelt

Das AP 3.2 hatte sich zum Ziel gesetzt, die Vermeidung von Undichtigkeiten und im Falle einer Leckage den Einfluss des Wärmeträgermediums auf die Umwelt zu untersuchen.

#### 2.3.2.1 Untersuchung der Systemdichtheit

Zur Untersuchung der Systemdichtheit wurden in Absprache mit der Fa. Steinhäuser, welche für die Produktion und den Einbau der Kollektormodule aller Geothermieanlagen verantwortlich war, Prüfkörper mit variierenden Verbindungen und Verbindungsmöglichkeiten erstellt (vgl. Tabelle 6). Zur Untersuchung der Verbindungen wurde die TU Chemnitz beauftragt, die ein passendes Messprozedere entwarf.

**Tabelle 6: Übersicht über die verschiedenen Prüfkörper**

Bez.	Rohr	Verbindung
A1	PE-Xa	Schiebehülse
A2	PE-Xa	Schiebehülse
A3	PE-Xa	Q&E Uponor
A4	PE-Xa	Q&E Uponor
B1	PE-100 RC	Dornschw.
B2	PE-100 RC	Dornschw.
C1	PE-100 RC	Elektromuffe
C2	PE-100 RC	Elektromuffe
D1	PE-Xa	Elektromuffe
D2	PE-Xa	Elektromuffe

Für den Versuchsaufbau wurden die Prüfkörper innerhalb einer Schutzkammer in einer Klimakammer aufgestellt. Die Schutzkammer sollte verhindern, dass das Wärmeträgermedium im Falle von Undichtigkeiten die Klimakammer beschädigt. Über einen mit Glykol gefüllten Hochdruckschlauch wurde der Versuchsaufbau mit einer Gasdruckflasche mit 200 bar verbunden. Zur Regelung sowie zum Messen des aktuellen Drucks wurden ein T-Stück mit Manometer, ein Kugelhahn und ein Druckminderer dazwischengeschaltet. Für jede Variation wurden zwei Prüfkörper erstellt. Mit dem ersten Prüfkörper wurde ein Berstversuch mit einer konstanten Temperatur von 20 °C durchgeführt. Dabei wurde der Druck schrittweise bis auf maximal 40 bar erhöht. Der zweite Prüfkörper wurde in einem Drei-Phasen-Test auf seine Flexibilität getestet. In der ersten Testphase wurde der Prüfkörper mit dem darin befindlichen Glykol bei einer konstanten Temperatur von 20 °C auf den handelsüblichen Betriebsdruck von 3 bar gebracht. Phase zwei beinhaltete eine Temperaturabsenkung von 20 °C auf -10 °C bei diesem Betriebsdruck. Anschließend wurde in Phase drei bei gleichbleibender Temperatur von -10 °C der Druck bis auf 13 bar erhöht.

Bei fünf von zehn Verbindungen kam es zu Glykolaustritten. Bei zwei Verbindungen (A2 und B2) erwies sich das Rohr und nicht die Verbindung als Schwachstelle. Die Undichtigkeiten traten allerdings bei Drücken auf, welche in der Realität nicht erreicht werden. Bei den anderen drei Prüfkörpern (A1, D1, D2) konnten die Undichtigkeiten an den Verbindungen bereits im niedrigen Druckbereich festgestellt werden. Bezüglich der Ergebnisse wurde mit der Firma Rücksprache gehalten, welche die Prüfkörper hergestellt hat. Bei der Verbindung A1 wurde nicht mit einer Undichtigkeit gerechnet, da dies die gebräuchlichste Verbindung ist. Hier wurde ein Produktions- oder Materialfehler vermutet. Dies wird auch durch die Tatsache bestätigt, dass die Verbindung des zweiten Prüfkörpers dieser Variante beim Berstversuch dichtgehalten hat und lediglich das Rohr keinen höheren Druck aushielt. Bei Variante D hingegen wurde mit Undichtigkeiten gerechnet, da diese sonst nur für größere Rohrdurchmesser verwendet werden. Für diesen kleinen Rohrdurchmesser musste auf ein anderes Schälgerät zur Schweißvorbereitung zurückgegriffen werden, was die Qualität der Verbindung stark beeinflusst haben könnte.

Folgernd lässt sich für die Versuche sagen, dass es bei hochwertiger Produktion und Verbau nicht zu Undichtigkeiten kommt, auch nicht über einen längeren Zeitraum und sogar Drücke bis über 40 bar ausgehalten werden können. Hinzu kommt, dass etwaige Undichtigkeiten schon frühzeitig bei niedrigen Drücken detektiert werden konnten. Überträgt man das in die Realität, sollte es möglich sein, solche Material-/Einbaufehler bereits frühzeitig – spätestens bei der Druckprüfung – zu erkennen und zu beheben, ohne dass erneute Tiefbauarbeiten notwendig sind oder wassergefährdende Stoffe mit dem Erdreich in Kontakt kommen. Fakt ist jedoch auch, dass für eine genauere Aussage eine deutlich höhere Anzahl an Versuchskörpern nötig gewesen wäre, was aber den zeitlichen und finanziellen Rahmen dieses Arbeitspaketes überstiegen hätte.

Der vollständige Bericht der TU Chemnitz zur Prüfung der Systemdichtheit ist in Anhang 6.8 zu finden.

### 2.3.2.2 Untersuchung zum Einfluss auf die Umwelt

Zur genaueren Betrachtung des Einflusses von Leckagen auf den Bodenkörper wurde das Department Chemie und Pharmazie der FAU beauftragt. Es wurden Prüfkörper erstellt, die hinsichtlich ihrer Bodenart und dem verwendeten Wärmeträgermedium (WTM) variierten (vgl. Tabelle 7). Als WTM kamen GeoFluid® N (Fischer Spezialbaustoffe GmbH, Heilsbronn), Glysofor L (WITTIG Umweltchemie GmbH, Graftschaff), coracon® GT ECO AF-14 (Aqua-concept GmbH, Grä-feling) sowie coracon® GEKO AF-8 (Aqua-concept GmbH, Grä-feling) zum Einsatz. Die Bodenproben wiesen unterschiedliche Zusammensetzungen hinsichtlich der Korngröße auf. In einem ersten Schritt wurden die WTM und die Bodenproben getrennt voneinander analysiert. Im zweiten Schritt wurde mit der Zugabe des WTM auf die Bodenproben die Leckage simuliert. Zu den durchgeführten Analysen zur Aufarbeitung und Identifizierung mittels Gaschromatographie und Semiquantifizierung ausgewählter Substanzen mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) kam noch eine Untersuchung des Abbauverhaltens durch einen Lagertest unter verschiedenen Temperaturen sowie eine Literaturrecherche.

**Tabelle 7: Zusammensetzung der Bodenproben hinsichtlich Korngrößenverteilung, Bezeichnung des Bodentyps und zugesetztem Wärmeträgermedium**

Probe	Korngrößen			Bezeichnung	Wärmeträgermedium
	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]		
1	89,78	7,27	2,95	reiner Sand	GeoFluid® N
2	62,33	27,28	10,40	lehmiger Sand	GeoFluid® N
3	72,63	14,07	13,31	lehmiger Sand	GeoFluid® N
4	> 85	< 10	< 5	reiner Sand	Glysofor L
5	> 85	< 10	< 5	reiner Sand	coracon® GT ECO AF-14
6	> 85	< 10	< 5	reiner Sand	coracon® GEKO AF-8
7	23,04	60,04	16,92	lehmiger Schluff	GeoFluid® N
8	3,68	6,38	89,94	reiner Ton	GeoFluid® N
9	17,29	66,48	16,24	lehmiger Schluff	GeoFluid® N
10	< 1	< 34	> 65	reiner Ton	GeoFluid® N

### Ergebnisse der Literaturrecherche

Zusätzlich zu den Laboruntersuchungen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Aus dieser ergaben sich die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten in WTM üblicherweise eingesetzten Additive, ihre Eingruppierung in Wassergefährdungsklassen (WGK) bzw. Ökotoxizität sowie deren Verwendungszweck.

**Tabelle 8: Typische Additive und Zerfallsprodukte in WTM sowie deren WGK, Ökotoxizität und Verwendungszweck. (- = keine Eingruppierung in eine WGK oder Informationen zur Ökotoxizität vorhanden)**

Substanz	WGK/ggf. Ökotoxizität	Verwendungszweck
Ethylenglykol	1	Basissubstanz
Propylenglykol	1	Basissubstanz
Benzotriazol	-/persistent	Korrosionsinhibitor
Benzoessäure	1	Korrosionsinhibitor
Ethylhexansäure	1	Korrosionsinhibitor
Essigsäure	1	Zerfallsprodukt/Additiv
n-Hexansäure	1	Ggf. Tensid/Emulgator
n-Octansäure	1	Ggf. Tensid/Emulgator
n-Decansäure	1	Ggf. Tensid/Emulgator
2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol	-/-	Zerfallsprodukt
Ethylenglykolmonobenzoat	-/-	Zerfallsprodukt
1,1'-Oxydipropan-2-ol	-/-	Zerfallsprodukt
1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol	-/-	Zerfallsprodukt

Für drei der oben dargestellten Additive ergaben sich aus der Literaturrecherche ökotoxikologische Grenzwerte, welche in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt sind.

**Tabelle 9: LC50-Werte (Konzentration eines Stoffes, ab der eine Sterblichkeitsrate von 50 % der Population erreicht ist) von 2-Ethylhexansäure, Benzoessäure sowie Benzotriazol**

Substanz	LC50 für Fische oder Bakterien
2-Ethylhexansäure	43 mg/L <sup>1</sup>
Benzoessäure	9 mg/L <sup>1</sup>
Benzotriazol	65 mg/L <sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Ilieva, Morasch, & Haderlein, 2012)

### Ergebnisse der Identifizierung

Es ließ sich ein deutlicher Unterschied in der Zusammensetzung der einzelnen WTM erkennen, wobei die Anzahl der enthaltenen Substanzen stark variierte, siehe folgende Tabelle.

**Tabelle 10: Ergebnisse der Untersuchung zur Zusammensetzung der Wärmeträgermedien**

Wärmeträgermedium	Enthaltene Substanzen
GeoFluid® N	Benzoessäure, Benzotriazol, n-Decansäure, 2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol, Ethylenglykol, 2-Ethylhexansäure, n-Octansäure, Propylenglykol
Glysofor L	1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol, Benzoessäure, Benzotriazol, 1,1'-Oxydipropan-2-ol, Propylenglykol
coracon® GT ECO AF-14	6-Methyl-3-heptanon
coracon® GEKO AF-8	n-Octansäure, Ethylenglykol

### Ergebnisse der Semiquantifizierung

Für die Semiquantifizierung wurden alle Leckage-Proben (siehe Tabelle 7) herangezogen und analysiert. Dargestellt sind jeweils die höchsten Konzentrationen der jeweiligen Substanzen für das entsprechende WTM aus allen quantifizierten Proben.

**Tabelle 11: Konzentrationen der identifizierten Additive in den jeweils untersuchten Leckageproben [mg/kg Boden].** <sup>2, 3, 4, 6</sup> = Probe 2, 3, 4, 6 entsprechend Tabelle 7; <sup>1:X</sup>: GeoFluid® N wird für gewöhnlich in einem Wassermischungsverhältnis von 1:4, Glysofor L in einem Verhältnis von 1:3 eingesetzt mit X = theoretischer Wert nach Verdünnung; n.a. = nicht auswertbar

Substanz	GeoFluid® N [mg/kg] /1:4	Glysofor L [mg/kg] /1:3	coracon® GT ECO AF-14 [mg/kg]	coracon® GEKO AF-8 [mg/kg]
Ethylenglykol	4500 <sup>3</sup> /900			1400 <sup>5</sup>
Propylenglykol	300 <sup>3</sup> /60	12000 <sup>4</sup> /3000		
Benzotriazol	74 <sup>3,*</sup> /15	77 <sup>4,*</sup> /19		
Benzoesäure	1200 <sup>2,*</sup> /240*	26 <sup>4,*</sup> /7		
Ethylhexansäure	n.a.			
n-Octansäure	54 <sup>2</sup> /11			79 <sup>6</sup>
n-Decansäure	n.a.			
2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol	21 <sup>3</sup> /4			
1,1'-Oxydipropan-2-ol		7 <sup>4</sup> /2		
1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)- 2-propanol		n.a.		
6-Methyl-3-heptanon			n.a.	

\*Konzentration liegt über dem LC50 nach (Ilieva, Morasch, & Haderlein, 2012)

Die Semiquantifizierung von 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol in den mit Glysofor L versetzten Proben war nicht auswertbar, weitere Substanzen waren in diesen Proben nicht in quantitativen Mengen detektierbar.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurden die beiden Wärmeträgermedien coracon® GT ECO AF-14 und coracon® GEKO AF-8 ein weiteres Mal untersucht. Bei coracon® GEKO AF-8 konnte im Vergleich zur erstmaligen Messung kein Ethylenglykol detektiert werden, weshalb hier von einer Verunreinigung der ersten Probe ausgegangen werden muss. Im Wärmeträgermedium coracon® GT ECO AF-14 konnte jedoch laut Abgleich der Massenspektren mit der NIST-Datenbank 6-Methyl-3-heptanon entsprechend den vorherigen Ergebnissen gefunden werden. Laut Hersteller ist dieser Stoff aber kein Bestandteil des oben genannten Wärmeträgermediums.

Zur abschließenden Klärung wäre hierfür eine Identifizierung mit Referenzsubstanzen notwendig, da die Ergebnisse der NIST-Datenbank nicht immer eindeutig sind. Dies wurde im Rahmen des Projektes aber nicht weiterverfolgt.

### Ergebnisse des Abbauverhaltens

Bei der Untersuchung des Einflusses der Lagerzeit zeigten sich für die Substanzen aus WTM unterschiedliche Stabilitäten in den Bodenproben. Bei der Betrachtung der Intensitätsflächen

von 1,1'-Oxydipropen-2-ol im Verlauf der 28 Tage des Lagerversuchs konnte eine abnehmende Tendenz sowohl bei 8 °C als auch bei 20 °C festgestellt werden. Die prozentualen Abbauraten betragen 68,2 % bei 8 °C bzw. 66,8 % bei 20 °C. Es konnte somit ein Abbau von 1,1'-Oxydipropen-2-ol beobachtet werden.

Die Werte der Peakflächen von Benzotriazol schwankten während des Lagerversuchs bei 8 °C sowie bei 20 °C stark. Die prozentualen Schwankungen betragen 52,0 % bzw. 55,8 %. Dadurch ließ sich keine Aussage treffen, ob Benzotriazol innerhalb des betrachteten Zeitraums von 28 Tagen bei 8 °C bzw. 20 °C abgebaut wird.

Im Verlauf des Lagerversuchs konnte n-Octansäure nicht immer in den Proben bei Raumtemperatur detektiert werden. Die wenigen Daten reichten hier nicht aus, um eine Aussage zum potenziellen Abbau von n-Octansäure bei Raumtemperatur zu treffen. Ebenso war keine Aussage zu einem potenziellen Abbau von n-Octansäure innerhalb des betrachteten Zeitraums von 28 Tagen bei 8 °C möglich, da hierbei die Werte zu stark schwankten. Die prozentuale Schwankungsrate betrug 94,1 %.

Die Werte von 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol blieben während des Lagerversuchs bei 8 °C weitgehend konstant. Für 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol konnte damit kein Abbau innerhalb von 28 Tagen bei 8 °C gezeigt werden. Zu einem potenziellen Abbau von 1-(2-Methoxy-1-methyl-ethoxy)-2-propanol bei Raumtemperatur konnte keine Aussage getroffen werden, da die Peakflächen zu stark schwankten. Die prozentuale Schwankungsrate betrug 39,7 %.

Die Werte der Peakflächen von Benzoesäure, Ethylenglykol und Propylenglykol blieben während des Lagerversuchs bei 8 °C und bei 20 °C weitgehend konstant. Für die drei Substanzen konnte im Lagerversuch kein Abbau innerhalb von 28 Tagen bei 8 °C sowie bei 20 °C gezeigt werden.

Ein Abbau innerhalb des betrachteten Zeitraums von 28 Tagen ließ sich somit nur bei 1,1'-Oxydipropen-2-ol feststellen. Benzoesäure, Ethylenglykol, Propylenglykol und 1-(2-Methoxy-1-methyl-ethoxy)-2-propanol zeigten keine Tendenz zum Abbau. Für Benzotriazol und n-Octansäure ließ sich aufgrund schwankender Werte keine Aussage zu einem potenziellen Abbau treffen.

Durch GC-MS-Messungen wurden einige teils umweltgefährdende Substanzen aus den WTM in den Bodenproben detektiert, u.a. Benzotriazol und Benzoesäure. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Wärmeträgermedien, wobei die untersuchten ethanolbasierten WTM im Allgemeinen weniger (qualitativ sowie quantitativ) potentiell umweltgefährdende Additive enthielten als die untersuchten glykolbasierten WTM. Es zeigte sich, dass in den meisten WTM Substanzen enthalten waren, die nicht als Bestandteile des WTM angegeben waren. Meist wurde nur die Hauptkomponente der WTM vom jeweiligen Hersteller angegeben. Es konnte zudem festgestellt werden, dass sich die WTM deutlich in ihrer Zusammensetzung unterschieden. Im Modellversuch der Untersuchung der Stabilität der Stoffe im Boden konnte für den Großteil der untersuchten Substanzen kein Abbau innerhalb von 28 Tagen bei 8 °C sowie bei 20 °C beobachtet werden.

Im Modellversuch überschritten die Substanzkonzentrationen teilweise umweltrelevante Grenzwerte. So überschritten die WTM Glyosfor L sowie GeoFluid® N im Leckageversuch teils die durch

die Literaturrecherche ermittelten kritischen Ökotoxizitätswerte für die Substanzen Benzotriazol sowie Benzoessäure.

Die Frage, ob die ermittelten Konzentrationen der Substanzen im Boden zu einer Umweltgefährdung führen können, kann jedoch noch nicht abschließend beantwortet werden. Dargestellt wurde ein Szenario einer massiven Leckage: 150 ml WTM auf 290 g Bodenprobe bei Ablauf des Überschusses. Durch Mikroorganismen, Pflanzen, Unterspülung durch Regen oder Versickerungsszenarien (Ahuja & Ross, 1983) (Conde-Avila, et al., 2020) (Reis & Sakakibara, 2012)) könnte es im Gelände zu einem vermehrten Abbau bzw. zu einer stärkeren Verteilung der Substanzen kommen. Solche Effekte könnten die Einflüsse einer Leckage auf die Umwelt wesentlich beeinflussen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht einerseits zur ökotoxischen Wirkung und zum Wassergefährdungspotential einiger Stoffe, die in WTM zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sollten nicht nur die Auswirkungen der einzelnen Stoffe auf die Umwelt untersucht werden, sondern ebenso die Auswirkungen der gesamten WTM näher betrachtet werden. Eine exakte Quantifizierung der potenziell wassergefährdenden flüchtigen sowie nicht-flüchtigen Substanzen ist ebenfalls ausstehend, um präzisere Aussagen zum realen Umweltgefährdungspotenzial zu treffen. Um die nicht-flüchtigen Substanzen zu charakterisieren, fanden im Rahmen dieses Projektes bereits erste Messungen mittels Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie statt. Es wurden bis zu 49 potenzielle Substanzen (Masse/Ladungs-Verhältnisse ( $m/z$ )) in den einzelnen Probenextrakten gefunden. Eine genaue Zuordnung bzw. tiefergehende Auswertung der  $m/z$ -Verhältnisse war im Zuge der Studie nicht möglich. Die Ergebnisse legen jedoch nahe, dass hier möglicherweise noch weitere Erkenntnisse erhalten werden könnten. Eine möglichst realistische Probenahme sowie Simulationen zum Versickerungsverhalten der Substanzen werden ebenfalls eine wichtige Rolle bei zukünftigen Studien in diesem Bereich spielen.

Der vollständige Abschlussbericht zum Einfluss von Leckagen auf die Umwelt ist in Anhang 6.6 zu finden.

Das Arbeitspaket konnte mit seinen durchgeführten Versuchen und Analysen nicht nur wichtige Erkenntnisse liefern, sondern zeigte auch weitere Ansatzpunkte für weitere mögliche Forschungsvorhaben, deren Hauptaugenmerk sich explizit auf diese Fragestellungen beziehen könnte. Dadurch wäre es im Falle der Systemdichtheitsprüfungen empfehlenswert, beispielsweise eine höhere Prüfkörperzahl und somit auch eine höhere Aussagekraft zu erzielen. Bei den Leckageversuchen bieten sich beispielsweise weitere Analysen der detektierten Stoffe an. Weiterhin sollten Abbauversuche unter realen Bedingungen mit dem Einfluss von Mikroorganismen, Pflanzen, Unterspülung durch Regen und Versickerung durchgeführt werden.

### **2.3.3 AP 3.3 Erarbeitung von Abrechnungsmodellen**

Die SSW nutzen für das Abrechnungsmodell für das Baugebiet „An den Wichelkoppeln“ ihre Erfahrungen aus zuvor gebauten KNW-Netzen. Jeder Anschlussnehmer zahlt einmalig den Baukostenzuschuss, der den Anteil der Baukosten für das KNW-Netz abdeckt, die Hausanschlusskosten sowie die Kosten für die Wärmepumpenanlage.



Die SSW bietet den zukünftigen Eigentümern des Baugebietes zwei Wärmepumpenpakete an, um sich an das KNW-Netz anzuschließen. Das Paket I beinhaltet eine Sole-Wasser-Wärmepumpe für Einfamilienhäuser mit einem integrierten 170 Liter Edelstahl-Warmwasserspeicher. Die Heizleistung liegt bei 5,6 kW. Das Paket II beinhaltet eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einem zusätzlichen Speicher. Dieser Speicher hat zwei Kammern. In der einen Kammer befindet sich das Brauchwasser mit einem Speichervolumen von 205 Litern. In der zweiten Kammer befindet sich das Heizungswasser mit einem Speichervolumen von 71 Litern. Die Heizleistung liegt bei 4,8 kW. Die SSW verfolgen mit dem Paket II das Ziel, dass der Kunde seinen eigenen PV-Strom für die Wärmeerzeugung nutzen kann. Hierfür wird ein Heizstab in den Brauchwasserspeicher eingebaut. Der PV-Strom kann direkt für die Brauchwassererwärmung genutzt oder in dezentralen Batteriespeichern zwischengespeichert werden. Die privaten Haushalte erhalten mit diesem Paket die Möglichkeit, ihren eigenen Strom zu Wärme umzuwandeln (Power-to-Heat). Die SSW bieten hierfür optional zu den Wärmepumpen-Paketen noch eine PV-Anlage mit Batteriespeicher an.

Am Jahresende wird die Jahresverbrauchsrechnung gestellt, die den Arbeitspreis für die abgenommene Wärmemenge (Strompreis inklusive), den Grundpreis für die Nutzung der KNW und für die Wärmebereitstellung sowie den Servicepreis für die Wartung enthält. Dem Arbeitspreis liegt ein Kostenelement, der Strompreis-Index, und ein Marktelement, Wärmepreis-Index, zu Grunde. Dem Grundpreis sowie dem Servicepreis für die Wartung liegen jeweils ein Lohn-Index (Ausgangswert und Folgewert) sowie ein Güter-Index (Ausgangswert und Folgewert) zu Grunde. Es erfolgt eine jährliche Anpassung des Arbeitspreises, des Grundpreises und des Servicepreises über die Preisgleitklauseln. Die Indexwerte werden monatlich vom Statistischen Bundesamt ermittelt und sind von allen Anschlussnehmern einsehbar. Die Anschlussnehmer müssen zusätzlich noch die einmaligen Kosten für den Hausanschluss sowie für die Wärmepumpe an die SSW entrichten. Die Nutzung der Naturkühlung im Sommer ist kostenfrei.

Im Baugebiet wird momentan somit ein transparentes Abrechnungsmodell verwendet, das den Bewohnern zusätzlich die Möglichkeit gibt, den selbst produzierten Strom über eine Sektorkopplung direkt für den eigenen Wärmebedarf zu nutzen.

Da die direkte Abrechnung von Quellwärme bis auf Weiteres noch nicht möglich ist (siehe Kapitel 2.4.2), konnte in diese Richtung kein Geschäftsmodell entwickelt werden.

Im Anschlussvorhaben ErdEis III soll ein sogenanntes District Energy Management System umgesetzt werden. Das DEMS soll neben den Wärmepumpen auch Wallboxen, PV-Anlagen, Wärmespeicher und die Erdwärmekollektoren steuern und optimieren. Daraus ergeben sich verschiedenste Möglichkeiten und Notwendigkeiten bezüglich der Abrechnungsmodelle. Da momentan noch nicht abgeschätzt werden kann, in welchem Umfang und Form dies stattfinden wird, kann das Thema neuer Abrechnungsmodelle erst in ErdEis III weiterführend adressiert werden. Dort sollen die bisher ange-dachten Abrechnungsmodelle weiterentwickelt und an die Wirkweise des DEMS angepasst werden.

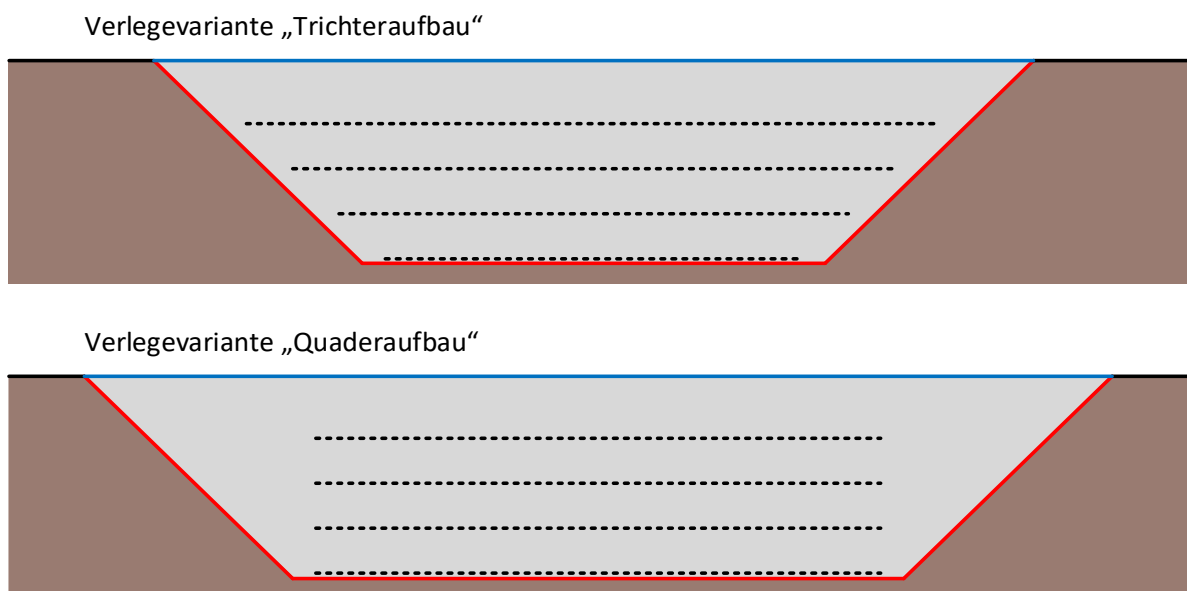
## 2.4 AP 4 Komponentenentwicklung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten Komponenten neu bzw. weiterentwickelt werden, die für den Betrieb eines KNW-Netzes relevant sind. So sollte für die Montage des EES ein effizientes System entwickelt werden und neuartige Wärmemengenzähler konzipiert werden, die die Abrechnung der Quellwärme vor der Wärmepumpe ermöglichen. Darüber hinaus sollte mit der MSR die Grundlage für ein smartes Quartier geschaffen und in Zusammenarbeit mit Herstellern intelligente Wärmepumpen entwickelt werden.

### 2.4.1 AP 4.1 Montagesystem für Erdeisspeicher

Das modulare Kollektorsystem der Fa. Steinhäuser ermöglicht bereits eine schnelle und effiziente Montage der Kollektorfelder, weshalb sich in diesem Arbeitspaket auf die Anordnung der Kollektorebenen fokussiert wurde.

Bei den EES fiel die Entscheidung auf eine trichterförmige Verlegeweise, bei welcher die Größe der Kollektorebenen von oben nach unten abnimmt. Die Verkleinerung richtet sich dabei nach dem Böschungswinkel, der in diesem Fall  $45^\circ$  entspricht. Grund für diese Entscheidung sind die daraus resultierenden, reduzierten Erdarbeiten, welche mit einer angepassten Verlegung der Erdwärmekollektoren an die Abböschung eingespart werden können. Die Berechnungen zeigen, dass im Vergleich zu einer quaderförmigen Verlegung von vier gleich großen Ebenen ca. 27 % weniger Erdreichvolumen ausgehoben werden müssen. Beide Varianten sind schematisch in Abbildung 37 dargestellt, dabei entspricht das Volumen der Baugrube der grau markierten Fläche, die Oberfläche der Grube der roten Linie und die Fläche an der Geländeoberkante der blauen Linie.



**Abbildung 37: Verlegevarianten "Trichteraufbau" und "Quaderaufbau"**

Die Ergebnisse des Vergleiches sind in Tabelle 12 aufgelistet. Es wurde davon ausgegangen, dass bei beiden Varianten der Böschungswinkel  $45^\circ$ , der Abstand zwischen Kollektor und Abböschung 0,50 m, der vertikale Abstand zwischen die vier Ebenen jeweils 1,00 m und die Überdeckung der obersten Ebene 1,50 m beträgt. Die Ebenen sind jeweils quadratisch und weisen in beiden Varianten eine Gesamtfläche von  $1.000 \text{ m}^2$  auf.

**Tabelle 12: Vergleich unterschiedlicher Verlegevarianten (jeweils  $1.000 \text{ m}^2$  Kollektorfläche)**

Vergleichsgröße	Verlegevariante „Quaderaufbau“	Verlegevariante „Trichteraufbau“	Veränderung
Volumen Baugrube	$2.074 \text{ m}^3$	$1.513 \text{ m}^3$	- 27 %
Oberfläche Grube	$825 \text{ m}^2$	$649 \text{ m}^2$	- 21 %
Fläche an Geländeoberkante	$666 \text{ m}^2$	$513 \text{ m}^2$	- 23 %
Fläche oberste Kollektorebene	$250 \text{ m}^2$	$348 \text{ m}^2$	+ 39 %

Bei einem mehrlagigen Kollektorsystem werden die oberen beiden Ebenen im Sommer relativ gut von Seiten der Erdoberfläche regeneriert. Die unteren beiden Ebenen sind von der Einwirkung des Außenklimas größtenteils abgeschirmt und regenerieren nur langsam durch die Wärmeströme des umliegenden Erdreichs. Im Sommer ist eine aktive Regeneration vonnöten, damit die unteren Kollektoralagen nicht permanent eingefroren sind. Durch diesen Effekt besitzt der EES ein hohes Kältepotenzial, welches bis in den späten Sommer zum Kühlen der angeschlossenen Wohneinheiten genutzt werden kann.

Bei der Trichtervariante befindet sich ein größerer Anteil der Kollektorfläche in den oberen beiden Ebenen. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass dadurch die gesamte entziehbare Wärmemenge steigt und der EES somit verstärkt als Wärmequelle genutzt werden kann.

Bei der Quadervariante sind die Flächen gleichmäßig auf alle vier Ebenen verteilt. Dadurch ist der Anteil der Kollektorfläche in den unteren beiden Ebenen höher als bei der Trichtervariante. Somit steigt das Kältepotential bzw. der aktive Regenerationsbedarf in den unteren beiden Ebenen. Dementsprechend kann bei dieser Variante der EES verstärkt als Wärmespeicher genutzt werden.

Ein weiterer Vorteil der Trichtervariante ist die um 21 % kleinere Oberfläche der Grube, wodurch die Kosten einer möglichen Bentonitaukleidung der Baugrube ungefähr im selben Maß verringert werden kann. Zusätzlich ist die Fläche an der Geländeoberkante geringer, wodurch eine größere Fläche des Erdbodens ungestört belassen werden kann bzw. nicht umgegraben werden muss. Einziger Nachteil ist die größere Fläche der obersten Kollektorebene, die ggf. nicht überbaut werden kann.

Mit ausreichend zur Verfügung stehender Fläche ist somit der Trichteraufbau zu empfehlen, da zum einen Investitionskosten gespart werden und zum anderen die entziehbare Wärmemenge aufgrund der größeren oberen Ebenen und deren besseren Regeneration größer ist. Besteht im Sommer jedoch ein großer Kühlbedarf, kann der Quaderaufbau von Vorteil sein.

## 2.4.2 AP 4.2 Zähler zur Abrechnung des Wärmebezuges

Wärmeversorger von KNW-Netzen stehen bisher vor dem Problem, dass es keine geeichten Wärmemengenzähler (WMZ) für Wasser-Glykol-Gemische gibt, die zur Abrechnung von Wärmemengen verwendet werden dürfen. Es gibt zwar Zählern, die für Stoff-Gemische unter genauer Angabe des Frostschutzmittels und der Konzentration kalibriert sind. Da sich in KNW-Netzen das Mischungsverhältnis möglicherweise mit der Zeit verändert und Wärmeabrechnungen ohnehin nur mit MID-zertifizierten (Measuring Instruments Directive) WMZ durchgeführt werden dürfen, gibt es dafür noch keine passenden WMZ.

Aus diesem Grund kann die Wärme bisher nur ab der Wärmepumpe verkauft werden, da ab dort Wasser als Wärmeträgermedium verwendet wird, für das es abrechnungsfähige WMZ gibt. Da viele Hausbesitzer den Betrieb ihrer Wärmepumpenanlagen eigenverantwortlich ausführen möchten, wäre es ein großer Fortschritt, mit neuartigen Wärmezählersystem die Quellwärme bereits vor der Wärmepumpe abrechnen zu können. Aus diesem Grund sollte in diesem Arbeitspaket ein WMZ entwickelt werden, mit dem Wasser-Glykol-Gemische abgerechnet werden können.

Um solche Zähler zu entwickeln, wurden mit der Fa. iPLON Solutions GmbH verschiedene Lösungsansätze konzipiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Recherche und die Lösungsansätze wiedergegeben.

### Lösungen am Markt

Bei gängigen WMZ ist eine Kalibrierkurve in Abhängigkeit der Medientemperatur für genau ein Wärmeträgermedium hinterlegt. In der Standardausführung handelt es sich dabei meist um Wasser, für welches auch geeichte WMZ mit MID-Zertifikat erhältlich sind. Durch das MID-Zertifikat können WMZ zur Abrechnung von Energiekosten eingesetzt werden.

WMZ, die für Stoffgemische kalibriert sind, können unter genauer Angabe der Konzentration und des Frostschutzmittelherstellers bestellt werden.

Die Fa. Sontex Deutschland GmbH schreibt hierzu:

*Anwendungen mit einer anderen Flüssigkeit als Wasser (z. B. Kühlmittel auf Basis von Ethylen- oder PropylenGlykol, Salzen R134a) sind nicht zulassungsfähig und mögliche zukünftige Zulassungen sind nach wie vor in weiter Ferne. Die Behörden, die die Wärmezähler (z.B. MID benannte Stellen) zulassen, können keine Zulassungen dieser Art ausstellen, da der tatsächliche Volumenanteil in einem System nicht eine garantierte Größe ist (d.h. nicht ständig gemessen wird). Die Verwendung von anderen Flüssigkeiten als Wasser hat einen großen Einfluss auf mehrere messtechnischen Aspekte des Wärme- und Kältezählers. Der Durchflusssensor und das Rechenwerk sind beteiligt. Viele dieser Einflüsse sind nicht eindeutig definiert. Volumenanteile werden nicht in Echtzeit kontinuierlich gemessen und korrekte Kalibrieranlagen sind selten. Das bedeutet der richtige Ansatz für eine korrekte Messung hängt vom Engagement und Know-How des Herstellers ab (Glykol ist nicht einfach nur Glykol!)*

Um Kalibrierkurven zu erstellen, braucht es laut Sontex folgende Parameter, jeweils als Funktion von Temperatur und Konzentration:

- Dichte in  $\text{kg/m}^3$ ,
- spezifische Wärmekapazität in  $\text{J/kg/K}$
- kinematische Viskosität in  $\text{m}^2/\text{s}$

Am Markt gibt es jedoch bereits Durchflussmesser, die den Einfluss der Viskosität auf die Volumenströmmessung durch Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit automatisch korrigieren.

### Messverfahren

In einem offenen Gefäß ist eine direkte Messung der Dichte mit dem Aräometer, Pyknometer oder anderen Schwimmkörperverfahren nach dem Auftriebsprinzip möglich. Im Durchflussverfahren sind Resonanzmessungen an Kapillaren geeignet.

Die spezifische Wärmekapazität kann durch gezielte Erwärmung und Messung der Abkühlung ermittelt werden. Dafür gibt es bereits kommerzielle Labor-Messinstrumente. Eine Realisierung dieser Messungen in einem haushaltsgängigen WMZ ist kostentechnisch allerdings eher unrealistisch.

Im konkreten Anwendungsfall, bei dem Viskosität, Dichte und Wärmekapazität sich in Abhängigkeit der Temperatur und Frostschutzmittelkonzentration ändern, wäre es ebenfalls denkbar, lediglich die Konzentration zu ermitteln bzw. aus leichter messbaren Größen abzuleiten. In einem mehrdimensionalen Datenfeld könnte für alle in Frage kommenden Werte von Temperatur und Konzentration ein Korrekturterm für  $\dot{V}_{\text{korrr}} \cdot \rho \cdot c_p$  als Funktion der Konzentration und Temperatur abgelegt werden. Die Konzentration könnte dabei durch Messung der Dichte, des Brechungsindex, der Schallgeschwindigkeit oder evtl. auch des elektrischen Leitwerts indirekt abgeleitet werden. Die Temperatur wird ohnehin vor Ort gemessen.

Da sich die Konzentration des Frostschutzmittels im System nicht sehr schnell ändert und im ganzen Kreislauf prinzipiell einheitlich sein sollte, könnte auch in Betracht gezogen werden, die Konzentration zentral manuell oder automatisch zu ermitteln und über eine evtl. bereits vorhandene Zähler-Vernetzungs-Infrastruktur zu verteilen.

### Lösungsansätze

#### 1 - komplett lokal & Kennlinienfeld

- Vor Ort Messung: Volumenstrom unkorrigiert, Temperatur, Temperaturdifferenz, Konzentration (über Schallgeschwindigkeit, Leitwert, Brechungsindex, ...)
- Korrektur über Kennlinienfeld
- Durchführung der Integration und Anzeige Zählerstand vor Ort

#### 2 - vernetzte Lösung 1:

- Vor Ort Messung: Volumenstrom unkorrigiert, Temperatur, Temperaturdifferenz
- Zentrale Messung der Dichte, spez. Wärmekapazität und Viskosität
- Zyklische Verteilung der Korrekturfaktoren an die WMZ
- Durchführung der Integration und Anzeige Zählerstand vor Ort

### 3 - vernetzte Lösung 2:

- Vor Ort Messung: Volumenstrom viskositäts-korrigiert, Temperatur, Temperaturdifferenz
- Zentrale Messung der Dichte und spez. Wärmekapazität
- Zyklische Verteilung der Korrekturfaktoren an die WMZ
- Durchführung der Integration und Anzeige Zählerstand vor Ort

### 4 - zentralisierte Lösung:

- Vor Ort Erfassung der Rohwerte eines üblichen Wärmezählers: Volumenstrom unkorrigiert, Temperatur, Temperaturdifferenz
- Zentrale Messung der Dichte, spez. Wärmekapazität und Viskosität
- Zentrale Integration und Korrektur

### **MID-Zertifizierbarkeit der verschiedenen Lösungsansätze**

Bei einem vorgesehenen Einsatz entsprechend dem Messstellenbetriebsgesetz bzw. zu Abrechnungszwecken wäre ein frühzeitiger Kontakt mit einschlägig erfahrenen Zählerherstellern und Zertifizierungsstellen sinnvoll, um bereits im Vorfeld die Vereinbarkeit der verschiedenen Lösungswege mit den gesetzlichen Vorgaben abzuschätzen.

– Ende der Ergebnisse von iPLON Solutions –

Da sowohl die Entwicklung eines Prototyps sowie die Entwicklung eines MID-zertifizierbaren WMZ den Zeit- und Kostenumfang des Arbeitspaketes weit überschreiten, wird diese Entwicklung in einem anderen Projekt weiterverfolgt.

Das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)-Kooperationsnetzwerk „Oberflächennahste Geothermie und Kalte Nahwärme 4.0“ wird von der FAU koordiniert und bietet mit seinen Netzwerkpartnern die optimale Plattform für solch eine Entwicklung. Durch die FAU als Schnittstelle zwischen ErdEis II und dem ZIM-Netzwerk ist ein optimaler Informationsaustausch gewährleistet. Die Entwicklung eines MID-zertifizierbaren WMZ soll in Form eines ZIM-Projektes mit der Fa. iPLON Solutions weiter vorangetrieben werden.

Die Überlegung, einen Prototypen in ErdEis II umzusetzen, wurde verworfen, da dies die Förderfähigkeit des ZIM-Projektes gefährden würde.

### **2.4.3 AP 4.3 MSR für ein smartes Quartier**

Im Baugebiet wurde eine Dateninfrastruktur errichtet, in der die Daten aus dem Erdreich, den Schächten der Geothermieanlagen, der Wetterstation, der Energiezentrale und den Wärmepumpenanlagen zusammengetragen und in einer Datenbank gespeichert werden. In den Häusern wird zukünftig mit dem „Leaflet“ der Fa. Consolinno Energy GmbH eine zentrale Steuerbox zur intelligenten Regelung der Energieflüsse installiert. Zusammen mit der Verlegung von Glasfaser wurde die Grundlage für die MSR des smarten Quartiers in Echtzeit geschaffen und somit das anvisierte Ziel erreicht.

Im Forschungsprojekt ErdEis III soll auf Basis der geschaffenen Infrastruktur ein District Energy Management System entwickelt werden. Hierfür soll eine übergeordnete Steuerungs- und

Optimierungsstrategie geschaffen werden, welche alle statischen und flexiblen Komponenten (Wärmequellen, Wärmepumpen, PV-Anlagen, E-Mobilität, Stromverbraucher) des Quartiers identifiziert und berücksichtigt. Ziel ist es, die Anwendung des DEMS im Baugebiet zu erproben und die Bedingungen zur Anwendung in anderen Baugebieten zu verbessern.

#### **2.4.4 AP 4.4 Wärmepumpen mit übergeordneter selbstlernender Regelung**

In diesem Arbeitspaket sollte untersucht werden, inwieweit Wärmepumpen die Temperaturregelung des Gebäudes eigenständig übernehmen können. Ziel ist die Steuerung des automatischen hydraulischen Abgleichs. Die Wärmepumpe soll das Nutzerverhalten lernen und dementsprechend intelligent Warmwasser vorhalten können. Daraus sollen sowohl ein Komfortgewinn sowie Einsparungen im Energieverbrauch resultieren. Darüber hinaus kann der Einfluss des Einzelgebäudes auf das Gesamtsystem reduziert werden.

Im Forschungsvorhaben wurde Kontakt zu Herstellern von Wärmepumpen aufgenommen und Möglichkeiten für eine gemeinsame Weiterentwicklung der Wärmepumpen hinsichtlich einer künstlichen Intelligenz für eine eigenständige Regelung der Raumtemperatur oder das Erlernen des Nutzerverhaltens besprochen. Wirkliche Fortschritte konnten hier jedoch leider nicht erzielt werden. Im Zuge der Zusammenarbeit bei der Datenbank mit der Fa. Consolinno Energy GmbH kam die Idee auf, ein sogenanntes „District Energy Management System“ für das gesamte Quartier zu entwickeln. Dazu werden die Gebäude mit entsprechender MSR-Technik ausgestattet und eine übergeordnete Steuerung installiert.

Das DEMS soll dabei neben den Wärmepumpen auch Wallboxen, PV-Anlagen, Wärmespeicher und die Erdwärmekollektoren steuern und optimieren. Unterstützt wird das DEMS durch die Prädiktion von transienten Bedarfsdaten, die ebenfalls entwickelt werden sollen.

So könnte in Zukunft das gesamte Quartier intelligent und automatisch gesteuert und dabei hinsichtlich der Nutzung der Wärmequellen, der Betriebskosten und der Belastung des Stromnetzes optimiert werden.

Da zum Ende des Forschungsvorhabens nur die Wärmepumpe der Feuerwehrrache an das KNW-Netz angeschlossen ist und der Bau der Einfamilienhäuser voraussichtlich erst im Frühjahr 2023 Fahrt aufnimmt, konnte mit dem Aufbau des DEMS noch nicht begonnen werden.

Das AP 4.4 soll deshalb in das weiterführende Forschungsvorhaben ErdEis III aufgenommen werden. Im Projektantrag ist die Umsetzung des oben beschriebenen DEMS festgesetzt und entsprechende Finanzmittel für eine adäquate Umsetzung garantiert.

## 2.5 AP 5 Projektkoordination und Wissenstransfer

Im Folgenden wird die Projektkoordination und der Wissenstransfer näher beschrieben. Beim Wissenstransfer wurde das Ziel festgelegt, die Erkenntnisse aus der Umsetzung und des ersten Betriebs des EES in Form eines praxistauglichen Auslegungstools für EES der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

### 2.5.1 AP 5.1 Projektkoordination

Die Projektkoordination wurde aufgrund der Komplexität des Forschungsprojektes in eine technische und wissenschaftliche Koordination unterteilt. Die technische Projektkoordination erfolgte aufgrund der örtlichen Gegebenheiten durch die SSW. Die wissenschaftliche Koordination erfolgte durch die EPC, die als Bindeglied zwischen Forschung und Praxis fungiert.

Die EPC koordinierte die Zusammenarbeit im Forschungsvorhaben. So wurde die Erstellung des Kooperationsvertrages, die gemeinsamen Zwischenberichte, der monatliche Jour Fixe, die halbjährlichen Treffen sowie die Erstellung des Abschlussberichts koordiniert. Des Weiteren wurde auf der von den SSW bereitgestellten ownCloud-Lösung eine gemeinsame Ordnerstruktur für die Projektbearbeitung erstellt. Die EPC hielt engen Kontakt zu allen Projektpartnern und fungierte als Informationsvermittler zwischen den Partnern und den einzelnen Arbeitspaketen. Beim letzten Projekttreffen wurde zudem ein Abschlussworkshop durchgeführt, bei dem das Forschungsvorhabens bewertet wurden. Dabei wurden Lessons learned erarbeitet sowie besprochen, welche Dinge im folgenden Projekt ErdEis III besser gemacht oder beibehalten werden sollen. Besonders der Jour Fixe und die halbjährlichen Treffen wurden als sehr wertvoll eingestuft und die Wichtigkeit einer organisatorischen Projektkoordination hervorgehoben. Verbesserungspotenzial wurde besonders darin gesehen, dass alle Projektpartner über die komplette Laufzeit am Projekt beteiligt sind sowie eine klarere Definierung der Zuständigkeit der Arbeiten. Die Gesamtzufriedenheit aller Partner war auf der Skala beim Maximum.

Die SSW begleiten kontinuierlich die Entwicklung des finalen Bebauungsplans für das Neubaugebiet und die Planung der Feuerwehrezentrale unter Berücksichtigung der Anforderungen für das Forschungsvorhaben (Grünflächen, RRB etc.). Die für dieses Forschungsvorhaben relevanten Unterlagen und Planungsstände des Baugebiets wurden mit den Forschungspartnern kontinuierlich ausgetauscht. Für einen praktikablen und schnellen Datenaustausch haben die SSW eine ownCloud-Lösung bereitgestellt.

Neben den aktuellen Entwicklungsständen des Bebauungsplans für das Neubaugebiet und die Planung der Feuerwehrezentrale haben die SSW auch die Zeitpläne bezüglich der Ausschreibungen für die Tiefbauarbeiten etc. den Projektpartnern kommuniziert. Die Erstellung und Veröffentlichung der Tiefbauausschreibung verzögerte sich auf Anfang April 2020. Aufgrund der Verzögerungen in den Genehmigungsverfahren seitens der Stadt Schleswig mit dem Kreis Schleswig-Flensburg und dem Wasser- und Bodenverband hat sich der Beginn der Erschließungsarbeiten um 12 Monate verzögert.



In der Ausschreibung der Gesamtmaßnahme wurden neben den Tiefbauarbeiten für das Rohrnetz auch die Arbeiten für EES und die GKA ausgeschrieben. Mitte Juni 2020 kam es dann nach der erfolgreichen Submission, einer umfangreichen Angebotsprüfung und der Annahme des Vergabevorschlags zur Auftragserteilung des Tiefbauers. Das Konzept der KNW, das Ziel des Forschungsvorhabens und die genauen Pläne für den Einbau der EES und GKA sind mit dem Tiefbauer bei einem gemeinsamen Auftakttermin besprochen worden. Der Tiefbauer hat mit der Erschließung des Baugebiets im August 2020 begonnen. Die Umsetzung des EES und der GKA unter der grünen Wiese erfolgte noch im Jahr 2020. Bei der Erschließung des Baugeländes sind aufgrund der Mülllast, der Gesteinsbrocken sowie der Witterung Verzögerungen im Baufortschritt aufgetreten. Der Einbau des EES und der GKA unter dem großen RRB erfolgte im Sommer 2021. Die technische Fertigstellung des Wärmenetzes konnte Ende November 2021 erreicht werden.

Um die Ergebnisse von ErdEis II zu teilen, wurde unter Leitung der EPC ein Prototyp einer Website entwickelt. Dieser Prototyp wird bis Frühjahr 2023 von der Marketing-Abteilung der SSW umgesetzt und auf der Website der SSW eingebettet. In den nächsten Jahren wird die Website mit Ergebnissen von ErdEis III weiter ausgebaut. Sie bittet um einen der Allgemeinheit die Chance, sich über das Projekt zu informieren. Aus diesem Grund werden technische Inhalte in verständlicher Form erläutert. Zum anderen können Wissenschaftler Zugriff auf Ergebnisse der Forschungsvorhaben erhalten.

## **2.5.2 AP 5.2 Praxistaugliches Auslegungstool für Erdeisspeicher**

### **2.5.2.1 Ausgangssituation**

Das Auslegungstool verfolgt das Ziel, eine vereinfachte Vorbemessung des Systems durchzuführen. Die anvisierte Zielgruppe des Tools sind Energieplaner und fachkundige Entscheider/-innen von Kommunen, Versorgungsunternehmen oder Planungsfirmen, die Projekte der oberflächennahen Geothermie bearbeiten. Wesentlich für diesen Abnehmerkreis ist die schnelle und möglichst einfache Beurteilung der Eignung und sinnvollen Verwendung eines EES. Das Auslegungstool soll helfen, die grundsätzlichen Wärme- und Kälteversorgungspotenziale eines EES im Anfangsstadium geplanter Projekte zeitsparend abschätzen können.

Mit den SSW ist ein Partner im Konsortium, der als später anvisierte Zielgruppe auftritt. Nach eigener Erfahrung der SSW sind die erforderliche Kollektorfläche der einzelnen Ebenen und der Druckverlust relevante Größen, welche als Ergebnis des Auslegungstools hervorgehen sollen.

Da die Höhe des Druckverlusts nicht pauschal, sondern aufgrund individueller Planung erst in einem späteren Projektverlauf ermittelt werden kann, wurde der Fokus auf die erforderliche Kollektorfläche gelegt. Dafür soll der Anwender eine Maske öffnen und die Kennwerte seines geplanten Versorgungsgebiets, wie beispielsweise die zur Verfügung stehende Fläche, eingeben. Anschließend erhält der Nutzer die mögliche Quellwärmemenge, welche mittels eines EES bereitgestellt werden kann.

Für diese Anforderungen kommen zwei Konzepte in Frage:

- a) Verwendung eines Simulationsprogrammes, bei dem die Eingabedaten auf wenige mögliche Parameter eingeschränkt werden. Die Einschränkung ist notwendig, um die Einarbeitungszeit gering zu halten und zu gewährleisten, dass die Eingabeparameter in einem technisch sinnvollen und numerisch zuverlässigen Bereich liegen.
- b) Festlegung definierter Bereiche für Geometrie, Wärme- und Kältelasten, Klimata und Materialkennwerte. Damit werden Simulationen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabellen- oder Datenbankform gespeichert und vom Nutzer abgerufen werden können.

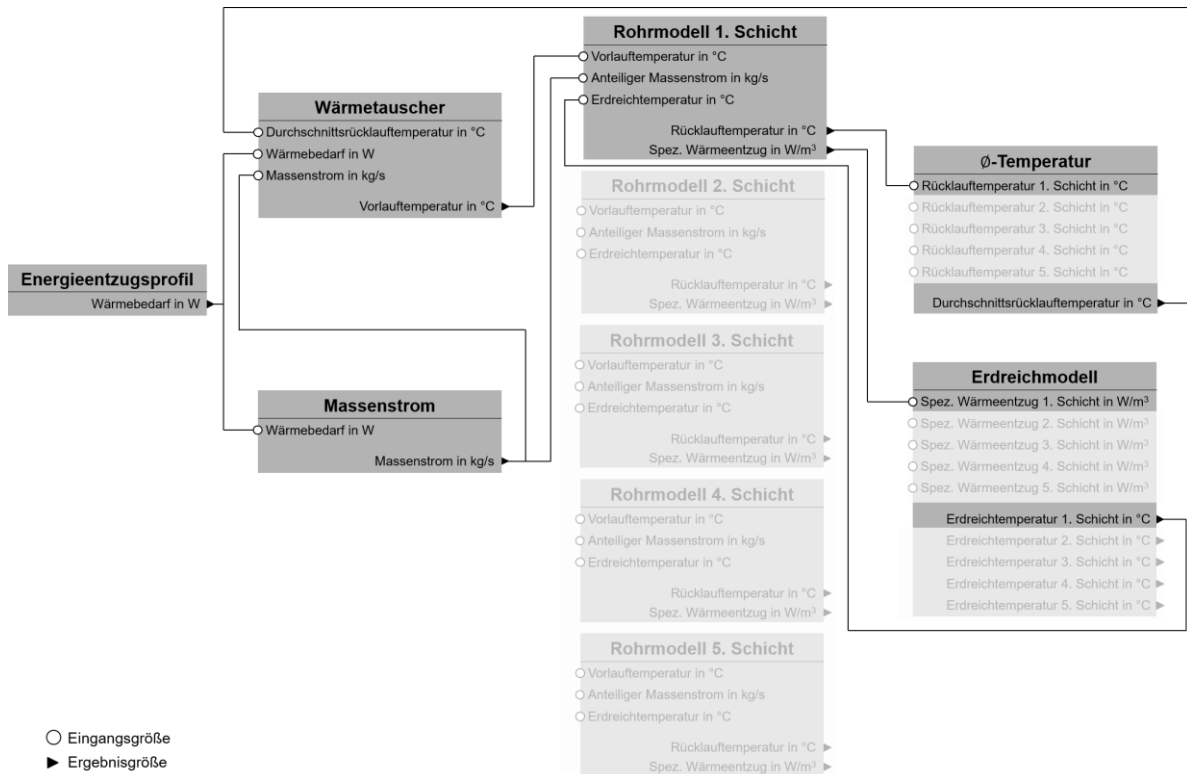
Als wesentlich und für das Projektziel ausschlaggebend wird die einfache Benutzbarkeit und die schnelle Bearbeitungszeit angesehen. Daher wird Variante b), also die Vorberechnung ausgewählter Fälle, im weiteren Projektverlauf verfolgt. Ausgehend von einer Basisvariante werden Parameter variiert und die Berechnungsergebnisse in Form einer großen Datenbank aller möglichen Varianten abgelegt. Um die bereitstellbare Quellwärme zu ermitteln, soll der spezifische Energieentzug vom Erdkörper in kWh/(m<sup>2</sup>a) ermittelt werden. Durch die Ausgabe des spezifischen Werts kann im Tool die bereitgestellte Quellwärmemenge mit der Eingabe der EES-Größe durch den Anwender bestimmt werden.

Durch die Auswahl der Variante b) mussten für das Auslegungstool diverse Simulationen von verschiedenen EES-Varianten durchgeführt werden.

#### 2.5.2.2 Simulationssoftware

Um die realen Bedingungen eines EES besser abbilden zu können, kommt die Co-Simulations-Software MasterSim, welche die hygrothermische Simulations-Software DELPHIN integrieren kann, zum Einsatz (siehe auch Kapitel 2.1.1.5). Mithilfe von MasterSim kann ein komplexes System aus einzelnen Bausteinen aufgebaut und als Gesamtsystem berechnet werden. Jeder Baustein, die FMUs, sind eigene Teilmodelle, welche komplexe dynamische Simulationen mit eigenen numerischen Lösungsverfahren oder analytische Lösungen darstellen. In einem Intervall ermittelt jede FMU aus den Eingangs- die Ergebnisgrößen für den nächsten Zeitschritt. Anschließend regelt MasterSim den Austausch der Ergebnisgrößen unter den FMUs und es folgt erneut die Berechnung der Ergebnisgrößen der einzelnen FMUs.

Der EES wurde für die Simulation in einzelne Teilmodelle aufgeteilt. In Abbildung 38 ist der grundlegende Simulationsaufbau des EES in MasterSim zu sehen.



**Abbildung 38: Schematische Übersicht der FMU-Bausteine in MasterSim mit Fokus der Kopplung der 1. Kollektorebene**

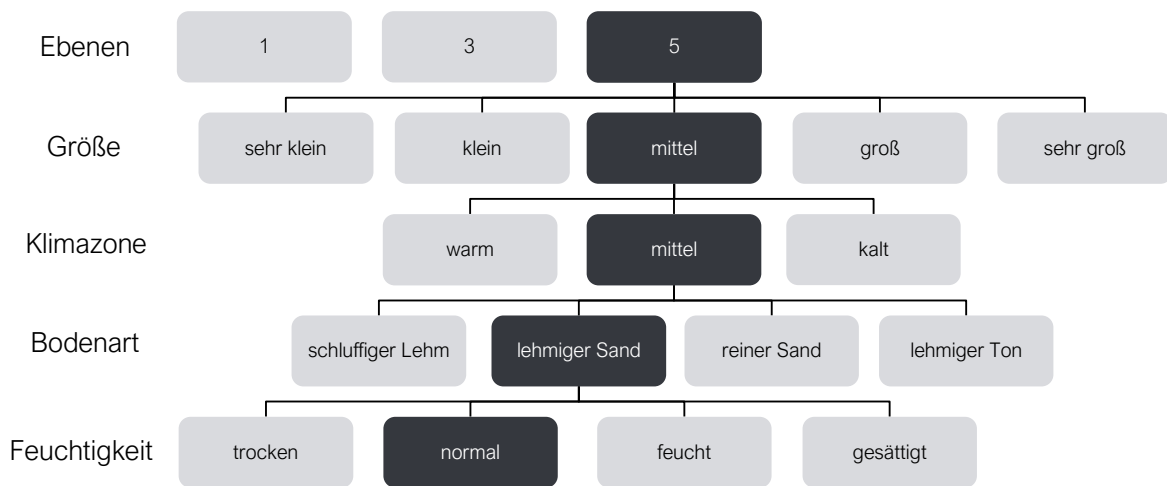
Das Energieentzugsprofil kann als Wohneinheit oder Siedlung verstanden werden und gibt Aufschluss darüber, wie viel Quellwärme zum Heizen bzw. zur Kühlung aus dem EES entzogen bzw. eingespeist wird. Mithilfe der Stoffwerte und der Temperaturspreizung an der Wärmepumpe kann über das Energieentzugsprofil der zugehörige Massenstrom der Sole ermittelt werden. Die FMU „Wärmetauscher“ ist eine vereinfachte Wärmepumpe, welche mit einer festgelegten Temperaturspreizung die frostsichere Flüssigkeit abkühlt. Mit einer einheitlichen Vorlauftemperatur teilt sich der Massenstrom der Flüssigkeit auf die Ebenen der Erdwärmekollektoren auf, welche von den „Rohrmodellen“ in der Simulation repräsentiert werden. Die FMUs der verschiedenen Ebenen ermitteln den Wärmeaustausch zwischen der jeweiligen Erdwärmekollektor-Ebene und dem umliegenden Erdreich. Dabei kommunizieren die „Rohrmodelle“ mit dem „Erdreichmodell“, welches die Auswirkungen des Energieentzugs im Boden anhand eines DELPHIN-Modells ermittelt. Nach dem Durchströmen der Erdwärmekollektoren fließen die Massenströme in einer gemeinsamen Rücklaufleitung wieder zusammen. Aus den verschiedenen Rücklauftemperaturen berechnet die FMU „Ø-Temperatur“ in Abhängigkeit der jeweiligen Massenströme die Durchschnittstemperatur der Sole im Rücklauf zum „Wärmetauscher“.

Die verschiedenen Bausteine berechnen und simulieren den EES über einen Zeitraum von zehn Jahren, um ein anfängliches Einschwingen der Erdreichstemperaturen zu berücksichtigen.

### 2.5.2.3 Parameterstudie

Mit der aufgebauten Co-Simulation des EES sollte eine Parameterstudie durchgeführt werden. Dabei sollten verschiedene Kenngrößen variiert und für jedes Modell der maximale flächenspezifische Energieentzug ermittelt werden. Anhand der Ergebnisse kann im Anschluss eine Datenbank für das angestrebte Tool zur Potenzialabschätzung eines EES aufgebaut werden. Da die Simulationszeit einer Variante bei mehreren Stunden liegt und die Variantenanzahl mit jedem Parameter exponentiell steigt, musste die Anzahl der zu verändernden Parameter auf fünf begrenzt werden. Die gewählten Parameter sind die Anzahl der Ebenen und die Größe des EES sowie die Klimazone, Bodenart und der volumetrischer Feuchtegehalt des Bodens.

In Abbildung 39 ist eine Übersicht der untersuchten EES-Varianten beispielhaft, als Hierarchie strukturiert, dargestellt.



**Abbildung 39: Variantenbaum der verschiedenen Versionen des Erdeisspeichers für eine Variante**

#### Ebenenanzahl

Der EES ist in der gekoppelten Simulation mit einer maximal möglichen Anzahl von fünf aktiven Erdwärmekollektor-Ebenen ausgestattet. Im Rahmen der Parameterstudie soll ein Gespür dafür entwickelt werden, welche Anzahl an Ebenen bei einem EES sinnvoll ist. Zudem soll untersucht werden, wie das System sich im Vergleich zu einem klassischen Erdwärmekollektor mit einer Ebene verhält. Daher soll neben dem 5-lagigen EES-Varianten mit drei Ebenen und ein klassischer Erdwärmekollektor mit einer Ebene simuliert werden.

#### Größe

Der nächste Parameter betrifft die Größe des EES, wobei die Fläche der verlegten Kollektorebenen variiert wird. Dabei bewegen sich die Systemgrößen zwischen 100 m<sup>2</sup> der obersten Ebene im kleinsten und 3.500 m<sup>2</sup> im größten Fall. Die definierte mittlere Systemgröße liegt mit ca. 350 m<sup>2</sup> in der Größenordnung der verbauten EES im Baugebiet „An den Wichelkoppeln“.

### **Klimazone**

Mit dem Außenklima wird eine weitere Rahmenbedingung des EES variiert. Die Varianten werden mit einem für Deutschland warmen, mittleren und kalten Klima simuliert. Die Auswahl der Klimazonen erfolgte aus den 15 definierten Klimazonen der DIN 4710. Die fünfte Klimazone mit Essen als Referenzort stellt dabei das warme, die 13. Klimazone mit Passau als Referenzort das mittlere und die elfte Klimazone mit dem Referenzort Fichtelberg das kalte Klima dar.

### **Bodenart**

Für die Auswahl der Bodenarten kommen die verschiedenen nach DIN 4220 klassifizierten Feinbodenarten infrage. Darin werden die Bodenarten in vier Hauptgruppen – Sande, Schluffe, Lehme und Tone – unterschieden. Die Bodenarten grenzen sich in ihren mineralogischen Eigenschaften, welche Auswirkungen auf das Energieentzugspotenzial haben, erheblich voneinander ab. In der Parameterstudie wurden vier repräsentative Bodenarten ausgewählt, die einen großen Teil des Bodenartendiagramms der Feinböden aus der DIN 4220 abdecken: schluffiger Lehm, mittel lehmiger Sand, reiner Sand und toniger Lehm.

### **Feuchtegehalt**

Jede Bodenart wird in der Parameterstudie mit einem variierenden volumetrischen Feuchtegehalt untersucht. Die Abstufung des Feuchtwertes erfolgt in vier Abschnitten. Jeder Boden wird in einem trockenen, normalen, feuchten und gesättigten Zustand betrachtet. Aufgrund der unterschiedlichen Porengrößen wurden die Feuchtwerte der verschiedenen Zustände für jede Bodenart individuell bestimmt. So ist der Feuchtwert eines normalen reinen Sandes deutlich unter der eines normalen tonigen Lehms.

Im Rahmen der ersten Parameterstudie wurden nicht alle Varianten aufgebaut und simuliert. Die Einflüsse der Parameter wurden zunächst ausführlich an der 5-lagigen EES-Variante untersucht und analysiert. Erst im Anschluss soll der Vergleich zu Varianten mit weniger Ebenen gezogen werden.

#### **2.5.2.4 Auswertung**

Der maximale flächenspezifische Energieentzug ist die Zielgröße für die verschiedenen EES-Varianten in der Parameterstudie. Um diesen bestimmen zu können, müssen Kriterien festgelegt werden, welche beurteilen, ob ein Betrieb des EES bei dem aktuell verwendeten Energieentzugsprofil möglich ist.

Der limitierende Faktor der Anlage ist dabei die Sole, welche unter keinen Umständen in den Leitungen gefrieren darf. Der Gefrierpunkt der verwendeten Sole in ErdEis II liegt bei  $-14\text{ °C}$ . Für die Zwecke der Simulation wurde dieser Wert mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt und somit eine Grenztemperatur von  $-8\text{ °C}$  festgelegt. Das Wärmeträgerfluid erreicht den kältesten Punkt nach dem Durchlaufen der Wärmepumpe. Die FMU „Wärmetauscher“ arbeitet in der Co-Simulation mit einer Temperaturspreizung von 4 K, was einem üblichen Temperaturhub einer Sole-Wasser-Wärmepumpe, entspricht. Somit darf die Vorlauftemperatur des Fluids in der Simulation beim Eintritt in den „Wärmetauscher“ nicht unter  $-4\text{ °C}$  fallen.

Das Energieentzugsprofil entspricht dem eines durchschnittlichen Wohnquartiers. Um das Erdreich bei einem mehrlagigen Erdwärmekollektorsystem in den Sommermonaten vollständig zu regenerieren, ist es notwendig, den EES aktiv zu regenerieren – bspw. durch die Bereitstellung von Kälteenergie, wie es im Projekt geplant ist. Daher ist im verwendeten Entzugsprofil eine Wärmerückführung im Sommer integriert, welche der Kühlung der Gebäude entspricht.

Zur automatischen Generierung und zum Starten der Simulationsvarianten wurde ein Python-Code entwickelt, welcher zudem die laufenden Simulationen nach einem definierten Lösungsalgorithmus überwacht und bei Bedarf stoppt, modifiziert und anschließend neu startet. In folgenden Projekten können weitere Parameterstudien mithilfe des entwickelten Python-Skripts mit bedeutend weniger Aufwand durchgeführt und damit das Auslegungstool erweitert werden.

#### 2.5.2.5 Ergebnisse der Parameterstudie

Mithilfe der Python-Skripte konnten die Co-Simulationen der verschiedenen EES-Varianten schnell aufgebaut und der zugehörige maximale flächenspezifische Energieentzug in kWh/(m<sup>2</sup>a) automatisiert ermittelt werden. Im Anschluss erfolgte eine Analyse der durchgeführten Parameterstudie, wobei der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Gesamtpotenzial untersucht wurde. Parameter mit hohem Einfluss müssen vom Nutzer beim Auslegungstool als Input eingegeben werden, während Parameter ohne Einfluss im Tool automatisch gesetzt und deshalb nicht beachtet werden müssen.

##### **Größe**

Der erste Parameter, die Größe der Erdwärmekollektorflächen des EES, hat gemäß den Simulationen keine Auswirkung auf das flächenspezifische Energieentzugspotenzial. Die Unterschiede der verschiedenen Varianten liegen in den Simulationen in einem vernachlässigbar kleinen Rahmen. Somit kann der Parameter der Ebenengröße als irrelevant in Bezug auf das flächenspezifische Energieentzugspotenzial eines EES bewertet werden. Im Tool ist jedoch eine Flächenangabe weiterhin zwingend erforderlich, um den absoluten Energieentzug des Projekts ermitteln zu können. Bei der Erzeugung der Varianten-Datenbank kann allerdings auf eine Variation der Größe der Erdwärmekollektorflächen des EES verzichtet werden.

##### **Klimazone**

Aus den Ergebnissen des zweiten Parameters lässt sich ableiten, dass die klimatischen Bedingungen einen bedeutenden Einfluss auf das Energieentzugspotenzial eines EES haben. Dabei nimmt das Außenklima im wesentlichen Einfluss auf die Regeneration der obersten Erdwärmekollektorebene. Mit wärmeren Umgebungstemperaturen kann die oberste Ebene in den Sommermonaten deutlich besser natürlich regenerieren, wodurch sich bei der aktiven Regeneration auf die tiefer liegenden Ebenen konzentriert werden kann. Das ist von Vorteil, da das gebundene Wasser in den unteren Ebenen mit den momentan verwendeten Energieentzugsprofilen über den Sommer bei einigen EES-Varianten nicht auftaut. Die latente Wärme dieser Ebenen kann somit nicht genutzt werden, was die Energiespeicherung deutlich verringert. Bei besserer Regeneration können diese Ebenen im folgenden Winter wieder mehr zum absoluten Energieentzug beitragen und das Gesamtpotenzial des EES erhöhen.

## **Bodenart und Feuchtegehalt**

Da der volumetrische Feuchtegehalt stark von der Bodenart abhängt, wurden die Ergebnisse der Parameter „Bodenart“ und „Feuchtegehalt“ gemeinsam ausgewertet.

Allgemein ist zu beobachten, dass der EES mit steigendem Feuchtegehalt im Bodenkörper einen höheren spezifischen Energieentzug bewältigen kann. Durch mehr Wasser im Erdreich kann ein höheres Wasservolumen eingefroren und damit mehr latente Wärme nutzbar gemacht werden. Daher ergeben die Simulationen im trockenen Zustand über alle Bodenarten hinweg eine entsprechend schlechte Performance des EES. Darüber hinaus sind im trockenen Zustand kaum Unterschiede zwischen den Bodenarten zu erkennen. Diese treten erst ab dem vorab definierten feuchten Zustand auf.

Im feuchten Zustand ergeben sich erhebliche Unterschiede zwischen den Bodenarten im spezifischen Energieentzugspotenzial. Dabei sind die Porengröße und die damit einhergehenden Bindungskräfte im Bodenkörper ein großer Einflussfaktor. Böden mit kleinen Poren – wie bspw. Ton – besitzen starke Bindungskräfte und können dadurch mehr Wasser gegenüber der Schwerkraft halten. Die starken Bindungskräfte verursachen allerdings einen erhöhten Anteil an ungefrorener Wassermasse, welches bei der Unterschreitung des normalen Gefrierpunkts von Wasser keinen Phasenwechsel vollzieht. Bei Bodenarten mit großen Poren ergeben sich gegensätzliche Bedingungen. Während einerseits verhältnismäßig wenig Wasser im Erdreich gehalten werden kann, ist der Anteil an ungefrorenem Wasser sehr gering. Mit diesem Hintergrundwissen können sich die Ergebnisse der Simulationen erklären lassen.

Bezogen auf die untersuchten Bodenarten lässt sich sagen, dass tonige Böden aufgrund kleinerer Poren zwar meist einen hohen Wasseranteil aufweisen, gleichzeitig allerdings durch geringe Wärmeleitfähigkeitswerte und große Anteile an ungefrorener Wassermasse eher schlechte mineralogische Eigenschaften für den Einsatz eines EES haben. Sandige Böden mit ihren großen Poren sind eher trockenere Böden, zeigen aber eine deutlich bessere Performance, sobald die Feuchtigkeit steigt. Die besten mineralogischen Eigenschaften zeigen Mischungen aus Schluffen und Sanden. Dabei wird eine hohe Feldkapazität mit guter Wärmeleitfähigkeit und geringen Anteilen ungefrorener Wassermasse kombiniert.

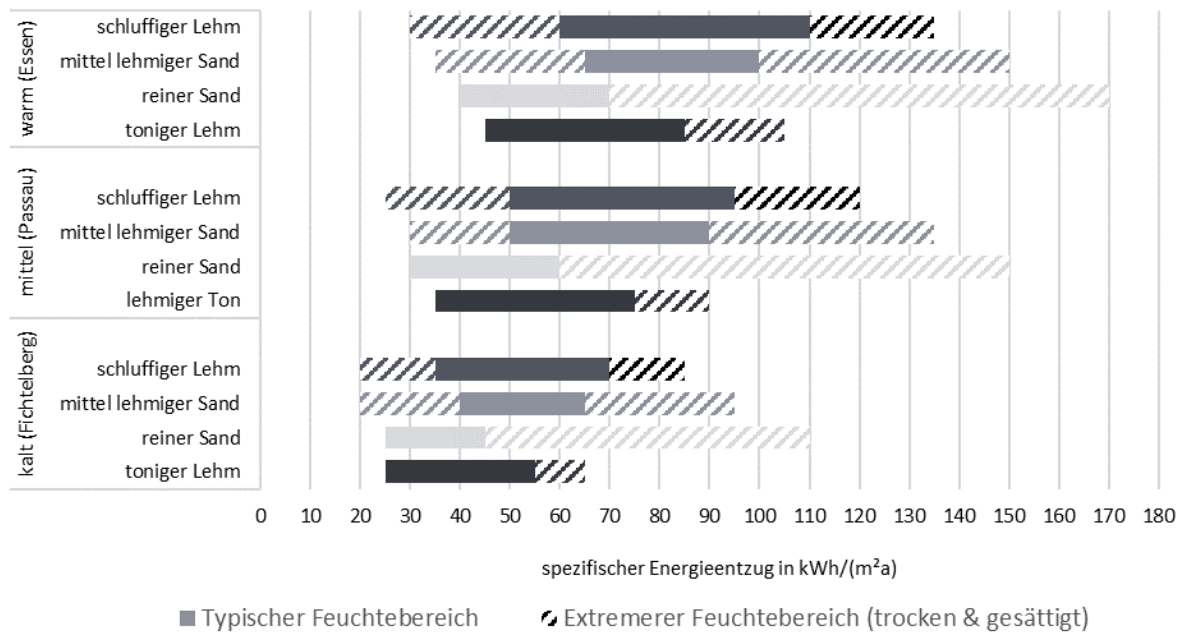
Im gesättigten Zustand muss der Bodenkörper das gebundene Wasser nicht mehr gegenüber der Schwerkraft halten. Dadurch fällt der Nachteil von großporigen Böden, nicht ausreichend Wasser im Erdreich halten zu können, weg. Es entscheidet hauptsächlich der Anteil der ungefrorenen Wassermenge über das Potenzial des EES. Tonige Böden mit hohem Anteil an ungefrorenem Wasser weisen damit im gesättigten Zustand im Vergleich ein schlechtes Potenzial vor. Im Gegensatz dazu performt reiner Sand im gesättigten Zustand am besten. Die Mischböden aus Schluff und Sand weisen ebenso verhältnismäßig gute spezifische Energieentzugswerte auf.

Ein weiterer Einfluss auf das Energieentzugspotenzial hat zudem die Wärmeleitfähigkeit, welche mit zunehmenden Sandanteil steigt und mit zunehmenden Tonanteil sinkt.

## Zusammenfassung

Insgesamt wurden in der Parameterstudie ca. 140 Varianten simuliert. In Abbildung 40 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Die EES-Varianten sind nach Klimazone und Bodenart geordnet. Die Balken zeigen an, zwischen welchem minimalen und maximalen spezifischen Energieentzug die jeweilige EES-Variante bei unterschiedlichen Feuchten liegt. Der ausgefüllte Abschnitt des Balkens zeigt den normalen bis feuchten Zustand der jeweiligen Variante, also die Feuchte, die in der Realität am ehesten zu erwarten ist. Die schraffierten Flächen zeigen die extremeren Varianten, also trockene oder gesättigte Böden.



**Abbildung 40: Übersicht der Energieentzugspotenziale eines 5-lagigen Erdspeichers mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen**

Es zeigt sich, dass in den üblichen Temperaturbereichen Mischböden aus Schluff und Sand am besten performen. Tonige Böden haben im Vergleich ein geringeres Energieentzugspotenzial. Im reinen Sand zeigt der EES ein außerordentlich hohes Potenzial, sofern dieser im gesättigten Zustand ist, welcher in der Realität eher in selteneren Fällen auftritt.

## Anzahl Ebenen

Schlussendlich sollte der 5-lagige EES noch mit einer 3-lagigen Variante sowie einem klassischen einlagigen Erdwärmekollektor verglichen werden. Dabei wurde eine klare Steigerung des Energieentzugspotenzials von einem klassischen Erdwärmekollektor zu einem 3-lagigen EES von ca. 30 % festgestellt. Zwischen einem 3-lagigen und 5-lagigen EES konnte in den Simulationen zunächst kein Unterschied im Energieentzugspotenzial festgestellt werden.

Dies lässt sich vor allem damit begründen, dass bei den Simulationen der Parameterstudie die untersten Ebenen des EES Probleme haben, im Sommer vollständig zu regenerieren. Die Einflüsse des Klimas sowie der angenommene Kühlbedarf der Gebäude im Entzugsprofil der Simulation reichen



nicht aus, um alle Ebenen im Sommer vollständig aufzutauen. Das hat zur Folge, dass diese Ebenen im Winter kaum Energie entziehen können und sich somit nur sehr geringe Unterschiede zwischen der 3- und 5-lagigen Variante eines EES ergeben.

Der EES hat deutlich mehr Potenzial in der Bereitstellung von Kälte im Sommer als bisher angenommen.

#### 2.5.2.6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Toolentwicklung und der Parameterstudie wurde sich bisher ausschließlich auf das Potenzial des EES als Wärmequelle fokussiert. Die detaillierte Auswertung der Simulationen zeigt jedoch, dass das Energieentzugspotenzial sehr stark an das Kältepotenzial gekoppelt ist. Die unteren Ebenen des EES können nur dann das Energieentzugspotenzial des Systems erhöhen, wenn sie im Sommer vollständig regenerieren. Aktuell reichen in vielen Simulationen die Auswirkungen des Klimas und der angenommene Kühlbedarf nicht für eine vollständige Regeneration aus. Der 5-lagige EES benötigt mehr Abwärme, bzw. sollte mehr Kälte im Sommer zur Verfügung stellen, um sein volles Potenzial als Wärmespeicher auszuschöpfen. Daher muss das Energieentzugspotenzial gemeinsam mit dem Kältepotenzial im Auslegungstool betrachtet werden. Diese neuen Erkenntnisse erfordern weitere ausführlichere Untersuchungen der Simulationen mithilfe angepasster Energieentzugsprofile, welche einen variierenden Kühlbedarf haben. Diese Ergebnisse sollen mittels einer weiteren Parameterstudie im Anschlussvorhaben ErdEis III ermittelt und anschließend in die Oberfläche eines Auslegungstools überführt werden. Aufgrund des entwickelten Simulationsmodells und der Python-Skripte kann die nächste Parameterstudie weitestgehend automatisiert durchgeführt werden.

### 3 Fazit und Ausblick

Das primäre Ziel, die erstmalige Planung und Umsetzung eines Erdeisspeichers, konnte mit dem Forschungsvorhaben ErdEis II erfolgreich erreicht werden. Es zeigte sich jedoch, dass der Einbau bei einem hohen Grundwasserstand sehr komplex und aufwendig ist.

Durch das Hydraulikkonzept kann der Erdeisspeicher und die Einbindung in ein Gesamtsystem mit mehreren Wärme- und Kältequellen ausführlich getestet werden. Diese Erfahrungen können in Zukunft dazu beitragen, den Erdeisspeicher als Baustein erneuerbarer Energiekonzepte zu etablieren.

Neben der Erprobung des Erdeisspeichers und seiner verschiedenen Betriebsstrategien können mithilfe des Messkonzeptes eine Vielzahl unterschiedlicher Forschungsfragen intensiv untersucht werden. Weiterhin dienen die Messdaten zur kontinuierlichen Verbesserung der Simulationswerkzeuge für oberflächennahe Geothermie. Obwohl bereits eine gute Genauigkeit erreicht werden kann, lässt sich mithilfe der Messdaten die Simulation immer mehr der Realität annähern.

Im Projekt wurde mit der MSR-Technik der Energiezentrale und dem Messkonzept der Geothermiequellen die Grundlage für eine übergeordnete Optimierungsebene geschaffen. Diese wird in ErdEis III in Form eines District Energy Management Systems umgesetzt. Es erhält Echtzeit-Daten zu allen Umweltwärmequellen, der Energiezentrale und dem Kalten Nahwärmenetz. Weitere Datenquellen sind die dezentralen Wärmepumpen in den Gebäuden, die PV-Anlagen der Bewohner, der Haushalts- und Wallboxstrombedarf sowie die Ladestände der thermischen und elektrischen Speicher in den Gebäuden. Zusammen mit den Daten aus der Wetterstation und Wettervorhersagen soll der Wärme-, Kälte- und Strombedarf möglichst genau vorhergesagt und entsprechend die Wärme-, Kälte- und Strompotenziale im Baugebiet optimal genutzt werden. Mithilfe passender Geschäftsmodelle können die Bewohner ihren Strom direkt im Baugebiet vermarkten und der Netzbetreiber muss weniger Lastspitzen im Stromnetz ausgleichen.

Bei Kalter Nahwärme und oberflächennahester Geothermie besteht trotz einigen bereits umgesetzten Leuchtturmprojekten noch ein großer Forschungsbedarf. Zertifizierte Wärmemengenzähler, die für Abrechnungen von Wasser-Glykol verwendet werden dürfen, würden den Wärmeverkauf vor der Wärmepumpe ermöglichen und den Bewohner den eigenverantwortlichen Betrieb der Wärmepumpe ermöglichen. Der Einsatz von Kältemengenzählern ist aufgrund der hierfür hohen Investitionskosten ökonomisch nicht darstellbar. Stadtwerke könnten sich dann darauf fokussieren, die Quellwärme bereitzustellen. Die Entwicklung solcher zertifizierter Wärmemengenzähler bedeutet einen großen genehmigungstechnischen Aufwand und soll in einem ZIM-Projekt weiterverfolgt werden.

Die Versuche zu Undichtigkeiten haben gezeigt, dass es bei hochwertiger Produktion und Verbau nicht zu Undichtigkeiten kommt und etwaige Undichtigkeiten schon frühzeitig bei der Druckprüfung detektiert werden können. Erneute Tiefbauarbeiten oder der Austritt wassergefährdender Stoffe werden dadurch zuverlässig vermieden. Festzuhalten ist jedoch, dass für genauere Ergebnisse eine deutlich höhere Anzahl an Prüfkörpern nötig ist. Die Versuchsreihe könnte dementsprechend in der Zukunft mit einer höheren Anzahl an Prüfkörpern wiederholt werden. Bei den Leckageversuchen konnte ebenfalls eine Vielzahl neuer Erkenntnisse erzielt werden. Gleichzeitig traten jedoch auch

neue Forschungsfragen auf. Es würden sich beispielsweise weitere Analysen der detektierten Stoffe anbieten. Weiterhin sollten Abbauversuche unter möglichst realen Bedingungen mit dem Einfluss von Mikroorganismen, Pflanzen, Unterspülung durch Regen und Versickerung durchgeführt werden. Nur so lassen sich verlässliche Aussagen zur Abbaufähigkeit von Wärmeträgermedien treffen.

Bei der Entwicklung des praxistauglichen Auslegungstools sind mehrere Themen aufgetreten, die einen hohen Einfluss auf die Performance eines Erdeisspeichers haben und noch weiter untersucht werden müssen. Das Auslegungstool wird in ErdEis III weiterentwickelt und ebenfalls mit Messdaten optimiert. Das Ziel ist es, spätestens zum Ende von ErdEis III ein anwendungsfähiges Auslegungstool zu veröffentlichen, das bspw. von anderen Planern genutzt werden kann. Somit soll das Konzept des Erdeisspeichers weiter verbreitet und durch das Auslegungstool auch für andere Planer umsetzbar gemacht werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der Forschungsvorhaben ErdEis II die Umsetzbarkeit des Erdeisspeichers bewiesen und die Basis für eine ausführliche Erprobung und Untersuchung in ErdEis III geschaffen wurde. Bei vielen Themen rund um den Erdeisspeicher konnten neue Erkenntnisse erzielt werden, die entweder in ErdEis III, anderen Forschungsvorhaben oder anderweitig weiterfolgt werden.

## 4 Wissenstransfer

Ein wichtiger Teil eines Forschungsvorhabens ist neben der Wissensschaffung auch der Wissenstransfer nach außen. Den Projektpartnern ist es ein großes Anliegen, das Konzept des Erdspeichers bekannter zu machen. Dazu wurde die Fachwelt und die Öffentlichkeit in der Projektlaufzeit regelmäßig mithilfe von Vorträgen, Publikationen und Auszeichnungen über das Projekt informiert und drauf aufmerksam gemacht. Weiterhin konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Abschlussarbeit geschrieben werden.

### 4.1 Vorträge

Im Rahmen von Vorträgen über die Kalte Nahwärme haben Frau Jürgensen, Herr Bock und Herr Lucki von den SSW an verschiedenen Veranstaltungen teilgenommen:

- „Leuphana Energieforum 2019“ in Lüneburg (Julia Jürgensen)  
Veranstalter: Leuphana Universität Lüneburg; 23.10.2019  
<https://www.leuphana.de/institute/insugo/energie-und-umweltrecht/veranstaltungen/energieforum/energieforum-2019.html>
- „Wärmetag im Norden“ in Neumünster (Julia Jürgensen)  
Veranstalter: Die Netzwerkpartner; 14.11.2019
- „11. EffizienzTagung Bauen+Modernisieren“ in Hannover (Julia Jürgensen)  
Veranstalter: Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH; 22.11.2019  
[www.effizienztagung.de](http://www.effizienztagung.de)
- „Runder Klimatisch“ (Julia Jürgensen & Thorsten Bock)  
Veranstalter: Stadt Schleswig; 26.08.2020
- „Die Netzwerkpartner“ (Julia Jürgensen & Thorsten Bock)  
Veranstalter: Die Netzwerkplaner; 10.11.2020
- „Kalte Wärmenetze als Teil der Reallabore: Technik und Akzeptanz (Thorsten Bock)  
Veranstalter: SmartQuart & TransUrban.NRW; 02.12.2020
- „Power to Heat“ (Julia Jürgensen)  
Veranstalter: Windenergiecluster Mecklenburg-Vorpommern; 08.12.2020  
[www.windenergiecluster-mv.de/veranstaltungen/power-to-heat/](http://www.windenergiecluster-mv.de/veranstaltungen/power-to-heat/)
- „Kalte Nahwärme für Neubaugebiete – ökologisch, hocheffizient und modern“  
Veranstalter: 12. Norddeutsche Geothermietagung; 06.05.2021
- „Kalte Nahwärme in Neubaugebieten“  
Veranstalter: Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH - Wärmepumpen für Niedersachsen; 09.09.2021

- „Wärmepumpen im Quartier – Erfahrungen aus der Umsetzung und dem Betrieb kalter Nahwärme“  
Veranstalter: Wärmepumpe kommunal und urban – Mitteldeutschland; 11.02.2022
- „Wärmepumpen im Quartier - Erfahrungen aus der Umsetzung und dem Betrieb kalter Nahwärme“  
Veranstalter: 1. Niedersächsischer Wärmepumpentag; 22.02.2022
- „Wärmepumpen im Quartier – Erfahrungen aus der Umsetzung und dem Betrieb kalter Nahwärme“  
Veranstalter: Wärmepumpe kommunal und urban – Mitteldeutschland; 11.05.2022
- „Session VI – Und wie machen wir das Ganze flexibel“ (Patrick Lucki)  
Veranstalter: Fraunhofer Cluster of Excellence (Konferenz zur Umsetzung der Wärmewende); 21.09.2022

Am Ende der Vorträge hat Frau Jürgensen, Herr Bock und Herr Lucki auf das Forschungsprojekt ErdEis II, dessen Ziele und die Projektpartner verwiesen und aufmerksam gemacht.

Weiterhin wurden Vorträge auf Kongressen gehalten:

- „DGK 2019“ (Björn Ohlsen, EPC)  
Veranstalter: Bundesverbandes Geothermie e. V.; „Forschungsvorhaben: ErdEis II – Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie“; 20.11.2019  
<https://www.der-geothermiekongress.de/tagungsbaende/tagungsband-2019/2-foren-tag.html>
- „DGK 2019“ (Volker Stockinger, EPC)  
Veranstalter: Bundesverbandes Geothermie e. V.; „ErdEis – Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie“; 21.11.2019  
[https://www.der-geothermiekongress.de/fileadmin/user\\_upload/DGK/DGK\\_2019/Teilnahme/F13\\_Stockinger\\_presentation.pdf](https://www.der-geothermiekongress.de/fileadmin/user_upload/DGK/DGK_2019/Teilnahme/F13_Stockinger_presentation.pdf)
- „Gemeinsamen Fachkonferenz der BMWi-Forschungsnetzwerke Bioenergie & Energiewendebauen Digitalisieren – Sektoren koppeln – Flexibilisieren“ (Björn Ohlsen, EPC) Veranstalter: Projektträger Jülich; „Forschungsvorhaben ErdEis II“; 24.11.20  
<https://d-nb.info/1222926407/34>
- „Berliner Energietage“ (Patrick Lucki, SSW)  
Veranstalter: BMWK Veranstaltung; „Wärmepumpen urban gedacht – Energieforschung für die Wärmewende“; 04.05.2022  
<https://www.energietage.de/home.html>

- „Fachseminar des Energie- und Umweltzentrum Allgäu“ (Volker Stockinger, EPC)  
Veranstalter: Energie- und Umweltzentrum Allgäu; „Wärmeversorgung der Zukunft mit Kalter Nahwärme“; 09.05.2022
- „3. Kongress Energiewendebauen“ (Volker Stockinger, EPC)  
Veranstalter: Energiewendebauen – Projektträger Jülich; „ErdEis II – großtechnische Umsetzung eines Erdeisspeichers“; 09.06.2022  
<https://ewb.innoecos.com/Group/Kongresse/EXPO-Foren/Start/Accordion>
- „INUAS Konferenz 2022“ (Björn Ohlsen, EPC)  
Veranstalter: FH Campus Wien; „ErdEis II – Platzsparende oberflächennahe Geothermie“; 08.09.2022  
[https://www.inuas.org/wp-content/uploads/2022/09/INUAS\\_BoA\\_220906\\_low.pdf](https://www.inuas.org/wp-content/uploads/2022/09/INUAS_BoA_220906_low.pdf)
- „European Geothermal Congress 2022“ (Björn Ohlsen, EPC)  
Veranstalter: European Geothermal Energy Council, Bundesverband Geothermie e. V.; „Possible applications of a Frozen Soil Storage and linking with other heat sources“; 19.10.2022; ISBN: 978-2-9601946-2-3  
[https://www.egec.org/wp-content/uploads/2023/01/Ohlsen-Possible-applications-of-a-frozen-soil-storage-and-linking-with-other-heat-sources-201\\_ExtAbstract.pdf](https://www.egec.org/wp-content/uploads/2023/01/Ohlsen-Possible-applications-of-a-frozen-soil-storage-and-linking-with-other-heat-sources-201_ExtAbstract.pdf)
- „European Geothermal Congress 2022“ (Julia Jürgensen, SSW)  
Veranstalter: European Geothermal Energy Council, Bundesverband Geothermie e. V.; „Experience with Low Temperature District Heating – 8 Networks with more than 350 Heat-Pumps in Schleswig-Holstein“; 19.10.2022

## 4.2 Wissenschaftliche Publikationen

In den folgenden wissenschaftlichen Publikationen wurden das Forschungsvorhaben und teilweise Ergebnisse davon vorgestellt.

- Zeh, Robin; Ohlsen, Björn; Stockinger, Volker. 2019. Kalte Nahwärme und oberflächennahe Geothermie im urbanen Raum. In: bbr Leitungsbau | Brunnenbau | Geothermie.
- Zeh, Robin; Ohlsen, Björn; Philipp, David; Bertermann, David; Kotz, Tim; Nikola Jocić; Stockinger, Volker. 2021. Large-Scale Geothermal Collector Systems for 5<sup>th</sup> Generation District Heating and Cooling Networks. In: Sustainability 2021, 13, 6035. DOI 10.3390/su13116035
- Mans, Michael; Blacha, Tobias; Schreiber, Thomas; Müller, Dirk. 2022. Development and Application of an Open-Source Framework for Automated Thermal Network Generation and Simulations in Modelica. In: Energies 15, no. 12: 4372. DOI 10.3390/en15124372

- Zeh, Robin; Schmid, Matthias; Ohlsen, Björn; Venczel, Stefan; Stockinger, Volker. 2023. 5<sup>th</sup> Generation District Heating and Cooling Networks as a Heat Source for Geothermal Heat Pumps. In: Geothermal Heat Pump Systems. Springer. ISBN 978-3-031-24523-7

### 4.3 Weitere Publikationen

Auf der Website des Bundesverband Geothermie wurde ein kurzer Beitrag über das Projekt veröffentlicht (<https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/waerme-in-eis-speichern.html>).

Das Forschungsvorhaben wurde außerdem auf den Websites von Energiewendebauen (<https://www.energiewendebauen.de/forschung-im-dialog/neuigkeiten-aus-der-forschung/detailansicht/erdeisspeicher-kaelte-und-waerme-aus-der-erde>) und Bauen+ ([www.bauenplus.de/aktuelles/Erdeisspeicher-koennen-Kaelte-und-Waerme-liefen/](http://www.bauenplus.de/aktuelles/Erdeisspeicher-koennen-Kaelte-und-Waerme-liefen/)) vorgestellt.

Im September 2021 erschien im Heizungsjournal der Artikel „Gestapelte Erdwärme – Erdeisspeicher zum Heizen, Kühlen und Heizen und Kühlen“: [https://www.heizungsjournal.de/gestapelte-erd-waerme\\_17617?p=1](https://www.heizungsjournal.de/gestapelte-erd-waerme_17617?p=1)

Auch außerhalb der Fachkreise konnte mit einem Artikel in der der Süddeutschen Zeitung (Titel: „Wie mit Eis geheizt werden soll“) der Bekanntheitsgrad des Erdeisspeichers gesteigert werden. (<https://www.sueddeutsche.de/wissen/waermespeicher-haus-waerme-heizung-umweltfreundlich-1.5594712?reduced=false>).

### 4.4 Auszeichnungen

Das Forschungsvorhaben ErdEis II ist einer der sechs Nominierten des *Ruggero Bertani European Geothermal Innovation Award 2023*. Der Gewinner wurde am 2. März im Rahmen der *GeoTHERM expo & congress* in Offenburg bekanntgegeben. Als sowohl einziges deutsches und einziges zum Thema oberflächennahe Geothermie nominiertes Projekt konnte durch die Nominierung und die Preisverleihung eine große Aufmerksamkeit auf das Forschungsvorhaben und das Konzept des Erdeisspeichers gelenkt werden.

### 4.5 Abschlussarbeiten

Masterarbeit von Oliver Soukup an der FAU (2020): „Ermittlung von boden- und thermophysikalischen Untergrundparametern zur Abschätzung des geothermischen Potentials von Erdwärmekollektoren und Erdeisspeicher“.

## 5 Literaturverzeichnis

- Ahmels, P., Brandmeyer, O., Bruns, E., Grünert, J., & Voß, U. (2016). *Auswirkungen verschiedener Erdkabelsysteme auf Natur und Landschaft*. Projektbericht "EKNA" (FKZ: 3514821600).
- Ahuja, L. R., & Ross, J. D. (1983). Effect of subsoil conductivity and thickness on interflow pathways, rates and source areas for chemicals in a sloping layered soil with seepage face. *Journal of Hydrology*, 64 (1-4), 189-204.
- Bertermann, D., & Schwarz, H. (2017). Laboratory device to analyse the impact of soil properties on electrical and thermal conductivity. *Int. Agrophys.*, 31, 157-166. doi:10.1515/intag-2016-0048
- Brüggmann, J., Jungnitz, L., & Uther, D. (21.-25. Juni 2015). Heat dissipation of high voltage cable systems – a technical and agricultural study. *9th International Conference on Insulated Power Cables*. Versailles.
- Conde-Avila, V., Ortega-Martínez, L. D., Loera, O., El Kassis, E. G., Dávila, J. G., Valenzuela, C. M., & Armendáriz, B. P. (2020). Pesticides degradation by immobilised microorganisms. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. doi:10.1080/03067319.2020.1715375
- Glück, B. (2008). Simulationsmodell Erdwärmekollektor: zur wärmetechnischen Beurteilung. <http://www.berndglueck.de/Erdwaermekollektor>. Von <http://www.berndglueck.de/Erdwaermekollektor> abgerufen
- Heijde, B. v., & u.a. (Nov. 2017). Dynamic equation-based thermo-hydraulic pipe model for district heating and cooling systems. *Energy Conversion and Management*, Bd. 151, S. 158-169. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.072.
- Ilieva, D., Morasch, B., & Haderlein, S. (2012). *Risikominimierung beim Einsatz von Wärmeträgerflüssigkeiten: Einfluss von Additiven auf Umweltverhalten und Abbaubarkeit im Untergrund*.
- Kellner, C. (2007). *Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper*. München.
- Lehmann, A. (2013). *Die DIN 19731 in der Bodenkundlichen Baubegleitung – Praxisbeispiele*. Hohenheim.
- Reis, A. R., & Sakakibara, Y. (2012). Enzymatic degradation of endocrine-disrupting chemicals in aquatic plants and relations to biological Fenton reaction. *Water Science and Technology*, 66 (4), 775-782.



- Rieberer, R., & Em, G. (2006). *Wärmepumpen, Erdkollektoren, Garten- und Wohnqualität*. Eigenverlag.
- RWTH Aachen University. (21. 10 2020). *BUDO Schema: Standardisierte Bezeichnung zeitaufgelöster Gebäudedaten*. Von RWTH Aachen University: <https://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Forschung/OPEN-SOURCE/~qajk/Standardisierte-Bezeichnung-zeitaufgeloe/> abgerufen
- Stäudinger, V., Stockinger, V., & Jensch, W. (2019). *Schlussbericht "ErdEis - Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie"*. München.
- Stockinger, V., Jensch, W., & Grunewald, J. (2015). *Schlussbericht +Eins Plusenergiesiedlung Ludmilla-Wohnpark Landshut*. München.
- Suttner, T. (2013). *Boden in der Planung – Bodenkundliche Baubegleitung*. München.
- Trüby, P., & Aldinger, E. (2013). Auswirkungen der Wärmeemission von Hochspannungserd-kabeln auf den Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens. (DRL, Hrsg.) *Schriftenreihe des DRL, Heft 84*, 100-108.
- Uther, D., Trüby, P., Aldinger, E., Brakelmann, H., & Stammen, J. (2009). Wärmeemission bei Hoch- und Höchstspannungserdkabeln. *ew - Magazin für Energiewirtschaft, Jg. 108*, 66-74.

## 6 Anhang

### 6.1 Vollständiger Bericht der RWTH zur rechnergestützten Planungsoptimierung

In Ergänzung zu Kapitel 2.1.1.4 folgt hier der vollständige Abschlussbericht der RWTH Aachen.

#### Simulation des alten Nahwärmenetzes

Für eine nachhaltige Energieversorgung von Gebäuden mit Wärme und Kälte rückt der Fokus vom einzelnen Gebäude immer stärker zu ganzheitlichen Quartierslösungen. Hierbei stellt die netzgebundene Versorgung mittels Niedrig Exergie Technologie (LowEx), kalter Nahwärme oder Wärmenetzen der 5. Generation eine entscheidende Technologie dar. Diese kalten Nahwärmenetze ermöglichen die Einbindung erneuerbarer Energien auf niedrigem Temperaturniveau, wie beispielsweise oberflächennaher Geothermie und tragen entscheidend zur Elektrifizierung des Wärmesektors bei. Gleichzeitig stellen diese Systeme neue Anforderungen an den Betrieb, welche mit Hilfe von dynamischen Simulationen analysiert werden können. Das vorliegende Forschungsvorhaben, „EnEff: Wärme: ErdEis II: Eisspeicher und oberflächennahe Geothermie“, Teilvorhaben: „Rechnergestützte Planungsoptimierung des Kalten Nahwärmenetzes“ setzt sich zum Ziel ein Neubaugebiet in Schleswig mit kalter Nahwärme zu versorgen. Unterstützt wird dieses Vorhaben durch dynamische Simulationswerkzeuge zur Auslegung und Abbildung des Betriebs. Diese Unterstützung ist Aufgabe des Teilvorhabens: „Rechnergestützte Planungsoptimierung des Kalten Nahwärmenetzes“ und wird im Folgenden behandelt.

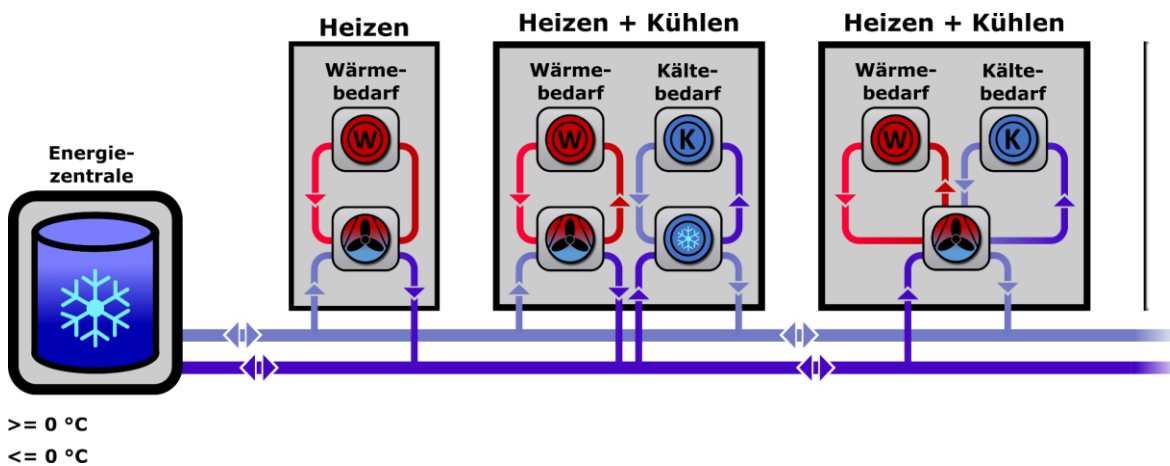
Für die rechnergestützte Planungsoptimierung wird seitens der RWTH Aachen University eine dynamische Netzsimulation zur hydraulischen und thermischen Berechnung des Betriebs des kalten Nahwärmenetzes durchgeführt. Dies umfasst die Berechnung des Netzbetriebs auf Basis von Bedarfprofilen der Gebäude im Gebiet sowie auf Basis des Erdeisspeichers. Hierfür werden dynamische Simulationsmodelle weiterentwickelt und in verschiedenen Untersuchungsszenarien angewendet. Ein Teil der Untersuchungsszenarien umfasst die Untersuchung verschiedener Auslegungseinflüsse auf den Netzbetrieb. Der weitere Teil der Untersuchungsszenarien umfasst die Bewertung des Netzes mit Hilfe einer gekoppelten Simulation mit den von der EPC und TUD zur Verfügung gestellten Modellen von Erdeisspeicher und Erdkollektoren.

Im Folgenden wird zunächst auf die Modellierung der Simulationsmodelle für Wärmenetze der 5. Generation in Modelica eingegangen. Hierbei werden Ansätze für verschiedene hydraulische Versorgungskonzepte (z. B. zentrale, dezentrale Versorgungspumpen und deren Kombination) sowie die genaue Abbildung der Wärmeübertragung zwischen Versorgungsmedium und Erdreich vorgestellt. Dazu wird auch auf unterschiedliche Detailtiefen der Modelle für Wärmeübergabestationen eingegangen. Im Anschluss erfolgt die Vorstellung der automatisierten Modellerstellung für Modelica Simulationsmodelle. Danach werden die verschiedenen Untersuchungsszenarien, beginnend mit der Bewertung des Einflusses der Rohrdimensionierung auf den Netzbetrieb, dargestellt. Folgend wird der Vergleich der dezentralen Versorgungsvariante mit der hybriden (zentrale und dezentrale

Pumpen) Versorgung gezeigt. Abschließend wird das Ergebnis der gekoppelten Netzsimulation mit Hilfe des FMI Standards und den zur Verfügung gestellten FMUs erläutert.

### Modellierungsansätze für thermische Netze der 5. Generation

Thermische Netzwerke der 5. Generation werden üblicherweise mit Betriebstemperaturen zwischen 0 und 30 °C betrieben. Dies schafft den Vorteil, dass aus Sicht der Wärmeversorgung nur geringe Wärmeverluste auftreten, sondern vielmehr zusätzliche Wärmegewinne aus dem Erdreich nutzbar werden. Im Projekt ErdEis II wird ein thermisches Netz mit Betriebstemperaturen von ca. 0 °C geplant. Der schematische Aufbau eines solchen Netzes ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung des Netzes mit Eisspeicher und verschiedenen Gebäudeübergabesystemen**

Dargestellt sind 3 Gebäude welche sich wie folgt unterscheiden:

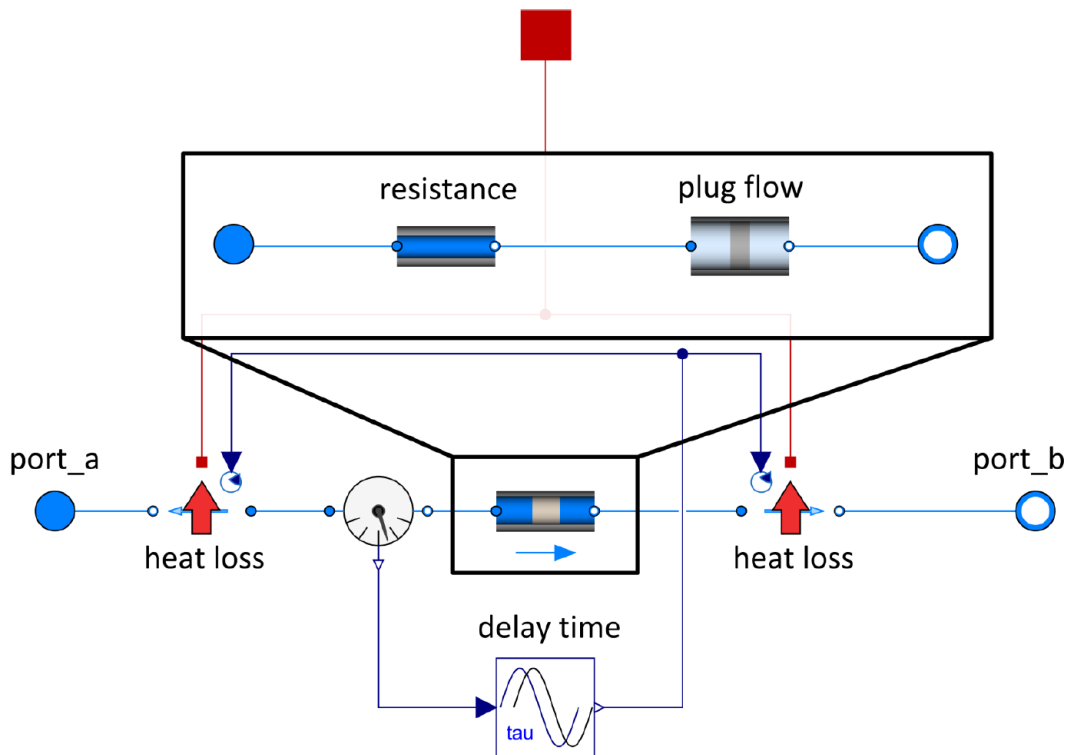
- Heizen (Gebäude mit Wärmepumpe für den reinen Heizbetrieb)
- Heizen und Kühlen (Gebäude mit Wärmepumpe und direkter Kühlung über das Netz)
- Heizen und Kühlen (Gebäude mit Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen)

Im Zuge des Projektes wurde für die Gebäudeanlagentechnik die Funktionen Heizen bzw. Heizen und Kühlen mit direkter Kühlung als anlagentechnische Konfiguration festgelegt. Die Bereitstellung von Kühlenergie im Gebäude ist eine Option, welche vom Gebäudenutzer selbst gewählt werden kann. Dies erschwert die Abschätzung der zukünftigen Nutzung von Kühlenergie im Quartier, weshalb sich im Rahmen der simulationsgestützten Planungsoptimierung auf die Wärmeversorgung der Gebäude konzentriert wurde.

Um die dynamische Simulation von thermischen Netzen der 5. Generation durchführen zu können, müssen drei wesentliche Komponenten modelliert und abgebildet werden:

1. Rohrleitungssystem
2. Hausanschlüsse bzw. Hausübergabestationen der Gebäude an das Netz
3. Erzeuger und Einspeisesystem in das Wärmenetz

Als Grundlage für die Modellierung dieser drei Komponenten dient hierbei die quelloffene Modelica-bibliothek AixLib (Müller, Lauster, Constantin, Fuchs, & Remmen, 2016), welche auf dem Kern der quelloffenen Modelicabibliothek Modelica IBPSA Library (Wetter & Van Treeck, 2017) basiert. Die Modelica IBPSA Library Bibliothek wird von einem internationalen Team im Rahmen des IBPSA Project 1 (<https://ibpsa.github.io/project1/>) stetig weiterentwickelt, verbessert und beispielsweise mit Hilfe des DETEST (Saelens et al., 2020) getestet. Mit Hilfe dieser internationalen Kooperation entstand das verwendete Rohrmodell welches in Abbildung 2 dargestellt ist. Das sogenannte Plug-Flow-Pipe Modell (van der Heijde et al., 2017) ist gleichungsbasiert aufgebaut und berücksichtigt sowohl Wärme-, als auch Strömungsverluste. Das besondere an der implementierten Wärmeverlustberechnung ist die Verwendung einer sogenannten Verweilzeit zur Bestimmung der Zeit, wie lange ein Fluidteilchen braucht, um vom Eintritt zum Austritt zu strömen. Diese Verweilzeit führt zum entsprechenden Wärmeverlust über die Zeit im Rohr. Der Vorteil einer solchen Modellierung liegt in der nicht mehr notwendigen Diskretisierung des Modells, bei Beibehaltung einer ausreichenden Genauigkeit der zeitlichen und räumlichen Auflösung des Rohrmodells.

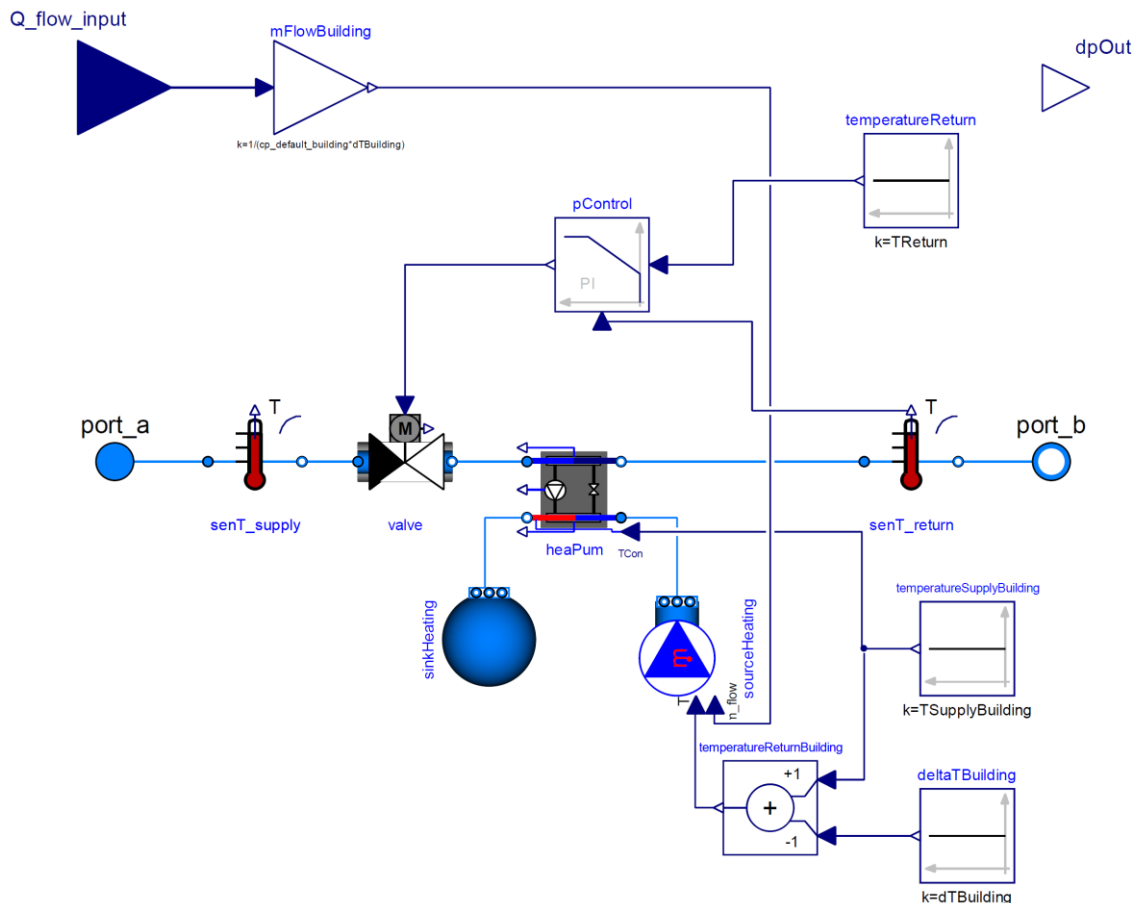


**Abbildung 2: Rohrmodell für die Berechnung des dynamischen Netzbetriebs**

Die zweite und dritte Komponente zur Erstellung und Simulation eines thermo-hydraulischen Netzes sind die Hausübergabestationen sowie das zentrale Einspeisesystem (im Folgenden als Energiezentrale bezeichnet). Da sich im Rahmen der Simulation der verschiedenen Betriebsvarianten der Netze auch die Modelle dieser beiden Komponenten unterscheiden, werden zunächst die Komponenten der Betriebsvariante *zentrale Pumpenversorgung*, anschließend die Komponenten der *dezentralen Pumpenversorgung* und abschließend die verwendeten Modelle der Kombination beider Versorgungsvarianten beschrieben.

## Modelle zur zentralen Pumpenversorgung

Die Hausübergabestationen im zentralen Pumpenversorgungsfall sind von ihrer Funktionsweise stark an konventionellen Hausübergabestationen orientiert. Der entscheidende Unterschied im Vergleich zu konventionellen Übergabestationen besteht im Einsatz einer Wärmepumpe anstelle eines klassischen Wärmeübertragers. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau des Models. Da in diesem Versorgungsfall eine zentrale Pumpe zum Einsatz kommt, wird in der Wärmeübergabestation ein Ventil (valve) mit Rücklauftemperaturregelung berücksichtigt. Dies ermöglicht die Regelung des benötigten Massenstroms über den Verdampfer der Wärmepumpe (heaPum) bei gleichzeitiger Einhaltung einer konstanten Temperaturdifferenz zwischen Vor- (port\_a) und Rücklauf (port\_b) des Netzes. Des Weiteren kommt eine ideale Wärmepumpe mit vereinfachtem Sekundärkreislauf zum Einsatz. Dies ermöglicht das schnelle Bewerten des geplanten Nahwärmenetzes bei Berücksichtigung des sich einstellenden thermo-hydraulischen Betriebs.



**Abbildung 3: Wärmeübergabestation reiner Heizbetrieb**

Die Energiezentrale besteht in diesem Falle aus der zentralen Versorgungspumpe sowie einem idealen Wärmeübertrager. Dieser übernimmt in der Simulation die Aufgabe, eine definierte Vorlauftemperatur für den Netzbetrieb bereitzustellen. Für die Auslegungssimulationen wird die simulierte Temperatur aus Erdeisspeicher und Erdkollektor vorgegeben. Ein Co-Simulationsaufbau mittels FMI Standard wird im Kapitel *Simulationskopplung* beschrieben.

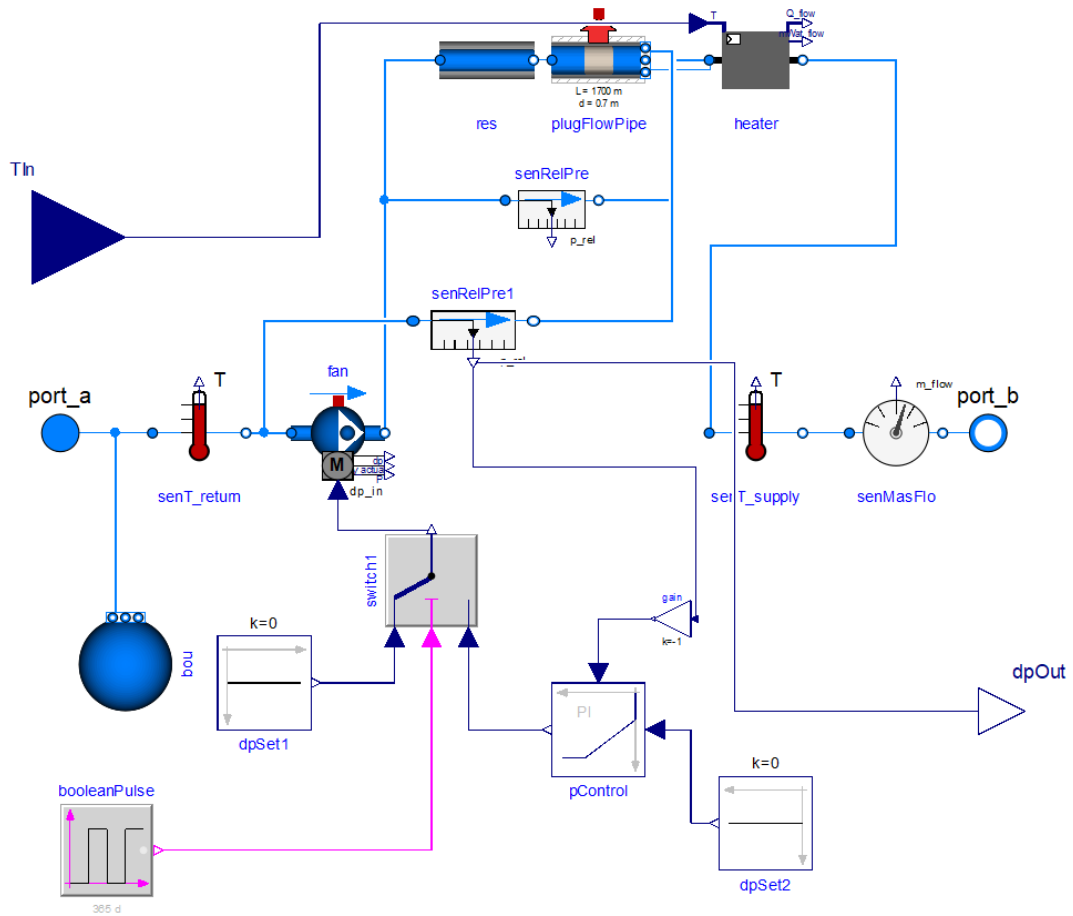
### Modelle zur dezentralen Pumpenversorgung

Die Modelle zur Untersuchung des dezentralen Pumpenszenarios bestehen im Wesentlichen aus einer zentralen Versorgungseinheit sowie den Modellen für die Hausübergabestationen. Der Unterschied besteht darin, dass in der Hausübergabestation anstelle eines Ventils zur Volumenstromregelung eine dezentrale Solepumpe verwendet wird. Diese idealisierte Pumpe wird, ähnlich wie bei der Konfiguration mit Ventil, auf eine Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf geregelt. Die hierfür notwendige Druckerhöhung der Pumpe wird vom Modell berechnet und ideal mit Hilfe eines Wirkungsgrads in eine elektrische Leistung umgerechnet. Das Simulationsmodell der Energiezentrale hingegen besteht lediglich aus einem idealen Wärmeübertrager der eine vorgegebene Vorlauf-temperatur bereitstellt. Auch hier werden für die Auslegungsuntersuchungen die simulierten Temperaturen des Projektpartners EPC herangezogen.

### Modelle zur hybriden Pumpenversorgung

Die Schleswiger Stadtwerke hatten bereits einige Erfahrung mit der Verwendung von dezentralen Solepumpen durch bereits bestehende Netze. Durch diese Erfahrung und mit den Betriebsrandbedingungen der geplanten Wärmepumpen im Gebäude, welche eine eingebaute Sole-Pumpe besitzen, kam die Idee zur zusätzlichen Verwendung einer zentralen Pumpe. Da die geplanten Sole-Pumpen für die bestehende Netzauslegung an ihre Betriebsgrenzen kommen würden, konnte entweder das Netz größer dimensioniert werden oder eine zusätzliche zentrale Pumpe eingebaut werden. Diese sollte zu Starklastzeiten die Versorgungssicherheit der Gebäude erhöhen, indem die Pumpe im Winterbetrieb die auftretenden Druckverluste innerhalb der Energiezentralen überwindet und somit die dezentralen Sole-Pumpen ausschließlich die Druckverluste des Netzes überwinden müssen.

Die Modelle für die Simulation des hybriden Betriebskonzepts sind aus einer Kombination der Simulationsmodelle für den zentralen und dezentralen Auslegungsfall entstanden. Hierbei wird für die Hausübergabestation das gleiche Modell wie im dezentralen Versorgungsfall verwendet. Die Energiezentrale hingegen wird verändert, um das Prinzip und die geplante Umsetzung der zusätzlichen zentralen Pumpe besser abbilden zu können und ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Grundgedanke bei der Versorgung mit einer zusätzlichen zentralen Pumpe ist, dass im Falle großer Lasten, und somit großer Volumenströme und Druckverluste, die dezentralen Pumpen der Hausübergabestationen durch die zusätzliche zentrale Pumpe entlastet werden. Hierbei gleicht die zentrale Pumpe die Druckverluste durch die Erdkollektoren, den Erdespeicher sowie die Anbindungsleitungen durch ihren Betrieb aus. Im Simulationsmodell wird dies durch die Regelung auf eine Druckdifferenz von 0 bar zwischen Vor- und Rücklauf an der Energiezentrale realisiert.



**Abbildung 4: Energiezentrale im hybriden Simulationsfall**

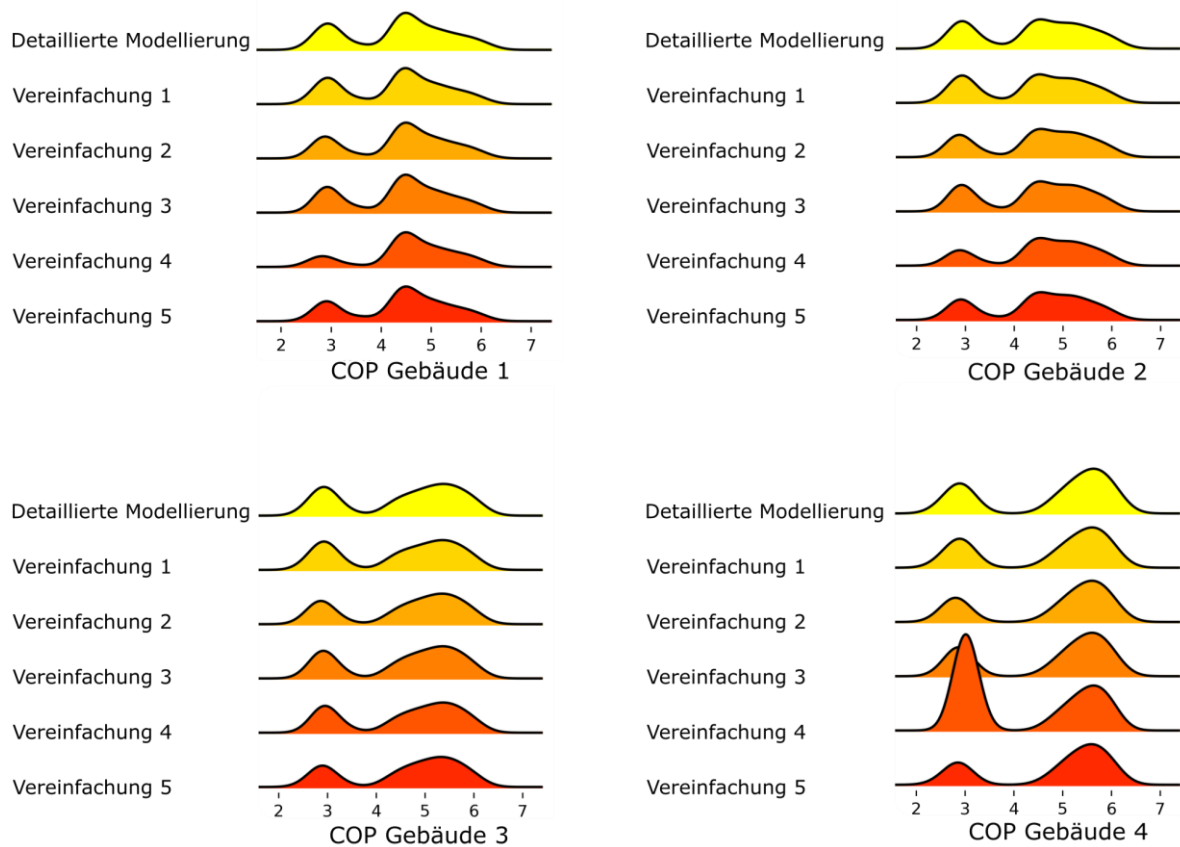
### Modellierungsmöglichkeiten der Hausübergabestationen in unterschiedlichen Detaillierungstiefen

Neben der reinen Simulation des Netzbetriebs werden im Rahmen des Projektes zwei simulative Voruntersuchungen durchgeführt. Zum einen wird die Auswirkung von unterschiedlichen Detaillierungstiefen bei der Modellierung der Gebäudeübergabestation auf den Netzbetrieb untersucht. Zum anderen wird der Einfluss der Modellierung der Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Medium im Rohr des kalten Nahwärmenetzes mit den vorhandenen Modellen untersucht. Da die Durchführung solcher Simulationsstudien mit einem hohen Rechenaufwand verbunden ist, werden die Auswirkungen auf den Netzbetrieb anhand eines kleineren, generischen Netzes durchgeführt. Das Netz, bestehend aus 16 Gebäuden, wurde im Rahmen des internationalen Projekts „IBPSA Project 1“ (<https://ibpsa.github.io/project1/index.html>) zum Testen unterschiedlicher Einflüsse auf mehrere Gebäude im Netzverbund entwickelt (Saelens et al., 2020). Dieser Testfall dient vor allem zur schnellen und allgemeingültigen Analyse verschiedener Einflussfaktoren. Im Folgenden wird zunächst der Einfluss von Trinkwarmwasser exemplarisch getestet. Hierbei wird der Einfluss der unterschiedlichen Berücksichtigung von Trinkwarmwasser im Simulationsmodell hinsichtlich dessen Einflusses auf das Netz und die Wärmepumpe bewertet.

Ziel dieser Untersuchung ist es, ein Simulationsmodell zu identifizieren, welches sowohl eine ausreichende Genauigkeit als auch eine schnelle Rechenzeit für die Bewertung der kalten Nahwärme ermöglicht. Einer der größten Einflussfaktoren auf die Rechenzeit ist die Einbindung von Trinkwarmwasser (TWW) und einem Trinkwarmwasserspeicher in die Gebäudeübergabestation. Die Berücksichtigung von TWW mit Speicher führt zur Verwendung weiterer Simulationsmodelle, welche in unterschiedlicher Detailtiefe modelliert werden können. So kann beispielsweise ein Trinkwarmwasserspeicher mit Hilfe eines ideal durchmischten Volumens überschlägig beschrieben werden, andererseits aber auch mit Hilfe eines hoch diskretisierten, geschichteten Speichermodells. Dieser Einfluss wird im Folgenden anhand von sechs unterschiedlichen Modellierungstiefen der Gebäudeübergabestation untersucht. Die Bewertung erfolgt hinsichtlich der Genauigkeit auf das Simulationsergebnis für das Gesamtsystem wie beispielsweise der Wärmepumpeneffizienz bzw. des benötigten Strombedarfs der Wärmepumpe.

Grundlage zur Bewertung ist zunächst ein Gebäudeübergabestationsmodell mit hoher Detailtiefe. Hierbei erfolgt die Berücksichtigung eines geschichteten Trinkwarmwasserspeichers mit Temperaturregelung für die Betriebsmodi der Wärmepumpe. Sinkt die Temperatur durch Zapfung oder Wärmeverluste des Speichers unterhalb einer Grenztemperatur, wechselt die Wärmepumpe vom Heizbetrieb in den Trinkwarmwasserbetrieb. Hierbei wird der Speicher dann auf eine Solltemperatur erwärmt und in dieser Zeit kann keine Wärmebereitstellung für die Gebäudebeheizung erfolgen. Der Heizkreis ist in diesem Falle als detailliertes System mit Wärmeübergabe an den Raum modelliert. Ausgehend von diesem Modell wird nun in mehreren Schritten das Modell vereinfacht. So wird zunächst die Komplexität des Speichers reduziert bis bei Vereinfachung 4 ein stark abstraktes und vereinfachtes Speichermodell berücksichtigt wird. Zudem ist in Vereinfachung 4 die Wärmeübergabe an den Raum vereinfacht. Die größte Vereinfachung ist in der Modellvariante „Vereinfachung 5“ realisiert. Hier wird die Einbindung eines Trinkwarmwasserspeichers in Modelica direkt vernachlässigt und im Vorfeld anhand der Bedarfe berechnet. So wird ein idealer Speicher angenommen und anhand des Trinkwarmwasserbedarfs und des Heizbedarfs die Zeiten im Jahr bestimmt, in welchen die Wärmepumpe im Trinkwarmwassermodus arbeitet. So wird am Ende ausschließlich der Raumwärmebedarf des Gebäudes sowie die Betriebszeiten für Heizen und Trinkwarmwasser an die Wärmepumpe übergeben. Die Simulationszeiten nehmen im Laufe der Vereinfachungen stetig ab, wobei die Genauigkeit der Ergebnisse im Hinblick auf die Leistungszahl der Wärmepumpe variieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.





**Abbildung 5: Einfluss unterschiedlicher Detaillierungstiefen auf die Effizienz der Wärmepumpe. Die y-Achse zeigt die thermische Leistung und die x-Achse den anliegenden COP. Zu erkennen ist die Abhängigkeit des COP vom Temperaturbereich, für Trinkwarmwasser (ca. 3) und für Raumwärme (zwischen ca. 4 und ca. 6).**

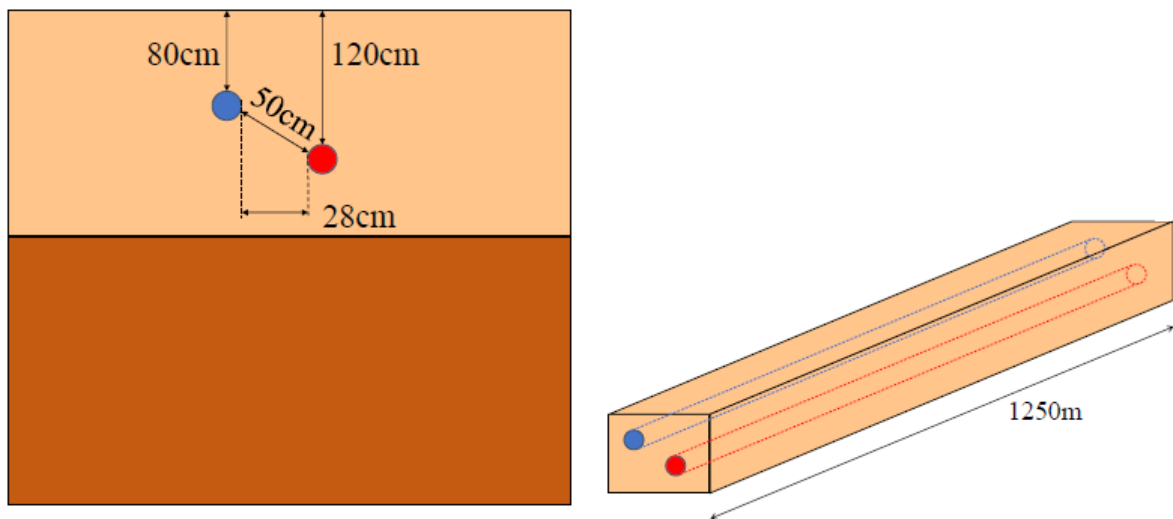
Hierbei wird deutlich, dass beispielsweise mit dem Modell der „Vereinfachung 4“ gerade im Betriebsbereich der Trinkwarmwasser Erwärmung (COP ungefähr 3) ein großer Unterschied zu erwarten ist. Entsprechend dieser Voruntersuchungen konnte jedoch ein geeignetes Modell zur Bewertung der Gesamtsystemeffizienz gefunden und implementiert werden. So wird für die Simulationen im Projekt das Modell der Vereinfachung 5 empfohlen, da dies für das Gesamtsystem ausreichende Genauigkeit liefert und eine kurze Rechenzeit besitzt.

#### Modellierung der Wärmeübertragung mit dem Erdreich

Ein weiterer Auslegungseinfluss, welcher im Zuge des Projektes ErdEis II genauer untersucht wird, ist die Wärmeübertragung des Netzes mit dem umliegenden Erdreich. Da es sich bei der Netzausführung um ungedämmte PE-Rohre handelt, kann das durchströmende Medium zum einen erwärmt, aber auch abgekühlt werden. Dieser Effekt wird durch die Temperaturdifferenz zum umliegenden Erdreich getrieben. Da die Kenntnis über die Wärmegewinne und -verluste durch das Netz eine direkte Auswirkung auf die Dimensionierung der Erdkollektoren und Erdeisspeicher hat, wird auf diesen Einflussfaktor im Folgenden eingegangen. Hierbei wird zunächst eine in Modelica umgesetzte Implementierung der Simulation des Erdreichs mit zwei versetzt verlegten Rohren für einen

beispielhaften Abschnitt des kalten Nahwärmenetzes in Schleswig dargestellt. Anschließend wird auf die Kalibrierung eines vereinfachten Modells zur Anwendung in der Netzsimulation eingegangen, da eine detaillierte Simulation für die Anwendung im gesamten Netz zu rechenintensiv ist.

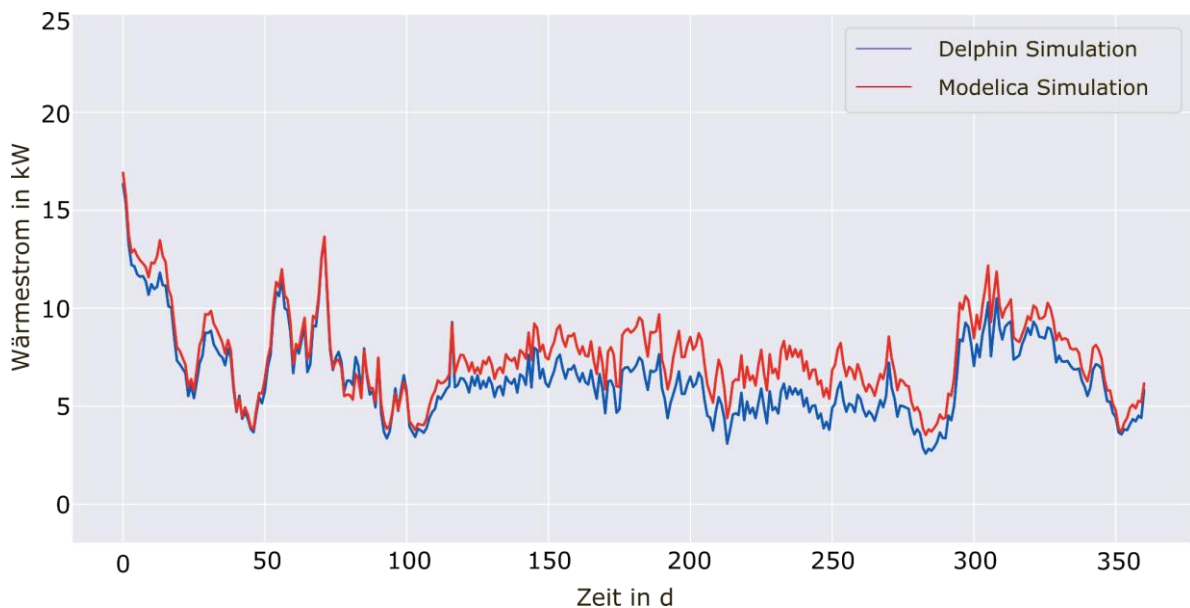
Das Ziel der Implementierung des Erdreichs mit zwei erdverlegten Rohrleitungen ist eine genauere Abschätzung der Wärmegewinne und -verluste gegenüber dem umliegenden Erdreich, als bisher mit der Open-Source Bibliothek AixLib möglich ist. Hierzu wird ein detailliertes Finite Volumen Modell (FVM) in Modelica modelliert und im Anschluss verifiziert. Abbildung 6 zeigt die geometrische Darstellung des Vergleichsaufbaus für die Verifizierung des entwickelten Bodenmodells mit den Delphin Simulationsergebnissen. Der Aufbau ist dem derzeitigen Planungsstand der Verlegetiefe, Rohrabstand und Länge des geplanten kalten Nahwärmenetzes der SSW nachempfunden.



**Abbildung 6: Geometrische Darstellung des warmen und kalten Leiters des Vergleichsaufbaus**

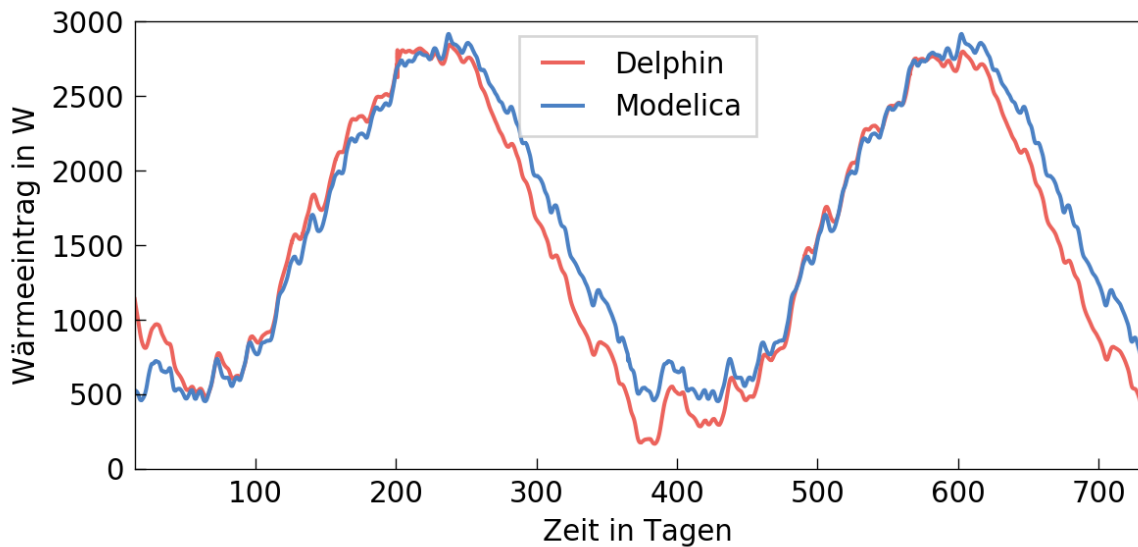
Entsprechend wird eine Verlegetiefe des warmen Leiters von 1,2 m sowie 0,8 m für den kalten Leiter simuliert. Der Abstand beider Leiter beträgt 0,5 m, wodurch die Wärmeübertragung zwischen beiden Leitern einen nicht vernachlässigbaren Einfluss darstellt. Für den Vergleich der Simulationen und der entsprechenden Modellierung eines genaueren Erdreichmodells in Modelica wird der beschriebene Fall modelliert und als Simulationsaufbau verwendet. Die Implementierung des Modells erfolgt in Anlehnung an die Erdreichmodellierung für das Kollektormodel nach (Glück, 2008). Die simulierten Ergebnisse werden mit den Simulationsergebnissen des Delphin Modells verglichen. Untersucht wird der Versuchsfall mit möglichst gleichen Randbedingungen in beiden durchgeführten Simulationen. So sind die Massenströme durch die abgebildeten Rohrleitungen in beiden Simulationen zu jeder Zeit gleich groß. Die Eintrittstemperaturen in den warmen und kalten Leiter sowie die Wetterrandbedingungen an der Oberfläche sind identisch. Die thermischen Eigenschaften des Bodens sind abgeglichen und mit den gleichen Eigenschaften parametrisiert. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 7 dargestellt. Hierbei ist eine gute Übereinstimmung der simulierten Wärmeeinträge über ein Testreferenzjahr zu erkennen. Mit einem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) von 0,95, einem Mittleren Absoluten Fehler (MAE) von 1,14 kW sowie einem „Root Mean Square Error“ (RMSE) von 1,39 kW erreicht die Simulation in Modelica eine gute Übereinstimmung mit dem Modell in Delphin. Die

genaue Modellierung mittels FVM bewirkt höhere Anforderungen an die Hardware sowie erhöhte Rechenzeiten. Für eine Bewertung des Modells hinsichtlich der möglichen Integration in die Gesamtsystemsimulation wurden Rechentests durchgeführt, die einen Vergleich zwischen einer vereinfachten Abbildung des Erdreichs und der vorgestellten detaillierten Erdreichmodellierung ermöglichen. Hierbei ergab sich eine Erhöhung der Simulationszeit bei Verwendung des detaillierten Modells um den Faktor 150. Im Kontext einer integralen Systemsimulation des kalten Wärmenetzes wurde deshalb festgestellt, dass die Berechnung mit Hilfe des detaillierten FV-Modells zu rechenintensiv ist.



**Abbildung 7: Vergleich der Simulationsergebnisse der Wärmeeinträge ins Erdreich zwischen Delphin und Modelica (detailliertes Erdreichmodell)**

Aus diesem Grund wird für die Auslegungssimulationen ein vereinfachtes Erdreich Modell verwendet. Das vereinfachte Erdreich Modell bildet das umgebende Erdreich der Rohrleitung in diskreten Widerständen und Kapazitäten ab. Diese Widerstände und Kapazitäten werden anhand der Erdreichigenschaften im untersuchten Gebiet in Schleswig parametrisiert. Für eine möglichst genaue Abbildung der Wärmegewinne und -verluste aus dem Erdreich wird eine Kalibrierung der Erdreichigenschaften in Modelica durchgeführt. Hierbei wird der Wärmeeintrag in eine Rohrleitung in 1 m Tiefe über einen Zeitraum von 2 Jahren simuliert. Die genaue und hochauflösende Delphin Simulation, welche durch die TUD bereitgestellt wird, dient hierbei als Referenz für das thermische Bodenverhalten. In Modelica wird im Rahmen der Kalibrierung vor allem die Diskretisierung des Erdreichs angepasst. Abbildung 8 zeigt den Verlauf des Wärmeeintrags in eine 100 m Rohrleitung im Vergleich zwischen einer Delphin und einer Modelica Simulation. Es ist eine signifikante Abweichung gerade im Winterfall auszumachen. Dennoch ist die Abweichung für eine erste prototypische Kalibrierung und in Anbetracht der Bewertung verschiedener Auslegungsszenarien in einem annehmbaren Bereich.



**Abbildung 8: Simulierte Wärmeeinträge in eine 100 m Rohrleitung (Wärmegewinn) über 2 Jahre im Vergleich**

#### **Automatisierte Netzmodellerstellung und Vereinfachung für Modelica Modelle**

Zur Simulation und Bewertung thermischer Versorgungsnetze der 5. Generation werden die bereits beschriebenen Modelle der Open-Source Modelica Bibliothek AixLib verwendet. Da ab einer Netzgröße von mehreren angeschlossenen Gebäuden eine händische Erstellung und Parametrierung des Simulationsmodells sehr aufwändig ist, wird im Projekt ErdEis II ein teilautomatisierter Ansatz verfolgt und weiterentwickelt. Hierbei kommt das Open-Source Softwaretool uesgraphs (Fuchs, 2017; Fuchs et al., 2016) zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um ein Graphenframework zur Speicherung von georeferenzierten und semantischen Daten von Versorgungsnetzen. Mit Hilfe dieser Graphendarstellung kann im Anschluss eine automatisierte Simulationsmodellerstellung erfolgen, welche dann simuliert werden kann.

Für die Netzerstellung sind folgende Schritte notwendig:

1. Erstellung einer georeferenzierten Abbildung des Netzes
2. Import der Abbildung in uesgraphs und automatisierte Auslegung des thermischen Netzes mit Bedarfsdaten
3. Export des Netzes in ein Simulationsmodell auf Basis der vorhandenen Informationen
4. Simulation des erstellten Modells mit Hilfe von Dymola oder Export des Modells als FMU zur Co-Simulation

Grundlage für die topologische Erstellung des Netzmodells in ErdEis II ist der Bebauungsplan der Stadt Schleswig für das im Projekt untersuchte Neubaugebiet „Wichelkoppeln“. Abbildung 9 zeigt das geplante Gebiet.



**Abbildung 9: Bebauungsplan des Neubaugebiets „An den Wichelkoppeln“**

Die Abbildung zeigt die einzelnen bebaubaren Parzellen, die geplante Straßenführung sowie das geplante Regenwasserrückhaltebecken. Dort ist die Einbindung des Erdespeichers geplant, da hier die gute Anbindung an die geplante Feuerwache besteht, welche sich durch ihre PVT (Photovoltaik-thermischen) Module zur Regeneration des Eisspeichers eignet und ein Gebiet mit überwiegend feuchten Bodeneigenschaften zur Verfügung steht. Dieser Plan wird mit Hilfe der Open-Source und frei verfügbaren Software QGIS als georeferenzierte Abbildung importiert. Da der Bebauungsplan eine detaillierte Darstellung bereits bestehender Gebäude beinhaltet, können diese genutzt werden, um mit Hilfe von OpenStreetMaps Daten den Plan in das Standardkoordinatensystem WSG 84 zu überführen. Das Ergebnis dieses Imports ist in Abbildung 10 dargestellt.

Maschinenlesbare Daten über die Netzverläufe sind gerade in einer frühen Planungsphase häufig nicht verfügbar. Aus diesem Grund wird hier auf Grundlage des Bebauungsplans der geplante Netzverlauf skizziert. Dies erfolgt mit der Hilfe von Shape-Layern, welche jeweils getrennt für die Gebäudeübergabestationen, das Netz sowie die Einspeisung erstellt werden. Für die Einspeisung sowie die Gebäudeübergabestationen wird eine Punkt Darstellung der jeweiligen georeferenzierten Positionen gewählt. Die Netztopologie wird mit Hilfe von MultilineStrings erstellt. Das Ergebnis dieser Skizzierung der Netztopologie ist in Abbildung 11 dargestellt. Alle drei Layer werden im Anschluss für die automatisierte Auslegung und Simulationsmodellerstellung als GEOJSON exportiert und können so von uesgraphs importiert werden.



**Abbildung 10: Georeferenzierter Bebauungsplan überlagert auf OpenStreetMaps Daten**

Für den Import der oben genannten georeferenzierten Informationen über die Gebäudeübergabestationen, das Netz sowie die Einspeisung wird die vorhandene uesgraphs Version erweitert. Zum einen ist ein Import auf Basis der groben Netzstruktur, siehe Abbildung 11 möglich, zum anderen kann aber auch eine detaillierte Netzstruktur mit allen gezeichneten Gebäudeanschlüssen importiert werden.

Für den automatisierten Anschluss der Gebäudeübergabestationen erfolgt zunächst der Anschluss der Einspeisung an das Netz. Im Weiteren wird das am nächsten gelegene Gebäude aus Sicht der Einspeisung gewählt und in einem möglichst kurzen Anschluss an das vorhandene Netz angeschlossen. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis alle Gebäude an das Netz angeschlossen und somit mit der Einspeisung verbunden sind.

Im nächsten Schritt erfolgt die Zuweisung der Gebäudebedarfsprofile an die Gebäudeknoten. Diese werden zur automatisierten Auslegung der Rohrdurchmesser benötigt. Eine erste überschlägige Auslegung wird hierbei mit Hilfe der maximalen Heizlasten der Gebäude durchgeführt. Diese werden zunächst mit Hilfe eines konstanten COPs auf die entsprechend erforderliche Quellenleistung der, im Haus verbauten, Wärmepumpe umgerechnet. Im Anschluss werden die maximalen Leistungen innerhalb jedes Rohrs des Netzwerks bestimmt, indem ausgehend von jedem Gebäude auf kürzestem Weg zur Einspeisung allen benötigten Kanten (des Graphen) die maximale Leistung des entsprechenden Gebäudes hinzugefügt wird. Anschließend erfolgt die Auslegung der Rohrdurchmesser durch die Berechnung eines angestrebten Druckverlustes in der längsten Rohrleitung. Hierbei wird ein konstanter Reibbeiwert, sowie konstante Fluideigenschaften angenommen, wobei die Berechnung der Durchmesser der restlichen Rohrleitungen so bestimmt wird, dass dort kein höherer Druckverlust auftritt als in der längsten zurückgelegten Strecke des Netzes.



**Abbildung 11: Darstellung der Netztopologie (rote Linie), der Gebäudeübergabestationen (graue Punkte) und der zentralen Einspeisung (roter Punkt mit grauer Umrandung)**

Das Ergebnis des so ausgelegten Netzes ist in Abbildung 12 beispielhaft dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Rohrleitungen nahe der Einspeisung entsprechend größere Durchmesser aufweisen als die weiter entfernten Rohrleitungen. Das so ausgelegte Netz kann im Anschluss mit Hilfe von uesmodels (einem weiteren Python Paket) in ein Modelica Simulationsmodell übersetzt werden. Eine entsprechende Darstellung des automatisierten Ablaufs ist in Abbildung 13 dargestellt. Uesmodels ist eine Erweiterung zum bereits Open-Source veröffentlichten Paktes uesgraphs. Hierbei handelt es sich um ein Modul, welches die Informationen aus uesgraphs verarbeitet und mit Hilfe von sogenannten Mako Templates in Modelica Code übersetzt. Dafür wird zunächst ein Netzmodell mit allen Rohren, Abzweigungen, Abnehmern und Einspeisung erstellt. Dieses Modell wird im Anschluss in ein Systemmodell übersetzt, welches alle relevanten Eingangsgrößen für die Simulation beinhaltet. Dies sind vor allem die Außentemperaturen des untersuchten Gebietes sowie die individuellen Gebäudebedarfe der angeschlossenen Gebäude.

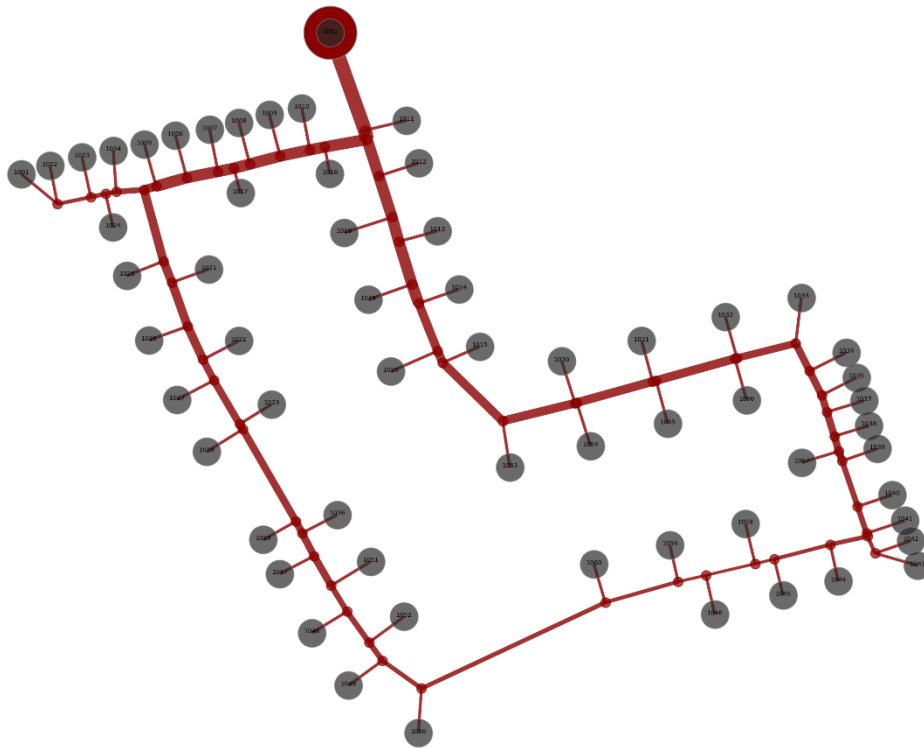


Abbildung 13: Darstellung der Rohrdurchmesser mit Hilfe des Graphenframeworks uesgraphs

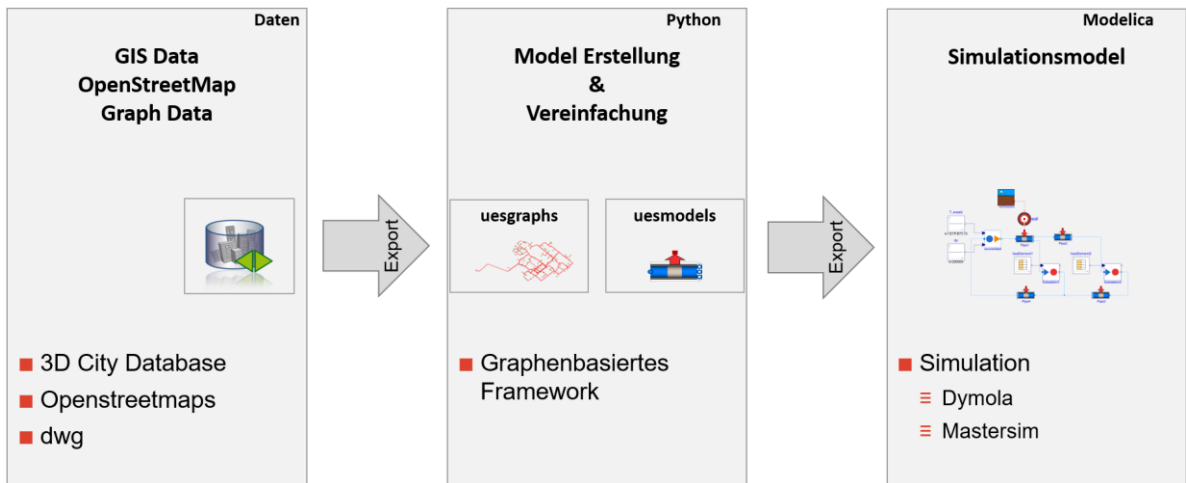


Abbildung 13: Ablauf automatisierte Modellerstellung

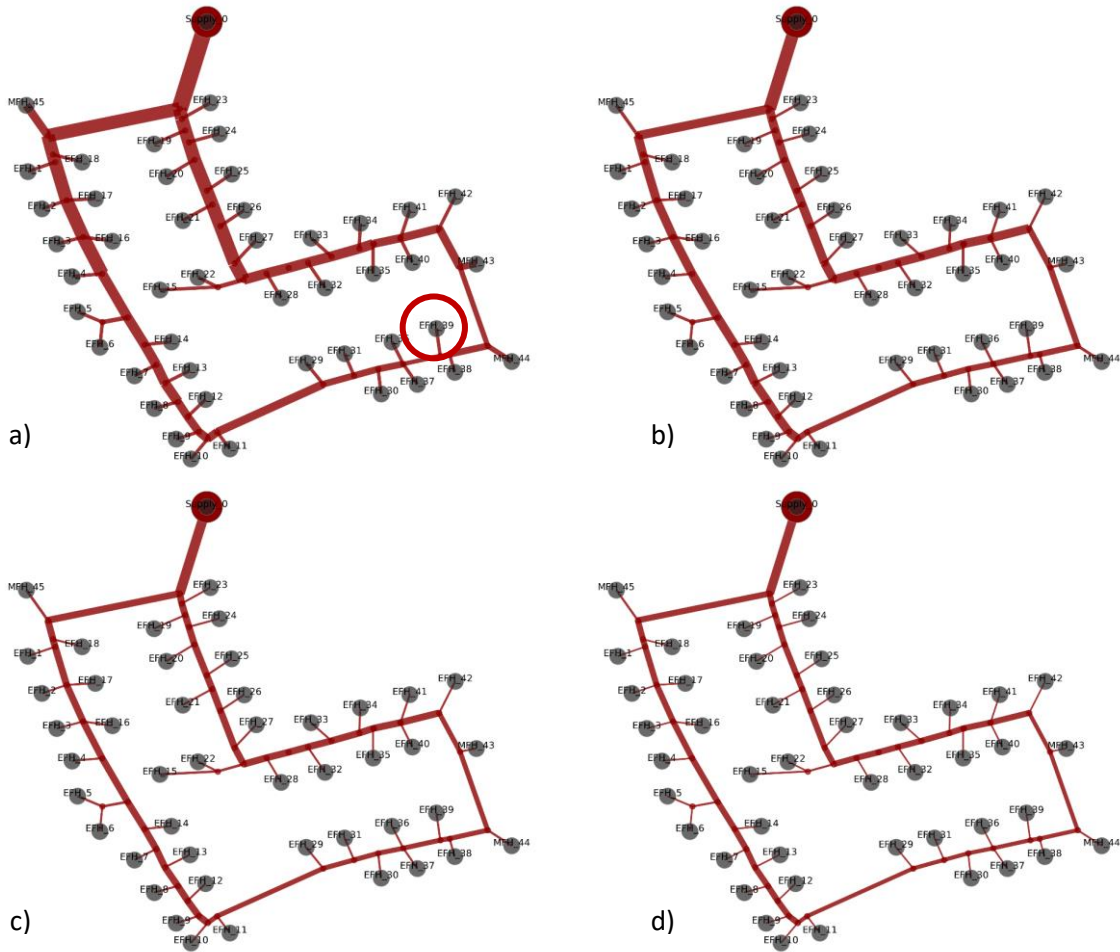


## Untersuchungsszenarien

Im Rahmen der simulationsgestützten Auslegungsoptimierung im Projekt wird zum einen die Berechnung verschiedener Auslegungsvarianten, also auch die Berechnung des Netzbetriebs in einer gekoppelten Co-Simulation, angestrebt. Die Auslegungsszenarien beziehen sich im Wesentlichen auf die Bewertung verschiedener Rohrdurchmesser auf ihre energetische als auch hydraulische Auswirkung im Netzbetrieb. Im Rahmen dieser Rohrdimensionierung wird das Gesamtnetz mit jeweils mehreren Durchmessern in Kombination mit dezentralen Pumpen oder einer zentralen Pumpe bewertet. Nach Wahl einer geeigneten Dimensionierung der Rohrleitungen für die Versorgung mit Hilfe von dezentralen Pumpen wird ein Vergleich zu dieser Rohrdimensionierung in Kombination mit einem Hybridnetz (dezentrale Pumpen in Kombination mit einer zusätzlichen zentralen Pumpe) durchgeführt. Abschließend wird der gewählte Auslegungsfall als gekoppelte Co-Simulation mit mehreren Erdkollektor- und Erdeisspeichermodellen simuliert und im Vergleich zur getrennten Auslegung der Kollektoren und Speicher bewertet.

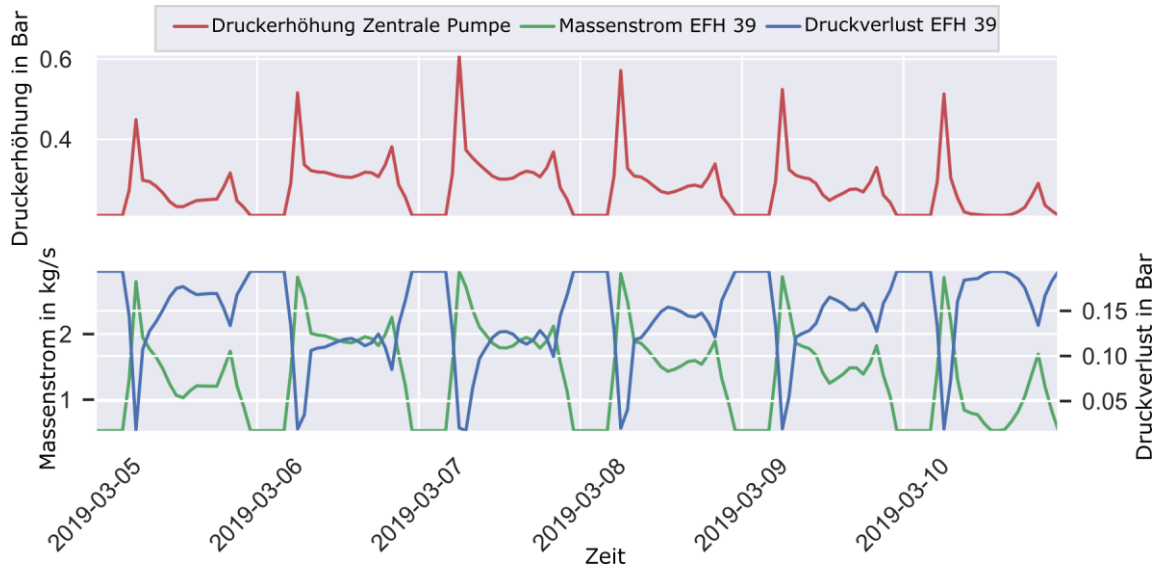
### Auslegungsvarianten

Zur Unterstützung des digitalen Planungsprozesses Kalter Nahwärmenetze werden für das Quartier „An den Wichelkoppeln“ mehrere Simulationsstudien zur Bewertung der Netzhydraulik durchgeführt. Hierbei werden zunächst 4 verschiedene Auslegungsvarianten unterschieden. Abbildung 14 stellt die unterschiedlichen Szenarien dar. Variante a) stellt hierbei eine Auslegungsdimensionierung bei maximalem Heizwärmebedarf aller Gebäude und einem Nenndruckverlust von 100 Pa/m dar. Entsprechend handelt es sich hierbei um die größte dargestellte und simulierte Dimensionierung der Rohre. Variante b) nutzt die durch die SSW vorgeschlagenen Dimensionierung der Rohrleitung. Varianten c) und d) verkleinern diesen Auslegungsvorschlag für jedes Rohrstück um eine bzw. zwei Nennweiten. So werden beispielsweise DN 125 Rohrleitungen zu DN 100, respektive DN 80 Rohrleitungen. Entsprechend handelt es sich bei Variante a) um eine Überdimensionierung und bei Varianten c) und d) um eine Unterdimensionierung im Vergleich zum Referenzauslegungsfall der SSW.



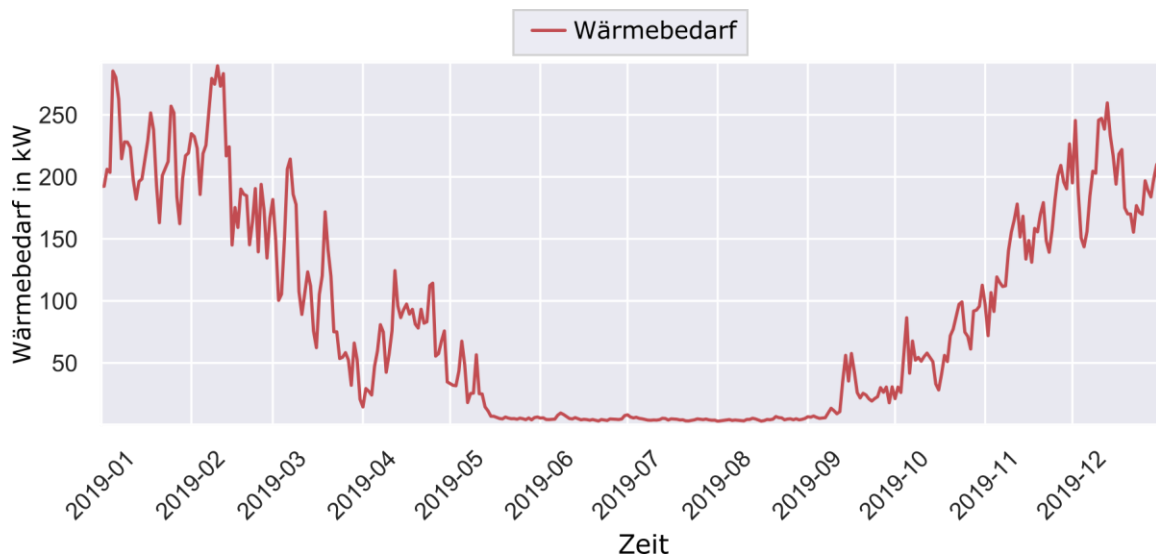
**Abbildung 14: Darstellung der Auslegungsszenarien in großer Rohrdimensionierung (a), Auslegungsfall nach SSW (b), leicht verkleinerter Rohrdimensionierung (c) und stark verkleinerter Rohrdimensionierung (d)**

Die unterschiedlichen Auslegungsszenarien werden für die Bewertung unterschiedlicher Auslegungsvarianten jeweils mit dezentralen Pumpen und einer zentralen Medienpumpe bewertet. Für den zentralen Pumpenfall wird eine Netzschlechtpunktregelung an Gebäude „EFH\_39“ (roter Kreis) realisiert. Dort wird ein konstanter Druckverlust von 0,2 bar über die Gebäudeübergabestation angestrebt und entsprechend der Regelung der zentralen Pumpe übergeben. Die Hausübergabestationen wiederum enthalten ein Regelventil, welches auf die erforderliche Temperaturdifferenz von 3,5 K zwischen Vor- und Rücklauf regelt. Die Funktionsweise der Netzschlechtpunktregelung im zentralen Pumpenfall lässt sich genauer anhand Abbildung 15 erklären. Hierbei ist im unteren Teil der Massenstrom am Netzschlechtpunkt für eine exemplarische Märzwoche dargestellt. Zusätzlich ist der Druckverlust über die Hausübergabestation 39 in blau dargestellt. Gut zu erkennen ist ein Abfall des Druckverlustes bei sich öffnendem Ventil und einer entsprechenden Erhöhung des Massenstroms. Der obere Teil der Abbildung zeigt die entsprechende Druckerhöhung der zentralen Pumpe.



**Abbildung 15: Zentraler Pumpenfall mit Druckerhöhung der zentralen Pumpe, Druckverlust über den Netzschlechtpunkt sowie dem Massenstrom am Netzschlechtpunkt**

Die Regelung der dezentralen Pumpen wird mittels temperaturgeführter Rücklauftemperaturregelung umgesetzt. Hierbei wird eine Temperaturdifferenz über die Gebäudeübergabestation von 3,5 K angestrebt. Die Regelgröße der dezentralen Pumpen ist im Simulationsmodell der Massenstrom, welcher sich entsprechend mit der zugehörigen Druckerhöhung einstellt.



**Abbildung 16: Kumulierte Wärmebedarfe des betrachteten Quartiers**

Für alle Auslegungssimulationen wurde der reine Wärmefall betrachtet. Hierbei wurden die von der TUD bereitgestellten Simulationsergebnisse für Heizwärme und Trinkwarmwasser verwendet. Die entsprechende Darstellung des Gesamtbedarfes des Quartiers ist in Abbildung 16 abgebildet.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Auslegungsszenarien mit einer zentralen Medienpumpe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Bewertet wurden die jährliche Pumparbeit der zentralen Pumpe, die

maximale Druckerhöhung der Pumpe sowie der dabei herrschende Massenstrom. Die Ergebnisse der Simulationen mit dezentralen Pumpen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die maximale Druckerhöhung wird hier zusätzlich mit dem Hinweis, an welcher Gebäudeübergabestation dieser auftritt, angegeben. Da hierbei jede dezentrale Pumpe den entsprechenden Massenstrom fördert, welcher zur Rücklauf temperaturregelung benötigt wird, stellt sich auch dabei eine entsprechende Druckerhöhung ein. Die höchste Druckerhöhung wird jeweils in Gebäude EFH 39 benötigt und der angegebene Massenstrom bezieht sich auf die entsprechende Hausübergabestation.

**Tabelle 1: Vergleich zentrale Versorgungspumpe in unterschiedlichen Auslegungsszenarien**

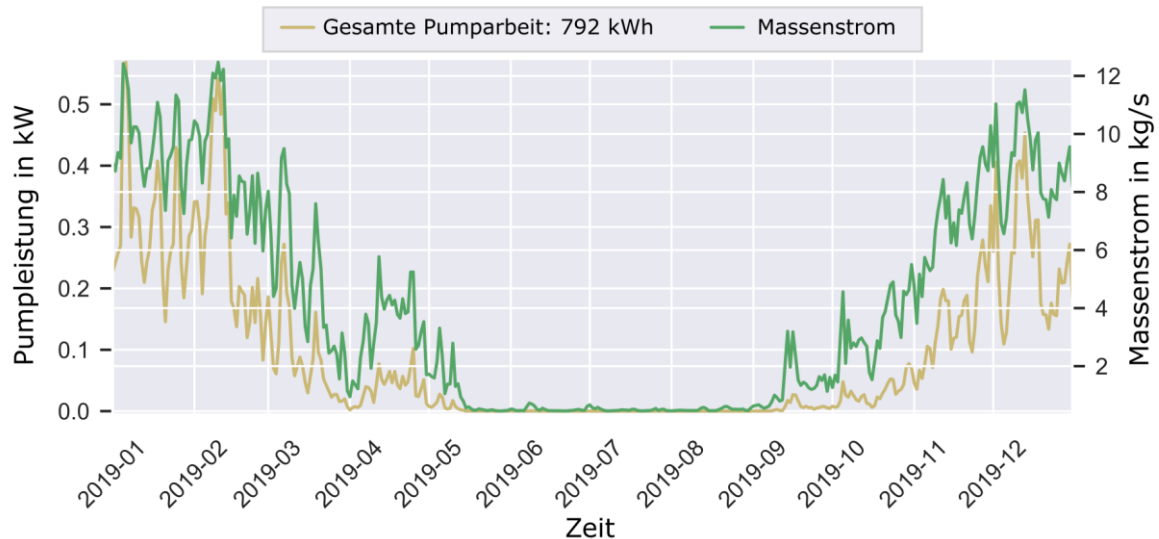
Szenarien	Pumparbeit (kWh/a)	Maximale Druckerhöhung (Bar)	Massenstrom bei maximaler Druckerhöhung (kg/s)
Auslegung SSW	2835	1,01	30,72
Leichte Überdimensionierung	2623	0,92	33,57
Leichte Unterdimensionierung	3519	1,62	29,17
Starke Unterdimensionierung	4234	2,41	27,91

**Tabelle 2: Vergleich dezentrale Versorgungspumpen in unterschiedlichen Auslegungsszenarien**

Szenarien	Pumparbeit (kWh/a)	Maximale Druckerhöhung (Bar)	Massenstrom bei maximaler Druckerhöhung (kg/s)
Auslegung SSW	792	0,66 (EFH 39)	0,49
Leichte Überdimensionierung	533	0,44 (EFH 39)	0,49
Leichte Unterdimensionierung	1460	1,35 (EFH 39)	0,49
Starke Unterdimensionierung	2577	2,87 (EFH 39)	0,49

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass der Auslegungsfall der SSW in beiden Fällen einen guten Kompromiss aus zu erwartender Pumparbeit, Druckerhöhung der Pumpe sowie der gewählten Rohrdurchmesser darstellt. Die leichte Überdimensionierung ermöglicht eine Energieeinsparung, allerdings werden hierbei in einigen Rohren größere Durchmesser benötigt, welche zu erhöhten Kosten führen. Eine kleinere Dimensionierung des Netzes wiederum ist unter den simulierten Randbedingungen nicht zu empfehlen, da hierbei der benötigte Energiebedarf der Pumpen sowie die benötigte Pumpleistung stark ansteigen.

Die gesamte Pumpleistung aller dezentralen Versorgungspumpen sowie der Massenstrom, welcher an der Energiezentrale anliegt, sind in Abbildung 17 dargestellt. Es wurde ein klassischer Wärmeversorgungsfall untersucht, welcher im Sommer bis auf den Trinkwarmwasserbedarf keinen zusätzliche Wärme- oder Kälteanforderung an das Netz stellt. Als weitere Eingangsgröße für die Simulation wurden die simulierten Austrittstemperaturen des Erdespeichers verwendet.



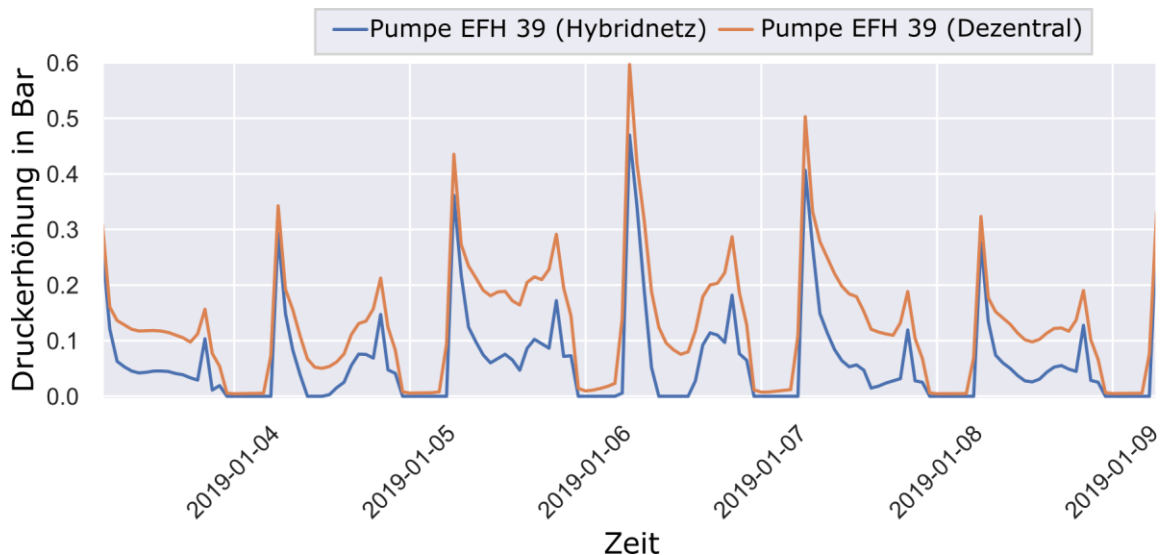
**Abbildung 17: Summe aller mittleren täglichen Pumpenleistungen und des mittleren täglichen Massenstroms an der Energiezentrale**

Auf Basis der durchgeführten Simulationen ist die vorgeschlagene Auslegung des Rohrleitungsnetzes durch die SSW zu empfehlen. Eine im Vergleich leichte Überdimensionierung des Netzes könnte zwar die benötigten Pumparbeiten senken, führt allerdings auch zu erhöhten Kosten für die Rohrleitungen. Dieser Effekt muss zunächst bewertet und abgewogen werden. Die Wahl eines kleineren Durchmessers als von Seiten der SSW geplanten Durchmesser ist nicht zu empfehlen, da hier die Nachteile einer stark erhöhten Pumparbeit und die entsprechend erhöhte Druckerhöhung der Pumpen überwiegen. Die Simulationen zeigen zudem, dass aus energetischer Sicht klar eine dezentrale Pumpenversorgung angestrebt werden sollte. Der Nachteil einer reinen dezentralen Versorgung ist die schwierigere Sicherstellung der Versorgungssicherheit. Die Solepumpen der zum Einsatz kommenden Wärmepumpen haben eine Förderleistung von 1,2 m<sup>3</sup>/h bei einer Förderhöhe von 5,6 mWS. Verglichen mit der benötigten Druckdifferenz am Netzschlechtpunkt von 6,6 mWS im Falle des größten Heizbedarfs könnte hier eine temporäre Unterversorgung des Gebäudes durch eine Pumpenstörung entstehen. Entsprechend ist ein reiner Betrieb mit dezentralen Pumpen aus Sicht der Versorgungssicherheit nicht zu empfehlen.

#### Hybridnetz im Vergleich zur dezentralen Versorgung

Um die Vorteile der dezentralen Pumpenversorgung (geringerer Energiebedarf) in Kombination mit den Vorteilen der zentralen Pumpenversorgung (Versorgungssicherheit) nutzen zu können, wird im Projekt eine simulative Untersuchung eines hybriden Versorgungskonzepts durchgeführt. Hierbei

werden die dezentralen Pumpen durch eine zentrale Pumpe in der Energiezentrale, vor allem zu Starklastzeiten, unterstützt. Der Modellaufbau sowie die Funktionsweise wurde bereits im Unterkapitel „Modellierungsansätze für thermische Netze der 5. Generation“ beschrieben. Für die Simulation wurde die zentrale Pumpe für den Betrieb von Anfang Oktober bis Ende März konfiguriert und unterstützt somit im Starklastfall im Winter. Die hierbei benötigte Gesamtenergiemenge der zentralen sowie der dezentralen Pumpen beträgt 799 kWh und entspricht somit einer Erhöhung um 7 kWh im Vergleich zur Gesamtenergiemenge der reinen dezentralen Versorgung. Die am Netzschlechtpunkt benötigte Druckdifferenz zum Zeitpunkt des größten Wärmebedarfs beträgt in diesem Fall 5,1 mWS und stellt somit eine Reduktion um 1,5 mWS dar. Diese Reduktion ist primär auf den Effekt zurückzuführen, dass die dezentralen Pumpen im Starklastfall nun nicht mehr die Druckverluste der Energiezentrale überwinden müssen, sondern lediglich die Druckverluste der Hausübergabestationen sowie des Netzes überwinden müssen. Der Vergleich für eine exemplarische Woche im Januar ist in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18: Vergleich der Druckdifferenz der dezentralen Pumpe am Netzschlechtpunkt**

Die Umsetzung mittels kombiniertem Pumpenkonzept bietet somit die Möglichkeit, die Vorteile der beiden Versorgungskonzepte zu kombinieren, und ist auf Basis der durchgeführten Simulationen zu empfehlen.

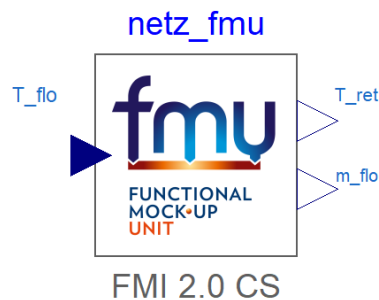
#### Gekoppelte Netzsimulation

Ein weiterer Faktor zur Bewertung des Gesamtsystems der Kalten Nahwärme in Schleswig ist die Bewertung des Zusammenspiels aus Erdeisspeicher, Erdkollektoren und dem kalten Nahwärmenetz. Um eine möglichst genaue und integrale Betrachtung zu ermöglichen, wird im Folgenden die Koppelung der Simulationen des Erdeisspeichers, der Erdkollektoren und des kalten Nahwärmenetzes mittels FMI-Standard („Functional Mock-up Interface“, 2020) beschrieben.

Das „Functional Mock-up Interface“ ist ein freier Standard zum Austausch von Simulationsmodellen zur alleinigen Simulation oder zur Co-Simulation mit weiteren Simulationsmodellen. Der Standard

definiert einen Container sowie Schnittstellen zum Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Simulationsmodellen. Die exportierten Simulationsmodelle werden als „Functional Mock-up Units“ (FMUs) bezeichnet und beinhalten XML-Dateien zur Modellbeschreibung, Binärdateien sowie C-Code, alles gepackt in einem File, der FMU. Ein entsprechendes Beispiel für eine FMU ist in Abbildung 19 dargestellt. Hierbei handelt es sich um das exportierte Simulationsmodell des kalten Nahwärmenetzes mit allen Gebäuden und den entsprechenden Bedarfsprofilen. Zu erkennen sind die Definition von 3 Schnittstellen: einem Input in die FMU und zwei Outputs aus der FMU. In diesem Falle wird die Vorlauftemperatur ( $T_{flo}$ ) als Input in die Netz-FMU definiert. Es wird für die Netzsimulation somit die Vorlauftemperatur aus der Energiezentrale auf Basis der Wärmeübertragung im Erdspeicher sowie der Kollektoren vorgegeben. Als Ausgabeschnittstellen werden die Rücklauftemperatur des Netzes ( $T_{ret}$ ) sowie der Massenstrom an der Energiezentrale ( $m_{flo}$ ) definiert. Diese Werte können als Eingangsgrößen in andere Simulationsmodelle oder als Ergebnisse der Netzsimulation auf Basis der vorgegebenen Vorlauftemperatur verwendet werden.

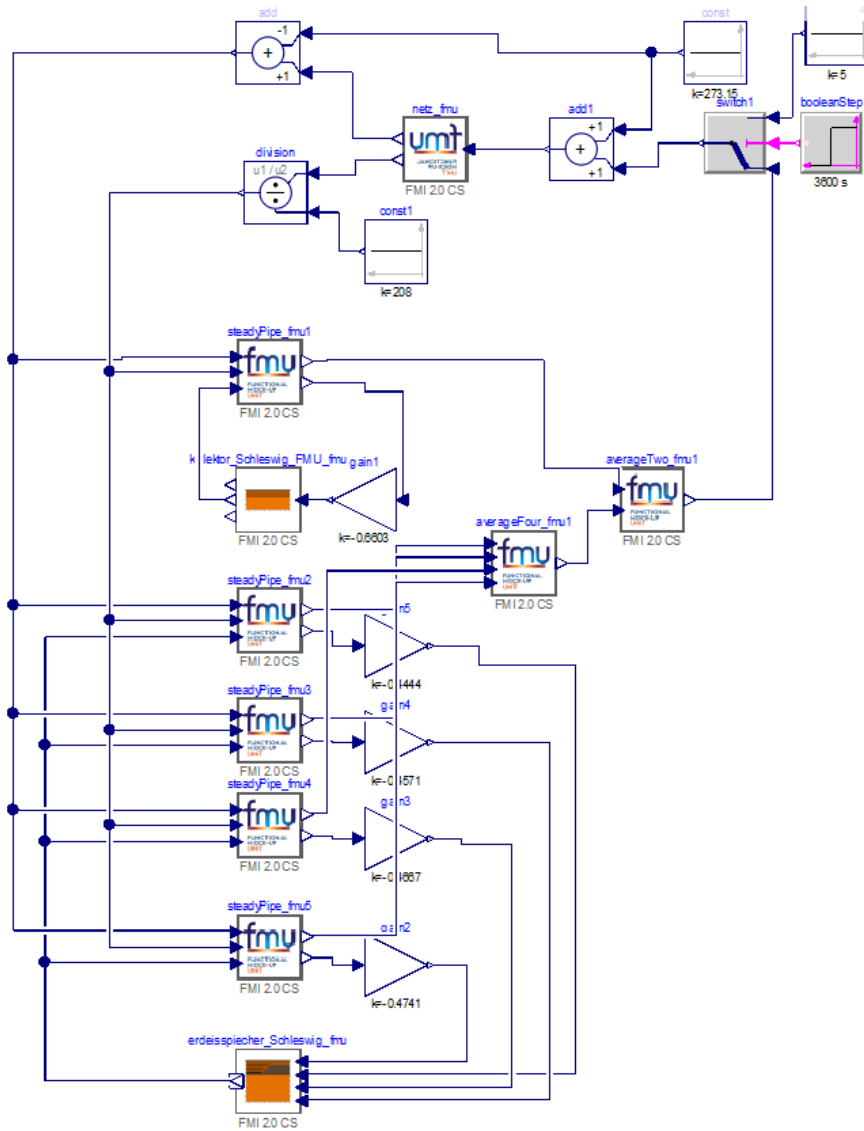
Für die Verwendung dieses Modells in einer gekoppelten Simulation aus Netz-FMU, Erdspeicher und Erdkollektoren werden die oben erwähnten Austauschvariablen verwendet. Erreicht wird so, dass die thermohydraulische Netzberechnung in Kombination mit dem detaillierten Erdreich und Vereisungssimulationen des Delphin Programms kombiniert werden kann. So können die Stärken der jeweiligen Simulationsdomänen ideal genutzt werden.



**Abbildung 19: Exportiertes Netzmodell als FMU**

Der Aufbau einer solchen ganzheitlichen Kopplung der Simulationen ist in Abbildung 20 dargestellt. Hierbei ist im oberen Bereich die bereits vorgestellte Netz-FMU zu erkennen. Zusätzlich werden insgesamt noch eine FMU für die Simulation des Erdspeichers, sowie eine FMU zur Simulation des Erdkollektors verwendet. Außerdem muss zur Berechnung der Temperaturerhöhung des Fluids im Erdkollektor oder Erdspeicher noch ein vereinfachtes Rohrmodell definiert werden, welches die Wärmeübertragung zwischen dem Rohr und dem Erdreich abbildet. Dies wird mit jeweils einer weiteren FMU umgesetzt. Da der Erdkollektor einlagig ausgeführt ist, wird dort nur ein Rohrmodell benötigt. Der Erdspeicher hingegen ist als 4-lagiger Speicher ausgeführt und benötigt somit vier Rohrmodelle zur Berechnung der Fluid-Austrittstemperatur. Die Schnittstellen sowie die voneinander abhängigen Berechnungen können somit wie folgt beschrieben werden: Die Netz FMU übergibt für jeden Zeitschritt die aktuelle Rücklauftemperatur aus dem Netz sowie den aktuellen Massenstrom an der Energiezentrale an eine Erdspeicher FMU sowie eine Erdkollektor FMU. Diese berechnen jeweils die Wärmeübergänge ins Erdreich bzw. in den Erdspeicher. Auf Basis dieser

Berechnung kann im Anschluss für jede Kollektorschicht eine Austrittstemperatur aus der jeweiligen Kollektorebene errechnet werden. Diese Austrittstemperaturen gehen im Anschluss als neuen Input in die Netz FMU. Die dargestellte Schleife erfolgt für jeden Zeitschritt der Simulation und stellt somit eine direkte Kopplung der Einflüsse des Netzes, der Hausübergabestationen sowie der Erdkollektoren bzw. Erdeisspeicher dar.

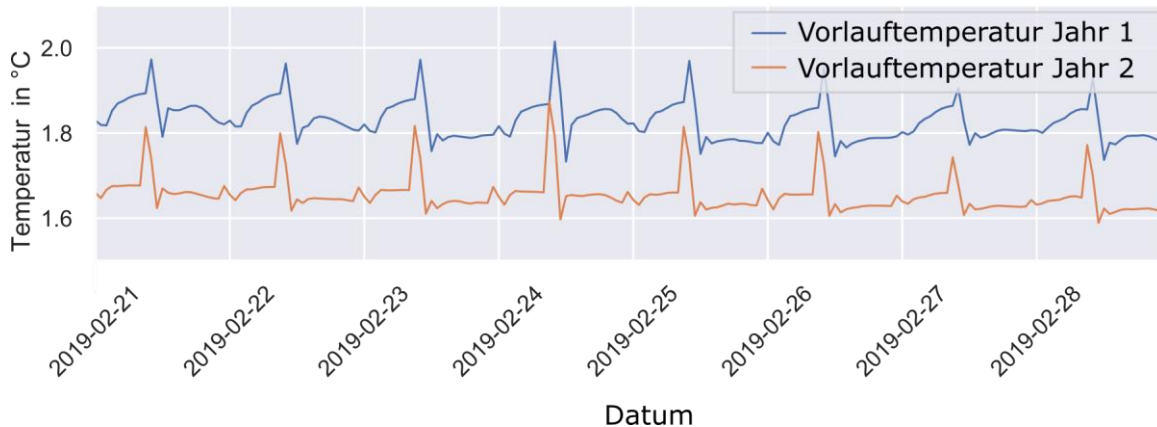


**Abbildung 20: Simulationsaufbau der Co-Simulation von Erdkollektor, Erdeisspeicher und kaltem Nahwärmenetz**

Die gekoppelte Simulation wird im gezeigten Aufbau für insgesamt zwei aufeinanderfolgende Jahre simuliert. So kann ein erster Langzeiteffekt des Bodenverhaltens abgebildet und der Effekt der gekoppelten Simulation bewertet werden.



Dieser Effekt ist in Abbildung 21 dargestellt. Dort wird für eine exemplarische Februarwoche die Vorlauftemperatur des Netzes im ersten Jahr mit der Vorlauftemperatur des Netzes im zweiten Jahr verglichen. Zu erkennen ist das der Einfluss einer homogenen Temperaturverteilung im Boden sichtbar ist und eine andere Vorlauftemperatur im Netz bereitgestellt wird als im Falle des ersten Jahres, bei dem die Ergebnisse noch stark durch die initiale Boden- und Speichertemperatur der Modelle beeinflusst ist.



**Abbildung 21: Vergleich der Vorlauftemperaturen zwischen erstem und zweitem Simulationsjahr**

Die Vorlauftemperaturen im ersten Jahr wurden für die entkoppelte Netzsimulation genutzt und es ist somit ein deutlicher Unterschied erkennbar. Zumal die Temperatur im zweiten Jahr unterhalb der Temperatur im ersten Jahr liegt. Dies führt zu Effizienzeinbußen im zweiten Jahr. So sinkt der Durchschnittliche COP im ersten Quartal des Jahres von Gebäude EFH\_23 (erstes Gebäude nach der Energiezentrale) von 2,42 auf 2,38. Es ist somit im Laufe der Jahre durchaus mit einer Verschlechterung des Betriebs zu rechnen, welcher durch die gekoppelte Systemsimulation bereits in einer frühen Planungsphase mit abgebildet werden kann.

### Zusammenfassung

Für eine nachhaltige und integrale Planung und Auslegung von kalten Nahwärmenetzen wird die Anwendung dynamischer Simulationsmodelle als Planungshilfsmittel immer bedeutender. Zum einen ist es wichtig, die zukünftigen Bedarfe des Quartiers anhand von dynamischen Modellen besser abschätzen zu können. Genauso gewinnt die Simulation der Verteilung sowie der Wärmeabgabe an die Gebäude an Bedeutung, da dies direkte Auswirkungen auf die Auslegung der Wärmebereitstellung des Quartiers hat. Im vorliegenden Fall wird die Wärmeversorgung des Quartiers fast ausschließlich über Erdkollektoren und einem Erdespeicher realisiert. Die genaue Bewertung des Verhaltens dieser Energiequellen in Kombination mit einem realitätsnahen Netzbetrieb ist somit unerlässlich, um eine Über- oder Unterdimensionierung der Quellen zu vermeiden.

Im Projekt ErdEis II besteht die Fragestellung in der Planungsphase des Projektes vor allem aus der ausreichenden Dimensionierung der Quellen sowie der Quantifizierung der Auswirkungen des Netzbetriebs auf die verwendeten Erdkollektoren und Erdespeicher. Um in dieser Phase die

angesprochenen Herausforderungen anzugehen, unterstützte die RWTH Aachen diesen Prozess durch eine thermohydraulische Netzsimulation, welche in Kombination mit Hausübergabestationen inklusive Wärmepumpen einen realitätsnahen Netzbetrieb abbildet. Hierbei wurden zunächst Simulationsmodelle erweitert und neu entwickelt, um den Anforderungen der Simulation eines kalten Nahwärmenetzes gerecht zu werden. Verbunden damit sind detaillierte Simulationsmodelle für die Abbildung des Erdreichs sowie Voruntersuchungen zur notwendigen Detailtiefe der abgebildeten Hausübergabestation durchgeführt worden.

Im Anschluss wurde der hydraulische Auslegungsprozess des Netzes unterstützt, um unterschiedliche Rohrdimensionierung hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit sowie ihrer Versorgungssicherheit bewerten zu können. Exemplarisch wurde dies anhand drei verschiedener Pumpenszenarien bewertet. Zum einen wurde der Fall einer zentralen Versorgungspumpe untersucht, zum anderen wurde das Netz mit dezentralen Pumpen in der Hausübergabestation bewertet. Abschließend wurde eine Kombination aus beiden Varianten bewertet. Die Rohrdurchmesser wurden für die unterschiedlichen Szenarien jeweils an der Auslegung der Schleswiger Stadtwerke orientiert und mit einer Über- und Unterdimensionierung der Rohrleitungen verglichen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Auslegung der SSW aus energetischer Sicht im Vergleich den zweitbesten Fall darstellen. Lediglich eine Vergrößerung der Rohrdurchmesser im Netz erbringt weitere Einsparung an Pumpenergie, welche allerdings mit zusätzlichen Kosten der größeren Rohrleitungen einhergeht.

Der Vergleich der zentralen Pumpen mit den dezentralen Pumpen in den Hausübergabestationen ergab, dass die Verwendung von dezentralen Pumpen zu bevorzugen ist. Allerdings zeigten die Simulationen auch, dass die benötigte Pumpenleistung für den Betriebsfall mit der Rohrdimensionierung der Schleswiger Stadtwerke gerade bei den weit von der Energiezentrale entfernten Gebäuden an die Betriebsgrenzen stoßen oder diese sogar überschritten werden. In einem solchen Falle würde dies zu einer Unterversorgung des Gebäudes, bzw. zu einer erhöhten Auskühlung des Mediums im Netz, führen. Als Lösung für diese Problematik wurde seitens der SSW eine zusätzliche zentrale Pumpe vorgeschlagen. Diese zusätzliche Pumpe unterstützt den Netzbetrieb im Starklastfall durch die Überwindung der Druckverluste in der Energiezentrale und ermöglicht es so, den dezentralen Pumpen die zusätzlichen Druckverluste der Energiezentrale abzunehmen. Hierbei wurde eine Reduktion der notwendigen Druckerhöhung der Pumpe am Netzschlechtpunkt von 0,15 bar auf insgesamt 0,51 bar erreicht. Dieser Betriebspunkt liegt in diesem Falle wieder innerhalb der Betriebsgrenzen (0,56 bar) der dezentralen Pumpen und stellt somit eine erhebliche Verbesserung des Netzbetriebs dar.

Zur integralen Betrachtung des Gesamtsystems des kalten Nahwärmenetzes in Schleswig wurde abschließend ein gekoppeltes Simulationsmodell aus Netz, Erdkollektoren und Erdeisspeichern erstellt und simuliert. Die Kopplung erfolgte hierbei mittels FMI Standard und zeigte die aktuellen Möglichkeiten der Kopplung verschiedener Simulationsmodelle mittels Co-Simulation auf. Hierbei wurde es ermöglicht, das Netzmodell mit den Hausübergabestationen und Wärmepumpen direkt mit den geplanten Erdeisspeichern und Kollektoren zu koppeln. Gezeigt wurde, dass diese Form der Simulationskopplung eine wesentlich höhere Genauigkeit erzielt als die getrennt voneinander durchgeführten Vorsimulationen.

## Zusammengefasste wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse der RWTH Aachen im Projekt *ErdEis II* lassen sich wie folgt zusammenfassen. Zunächst wurden die für eine erfolgreiche Durchführung des Projektes erforderlichen Simulationsmodelle und Methodik analysiert und notwendige Erweiterungen, speziell im Bereich der Nutzung für die Simulation von Wärmenetzen der 5. Generation, durchgeführt. Hierzu zählt die Nutzung des Open-Source und frei verfügbaren Programms *QGIS* zur Erstellung der benötigten Netztopologie auf Basis von OpenStreetMaps Daten und des frei zugänglichen, geplanten Bebauungsplans der Stadt Schleswig. Das so skizzierte Netz wurde mit Hilfe des Geoaustauschdatenformats *GEOJSON* an das Open-Source Tool *uesgraphs* weitergegeben und es kann somit eine graphenbasierte Darstellung der Netztopologie erfolgen. Darüber hinaus wurde das öffentliche Python Paket *uesgraphs* hinsichtlich der automatisierten Auslegung von Wärmenetzen der 5. Generation erweitert und ermöglicht hierbei die Berücksichtigung einer mittleren Leistungszahl von Wärmepumpen zur Rohrdurchmesser-Dimensionierung.

Die automatisierte Erstellung der Netzsimulation mittels des Python Paktes *uesmodels* (open-source Veröffentlichung geplant), wurde hinsichtlich des Exports von Netzmodellen der 5. Generation stark angepasst. So wurden verschiedene Einspeisemodelle und Hausübergabestationen implementiert, welches sich durch ihre Nutzung im Bereich der kalten Nahwärme stark von konventionellen Netzen unterscheiden. Die so erstellten Simulationsmodelle sind voll funktionsfähig und konnten bereits für erste Plausibilitätsstudien zur Effizienz des Gesamtsystems und des Netzbetriebs genutzt werden.

Hinsichtlich der Untersuchung auf unterschiedliche Auslegungseinflüsse wurde vor allem der Einfluss des Trinkwarmwassersbedarfs auf die Gesamtsystemeffizienz untersucht. Hierfür wurden verschiedene Simulationsmodelle in unterschiedlicher Detaillierungstiefe entwickelt und getestet. Es hat sich herausgestellt, dass ein guter Kompromiss zwischen Simulationszeit und Genauigkeit für den Anwendungsfall der Systemauslegung gefunden werden kann.

Im Weiteren wurde der Einfluss der Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Rohrnetz genauer untersucht. Hierbei wurde das in Modelica verwendete Simulationsmodell mit Hilfe des Finite Volumen Modells aus Delphin kalibriert. Hierbei wurde unter anderem die FMI Schnittstelle, welche bereits in diesem Projekt entwickelt wurde, angewendet. Das Ergebnis der Kalibrierung ermöglicht es nun, die Wärmeübertragung zwischen dem im Erdreich verlegten Rohrleitungen genauer zu berücksichtigen. Weitere Untersuchungen und die Entwicklung eines noch genaueren Ersatzmodells in Modelica wurden durchgeführt, konnten allerdings noch nicht für die Anwendung in der Netzsimulation optimiert werden. Die Komplexität des Modells in Kombination mit dem Gesamtsystemmodell führt hierbei zu stark erhöhten Rechenzeiten. Aus diesem Grund muss für zukünftige Arbeiten eine erneute Vereinfachung des Modells angestrebt werden.

Der Fokus der Simulation der RWTH lag im Projekt auf der Unterstützung der hydraulischen Auslegung des Netzes. Hierbei wurde der Einfluss der Rohrdimensionierung auf die benötigte Pumpenergie sowie die dabei auftretenden maximal notwendigen Drücke und die entsprechenden Massenströme untersucht. Es wurden vier verschiedene Rohrdimensionierungen mit jeweils einem zentralen Pumpenfall und einem dezentralen Pumpenfall simuliert. Für beide Simulationsvarianten gilt,

dass der Referenzauslegungsfall der SSW als technisch und wirtschaftlich umsetzbarer Fall angesehen werden kann. Eine Überdimensionierung des Netzes könnte aus hydraulischer Sicht Vorteile bieten, welche mit den zusätzlichen Kosten für größere Nenndurchmesser abgewogen werden sollten. Eine Unterdimensionierung und somit die Wahl kleinerer Rohrdurchmesser ist nach den zugrundeliegenden Simulationen nicht zu empfehlen. Aus energetischer Sicht stellt sich der dezentrale Pumpenfall als der günstigere dar, allerdings bleiben hier die technischen Eigenschaften der dezentralen Pumpen zu prüfen. Ein möglicher Kompromiss könnte ein sogenanntes Hybridnetz, einer Kombination aus dezentralen Pumpen und einer zentralen Zusatzpumpe, sein. Die durchgeführten Simulationen mit einer zusätzlichen zentralen Pumpe, welche die Druckverluste der Energiezentrale, Erdkollektoren und des Erdeisspeichers im Starklastfall überwindet, führten zu einer sichereren Versorgungssituation. Bei einem reinen dezentralen Pumpenbetrieb wurde die Versorgungssicherheit durch die Betriebsgrenzen der geplanten, zum Einsatz kommenden Pumpen begrenzt. Die zusätzliche zentrale Pumpe ermöglicht den Betrieb der dezentralen Pumpen im zulässigen Betriebsbereich und sorgt somit für eine Erhöhung der Versorgungssicherheit.

Zur Bewertung des Gesamtsystems der kalten Nahwärme mit Erdeisspeichern, Erdkollektoren, dem hydraulischen Netz und den angeschlossenen Gebäuden wurde eine gekoppelte Simulation mit Hilfe der FMI Schnittstelle realisiert. Hierbei wurde das Netzmodell mit den angeschlossenen Hausübergabestationen und Wärmepumpen in eine FMU überführt. Die gleiche Überführung in eine FMU wurde für die DELPHIN Simulationsmodelle für den Erdeisspeicher und den Erdkollektor realisiert. Alle drei Modelle wurden mittels Co-Simulation zu einer gekoppelten Simulation verbunden. Hierbei konnte eine erhebliche Verbesserung der Genauigkeit der Simulation im Vergleich zu den getrennten Simulationsdurchführungen erzielt werden. Hierbei werden die Einflüsse des trägen und zugleich komplexen Erdreichmodells direkt an die Netzsimulation und somit mit der Wärmebereitstellung in den Gebäuden gekoppelt. Diese Art der Simulationsdurchführung ist gerade im Bereich der Wärmenetze 5. Generation ein großer Fortschritt und sollte in zukünftigen Arbeiten weiterhin angestrebt werden.

## **Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die wissenschaftlichen Ergebnisse konnten im Rahmen des IBPSA Project 1 vorgestellt werden.

Mögliche Nutzer sind andere Wissenschaftlicher und Planer von kalten Nahwärmenetzen für Liegenschaften. Die im Projekt verwendeten Simulationsmodelle sind open-source verfügbar und werden unter anderem im Rahmen der AixLib Bibliothek weiterentwickelt (<https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>). Die Werkzeuge TEASER (<https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>) und uesgraphs (<https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs>) zur automatisierten Erstellung von Gebäudemodellen bzw. thermischen Netzmodellen sind ebenfalls open-source verfügbar.

Einem breiteren Publikum werden wesentliche Erkenntnisse des Projektes bekannt über:

- über die Homepage des Fördernehmers
- über die EnArgus-Homepage

- über die Projektlandkarte der Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN *Energie in Gebäude- und Quartieren*
- durch die Einbeziehung der Projektergebnisse (insbesondere integrale Planung von Liegenschaften) in die Lehre der RWTH Aachen in den Fakultäten Maschinenbau und Bauingenieurwesen
- eine Veröffentlichung des Modellierungsworkflows in einer renommierten Fachzeitschrift: <https://doi.org/10.3390/en15124372>

## Literaturverzeichnis

Fuchs, M. (2017). Graph Framework for Automated Urban Energy System Modeling. Retrieved from [www.eonerc.rwth-aachen.de](http://www.eonerc.rwth-aachen.de)

Fuchs, M., Teichmann, J., Lauster, M., Remmen, P., Streblov, R., & Müller, D. (2016). Workflow automation for combined modeling of buildings and district energy systems. *Energy*, 117, 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.023>

Functional Mock-up Interface. (2020). Retrieved October 26, 2020, from <https://fmi-standard.org/>

Glück, B. (2008). Simulationsmodell Erdwärmekollektor: zur wärmetechnischen Beurteilung. Retrieved from <http://www.berndglueck.de/Erdwaermekollektor>

Müller, D., Lauster, M., Constantin, A., Fuchs, M., & Remmen, P. (2016). AIXLIB – AN OPEN-SOURCE MODELICA LIBRARY WITHIN THE IEA-EBC ANNEX 60 FRAMEWORK. (November), 3–9.

Saelens, D., De Jaeger, I., Bünning, F., Mans, M., Maccarini, A., Garreau, E., ... Helsen, L. (2020). Towards a DESTEST: a District Energy Simulation Test Developed in IBPSA Project 1. *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*, 16, 3569–3577. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210806>

van der Heijde, B., Fuchs, M., Ribas Tugores, C., Schweiger, G., Sartor, K., Basciotti, D., ... Helsen, L. (2017). Dynamic equation-based thermo-hydraulic pipe model for district heating and cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 151, 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.072>

Wetter, M., & Van Treeck, C. (2017). New Generation Computational Tools for Building and Community Energy Systems Annex 60 Final Report. Retrieved from <http://www.iea-annex60.org/downloads/iea-ebc-annex60-final-report.pdf>

## 6.2 Hygrothermische Bodenmodellierung

Verfasser: TU Dresden, Institut für Bauklimatik

Ergänzend zu Kapitel 2.1.1.6 wird hier die hygrothermische Bodenmodellierung detaillierter beschrieben.

### 1. Allgemeines

Eine der Forschungsfragen ist, wie die hygrothermischen Materialeigenschaften von Böden angemessen charakterisiert werden können. Angemessen bedeutet hier: Die Materialcharakterisierung sollte den Anforderungen moderner Simulationswerkzeuge entsprechen, und das Verfahren sollte schnell, sicher und einfach zu bedienen sein. Daher wurde im Berichtszeitraum eine Software "Soil-Generator" entwickelt, die wesentliche Teile des Verfahrens automatisieren kann. Da Microsoft Excel weit verbreitet ist und die Funktionalität für den hier geforderten Zweck ausreicht, wurde als Nutzeroberfläche (GUI) MS Excel genutzt und auf eine separat programmierte Oberfläche verzichtet. Die Funktionen sind als VisualBasic-Makros implementiert.

Folgende Schritte müssen für ein Bodenmaterial durchlaufen werden:

- Erzeugung einer feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeitsfunktion,
- Optimierung der DELPHIN-GAUSS-Funktion für die Feuchtespeicherung,
- Umrechnung der Wasserrückhaltefunktion / hydraulische Leitfähigkeit,
- Erstellung und Export einer Materialdatei (\*.m6).

Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten durch Simulation des Wasseraugversuchs,

Als Datenquellen wurden verwendet:

- Van Genuchten-Parameter (Van Genuchten, 1980) der in (Carsel & Parrish, 1988) angegebenen Wasserretentionsfunktion / hydraulischen Leitfähigkeit,
- Wassergehalt / Dichte / Wärmeleitfähigkeit / Wärmekapazität nach (Ramming, 2007),
- Abschätzung der Diffusionswiderstände unter Verwendung von Referenzmaterialien aus der DELPHIN-Materialdatenbank.

Das entwickelte Umwandlungsverfahren wird auf die gebräuchlichsten Bodentypen angewendet, die nach ihren Schluff-, Sand- und Tonanteilen in (Duarte, Rodrigues, & Pinho, 2017) klassifiziert sind, d.h. Sand, lehmiger Sand, sandiger Lehm, Lehm, Schluff, Schlicklehm, sandiger Lehmlehm, Tonlehm, Schlicklehm, sandigem Lehm, sandigem Lehm, schlammigem Lehm und Ton (siehe Abbildung 1).

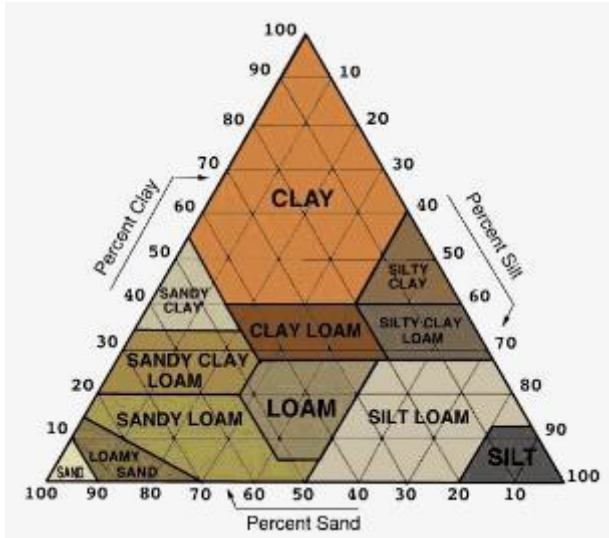


Abbildung 1: USDA Bodenklassifikation nach USDA (Abdelfattah & Shahid, 2007),  
Quelle: <http://epidote.wvgs.wvnet.edu/enviro/lab5.html>

## 2. Auswertung der Eingabedaten

Die Schluff-, Sand- und Tonanteile (percentages)  $p_{Silt}$ ,  $p_{Sand}$  and  $p_{Clay}$  sowie die van-Genuchten-Parameter  $\theta_{res}$ ,  $\theta_{sat}$ ,  $\alpha$ ,  $n$  and  $K_{sat}$  der Böden müssen wie in Tabelle 1 angegeben werden. Die SoilGenerator-Software analysiert alle Zeilen der Tabelle und führt die entsprechenden Umrechnungsvorgänge durch.

Tabelle 1: Bodenparameter nach (Carsel & Parrish, 1988) als Eingabedaten

Soil	$P_{Silt}$	$P_{Sand}$	$P_{Clay}$	$\theta_{res}$	$\theta_{sat}$	$\alpha$	$n$	$K_{sat}$
	-	-	-	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1/cm	-	cm/h
Sand	0.04	0.93	0.03	0.045	0.43	0.145	2.68	29.700
Loamy Sand	0.13	0.81	0.06	0.057	0.43	0.124	2.28	14.592
Sandy Loam	0.26	0.63	0.11	0.065	0.41	0.075	1.89	4.421
Loam	0.4	0.4	0.2	0.078	0.43	0.036	1.56	1.042
Silt	0.85	0.06	0.09	0.034	0.46	0.016	1.37	0.250
Silty Loam	0.65	0.17	0.18	0.067	0.45	0.02	1.41	0.450
Sandy Clay Loam	0.19	0.54	0.27	0.1	0.39	0.059	1.48	1.308
Clay Loam	0.37	0.3	0.33	0.095	0.41	0.019	1.31	0.258
Silty Clay Loam	0.59	0.08	0.33	0.089	0.43	0.01	1.23	0.071
Sandy Clay	0.11	0.48	0.41	0.1	0.38	0.027	1.23	0.121
Silty Clay	0.48	0.06	0.46	0.07	0.36	0.005	1.09	0.021
Clay	0.3	0.15	0.55	0.068	0.38	0.008	1.09	0.200

Die Schluff-, Sand- und Tonanteile bilden die Grundlage für die Berechnung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(\theta)$  nach einem Modell aus (Cote & Konrad, 2005), Gl. (1). Das van-Genuchten-

Modell (Van Genuchten, 1980), Gl. (2) - (3) wird zur Erstellung der Wasserrückhaltekurve (water retention curve)  $\theta_l(S_e)$  und der hydraulischen Leitfähigkeit (conductivity)  $K_h(\theta_l)$  verwendet. Die sekundären Größen sind die relative (normierte) Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_r(\theta_r)$ , der Sättigungsgrad  $S_e(\psi)$ , das Matrixpotential  $\psi(p_c)$  und die relative hydraulische Leitfähigkeit  $K_r(\theta_r)$ .

$$\lambda(\theta_l) = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) \cdot \lambda_r(\theta_l / \theta_{sat}) + \lambda_{dry} \quad (1)$$

$$\lambda_r(\theta_r) = 4.7 \cdot \theta_r / (1 + 3.7 \cdot \theta_r)$$

$$\lambda_{dry} = \lambda_{Matrix}^{0.59 \cdot (1 - \theta_{sat})} \cdot \lambda_{Air}^{0.73 \cdot \theta_{sat}}$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_{Matrix}^{(1 - \theta_{sat})} \cdot \lambda_{Water}^{\theta_{sat}}$$

$$\lambda_{Matrix} = p_{Silt} \cdot \lambda_{Silt} + p_{Sand} \cdot \lambda_{Sand} + p_{Clay} \cdot \lambda_{Clay}$$

$$\theta_l(S_e) = S_e \cdot (\theta_{sat} - \theta_{res}) + \theta_{res} \quad (2)$$

$$S_e(\psi) = (1 + (\alpha \cdot \psi)^n)^{-m}; m = 1 - 1/n$$

$$\psi(p_c) = p_c / (\rho_l \cdot g)$$

$$p_c = 10^{pC}$$

$$K_h(\theta_l) = K_r(\theta_l / \theta_{sat}) \cdot K_{sat} \quad (3)$$

$$K_r(\theta_r) = \theta_r^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - (1 - \theta_r^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (4)$$

Die verwendeten Parameter und Konstanten sind:

- $\theta_l$  Liquid water content in  $m^3/m^3$
- $\theta_{res}$  Residual water content in  $m^3/m^3$
- $\theta_{sat}$  Saturation water content in  $m^3/m^3$
- $\alpha$  Horizontal curve shift parameter in  $1/cm$
- $n$  Slope parameter
- $K_{sat}$  Saturated hydraulic conductivity in  $cm/h$
- $p_c$  Capillary pressure in  $Pa$
- $\rho_l$  Density of liquid water ( $=1000 \text{ kg}/m^3$ )
- $g$  Gravity constant ( $=9.81 \text{ m}/s^2$ )
- $pC$  Log. capillary pressure ( $=0...10 \text{ log}(Pa)$ )
- $\lambda_{Air} = 0.026; \lambda_{Water} = 0.556 \text{ W}/m^2K$
- $\lambda_{Silt} = 3.5; \lambda_{Sand} = 4.5; \lambda_{Clay} = 2.5 \text{ W}/m^2K$

Für Schluff sind die Ergebnisse der Berechnung der jeweiligen Materialfunktionen in Abbildung 2 bis Abbildung 4 dargestellt.



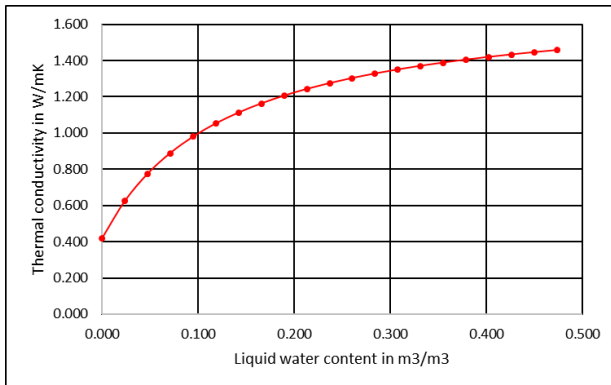


Abbildung 2: Wärmeleitfähigkeit von Schluff

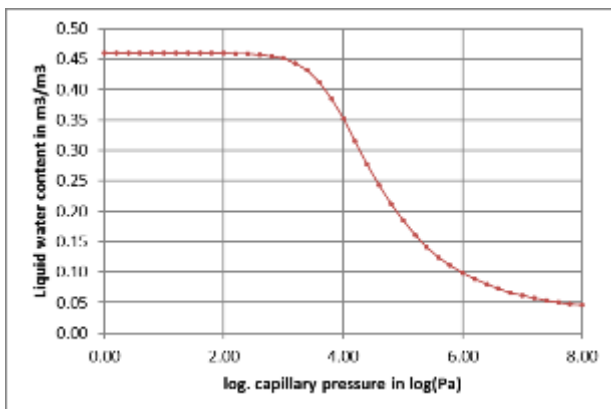


Abbildung 3: Feuchtespeicherfunktion von Schluff

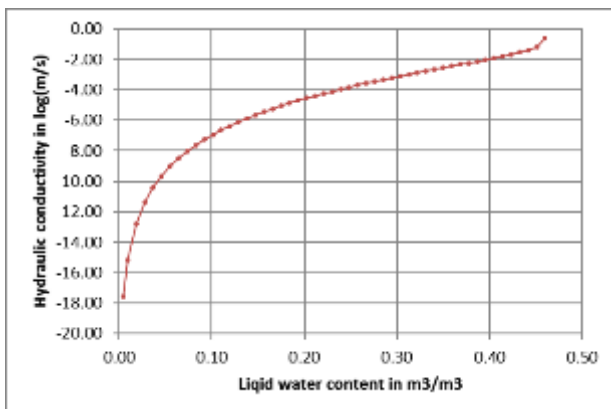


Abbildung 4: Hydraulische Leitfähigkeit von Schluff

### 3. Approximation der Feuchtespeicherfunktion

Normalerweise trocknen Böden nie ganz aus; zumindest ist dieser Fall für die praktische Bodenphysik nicht von Interesse. In der gebäudebezogenen Bauphysik ist die Situation anders. Baustoffe sollten in der Regel trocken bleiben, um Feuchtigkeitsschäden zu vermeiden. Daher wird der Restwassergehalt in der Bauphysik nicht verwendet und ist in der Software DELPHIN kein Materialparameter. Stattdessen wird die Sorptionsisotherme  $\theta_s(\varphi)$  experimentell bestimmt, um die Feuchtespeicherung

in Baustoffen bei niedrigen Wassergehalten (oder Feuchtegehalten) in Bezug auf die relative Feuchte zu charakterisieren. Die Feuchtespeicherfunktion  $\theta_l(pC)$  in der Bauphysik kombiniert die Wasserretentionskurve (überhygroskopischer Bereich) und die Sorptionsisotherme (hygroskopischer Bereich). Beide Funktionen sind durch eine Gleichgewichtsannahme zwischen der flüssigen und der dampfförmigen Phase im Baustoff verbunden, die durch die Kelvin-Gleichung (5) ausgedrückt wird.

$$p_c(\varphi) = -\rho_l R_v T \cdot \ln(\varphi) \quad (5)$$

$\varphi$  Relative humidity

$R_v$  Specific gas constant of water vapour (=462 J/kgK)

$T$  Temperature in K

Die Verwendung der Wasserretentionskurve  $\theta_l(S_e)$  im Original verursacht zwei Probleme: 1) die konstanten Werte im Bereich  $pC=[0...2]$  schaffen ein numerisch ungünstiges Problem (kleine Änderungen des Wassergehalts führen zu großen Änderungen des Kapillardrucks) und 2) es gibt einen Restwassergehalt  $\theta_l(\varphi=0)=\theta_{res}$ .

Daher wird die Wasserretentionskurve durch eine dreimodale Gaußsche Normalverteilung approximiert, die einen stetig abnehmenden Verlauf der Feuchtespeicherfunktion gewährleistet. Gleichung (6) ist die Porenvolumenverteilung und ihr Integral (7) ist die Feuchtespeicherfunktion.

$$\frac{d\theta_l}{dpC}(pC) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\Delta\theta_{l,i}}{\sqrt{2\pi} \cdot S_i} \cdot \exp\left(-\frac{(pC_i - pC)^2}{2 \cdot S_i^2}\right) \right] \quad (6)$$

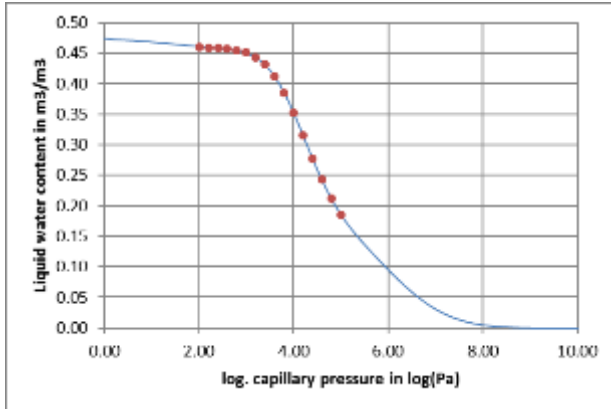
$$\theta_l(pC) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\Delta\theta_{l,i}}{2} \cdot \left( 1 + \operatorname{erfc}\left(\frac{pC_i - pC}{\sqrt{2} \cdot S_i}\right) \right) \right] \quad (7)$$

$N$  Modalität (=3)

$pC_i$  Maxima in der Porenvolumenverteilung

$S_i$  Standardabweichungen

$\Delta\theta_{l,i}$  Differentielle Plateauwerte

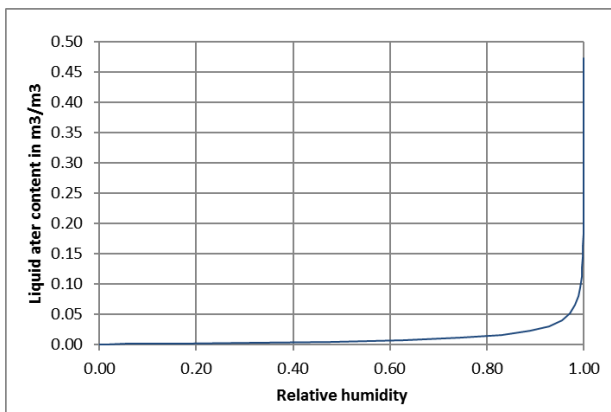


**Abbildung 5: Feuchtespeicherfunktion von Schluff**

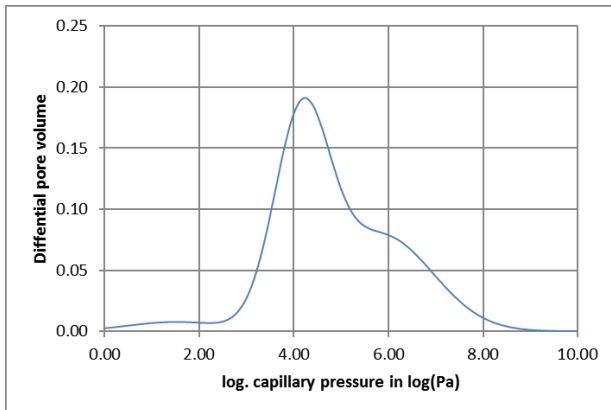
Die erste Modalität wird zur Modellierung der Kurve im gesättigten Bereich  $pC = [0...2]$  verwendet, die zweite Modalität approximiert die Wasserretentionskurve im überhygroskopischen Bereich  $pC = [2...5]$  und die dritte Modalität modelliert eine Sorptionsisotherme im hygroskopischen Bereich  $pC = [5...10]$ . Die Approximation der Feuchtespeicherfunktion von Schluff durch Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (unter Verwendung des Excel-Lösers) ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die Werte der aus den van-Genuchten-Parametern generierten Wasserretentionskurve werden nur im überhygroskopischen Bereich verwendet (durch rote Punkte dargestellt). Die optimierte Feuchtespeicherfunktion ist im gesamten Feuchtebereich gegeben, was durch die blaue durchgezogene Linie dargestellt wird.

Mit den ermittelten Parametern der Feuchtespeicherfunktion lassen sich die Verläufe der Sorptionsisotherme (Abbildung 6) und der Porenvolumenverteilung (Abbildung 7) leicht ableiten.



**Abbildung 6: Sorptionsisotherme von Schluff**



**Abbildung 7: Porenradienverteilung von Schluff**

Es ist zu beachten, dass die effektive Sättigung in der Bauphysik, die die maximale (langfristige) Sättigung darstellt, etwas höher sein sollte als der Sättigungswassergehalt in der Bodenphysik, der als kapillare (kurzfristige) Sättigung interpretiert wird. Wir verwenden die allgemeine Annäherung  $\theta_{eff} = 1.03 \cdot \theta_{sat}$  für alle Böden, solange kein besserer Ansatz verfügbar ist.

Die berechnete effektive Sättigung dient als maximaler Wassergehalt der Feuchtespeicherfunktion (7), d.h. die Summe der Differentialplateauwerte muss gleich der effektiven Sättigung gemäß Definition in (8) sein, die durch eine der zusätzlichen Randbedingungen des mathematischen Optimierungsproblems bereitgestellt wird.

$$\sum_{i=1}^N \Delta\theta_{l,i} = \theta_{eff} \quad (8)$$

Um Konvergenzfehler bei der numerischen Simulation zu vermeiden, sollte die mathematische Optimierung der Feuchtespeicherfunktion zusätzliche Randbedingungen beinhalten. Beispielsweise können die Standardabweichungen so begrenzt werden, dass ein Minimum nicht unterschritten wird, so dass ein kontinuierliches Porenspektrum erhalten wird. Die zusätzlichen Randbedingungen (9) vermeiden flache Plateaus in der Feuchtespeicherfunktion und liefern eine kontinuierlich abnehmende Funktion.

$$S_i > S_{min} \rightarrow \frac{d\theta_i}{dpC}(pC) > 0 \quad (9)$$

Die abgeleitete Feuchtespeicherfunktion  $\theta(pC)$  wird verwendet, um einen Datensatz von 101 äquidistanten Wertepaaren für den Bereich von  $pC = [0...10; \text{Schrittweite } 0.1]$  zu erzeugen, der in die DELPHIN-Materialdatei exportiert wird.

#### 4. Erzeugung der Flüssigwasserleitfähigkeitfunktion

Die Flüssigwasserleitfähigkeit  $K_l(\theta_l)$  in (10) ist etwas anders definiert als die hydraulische Leitfähigkeit  $K_h(\theta_l)$  in (11). In der Bauphysik ist die Massenflussdichte  $j_l$  der Flüssigkeit (Einheit  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) mit dem Gradienten des Kapillardrucks  $\nabla p_c$  verbunden, während in der Bodenphysik die volumetrische Flussdichte  $v_l$  der Flüssigkeit (Einheit  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ ) mit dem Gradienten des Matrixpotentials  $\nabla h$  verbunden ist. Dabei entspricht die volumetrische Flussdichte einer Geschwindigkeit.

$$j_l = -K_l \cdot (\nabla p_c + \rho_l g) \quad (10)$$

$$v_l = -K_h \cdot (\nabla h + 1) \quad (11)$$

Beide Größen können ineinander konvertiert werden mittels

$$j_l = \rho_l \cdot v_l$$

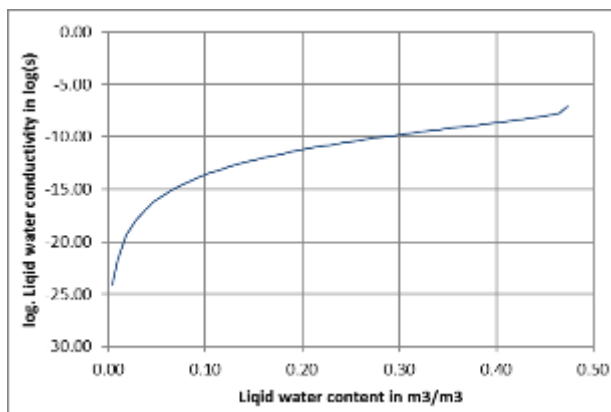
$$p_c = \rho_l g \cdot h$$

$$K_l = K_v / (100 \cdot 3600 \cdot g)$$

$$K_{eff} = K_{sat} / (100 \cdot 3600 \cdot g) \quad (12)$$

$$K_l(\theta_l) = K_r(\theta_l / \theta_{eff}) \cdot K_{eff} \quad (13)$$

Gleichung (13) in Kombination mit (4) und (12) wandelt die (in der Einheit von  $\text{cm}/\text{h}$  angegebene) hydraulische Leitfähigkeit  $K_h(\theta_l)$  (in  $\text{cm}/\text{h}$ ) in die Leitfähigkeit  $K_l(\theta_l)$  von flüssigem Wasser in der Einheit  $\text{s}$  um (das entspricht einer vertikalen Verschiebung in dekadisch-logarithmischer Skala). Abbildung 8 zeigt die resultierende Flüssigwasserleitfähigkeit von Schluff.



**Abbildung 8: Flüssigwasserleitfähigkeit von Schluff**

Die abgeleitete Flüssigwasser-Leitfähigkeitsfunktion  $K_l(\theta_l)$  wird wieder verwendet, um einen Datensatz mit 101 äquidistanten Wertepaaren für den Bereich  $\theta_l = [0 \dots \theta_{eff}; \text{Schrittweite } \theta_{eff}/100]$  zu erzeugen, der in den entsprechenden Abschnitt der DELPHIN-Materialdatei übertragen wird.

## 5. Generieren der Wasserdampfleitfähigkeit

In der Bauphysik wird der Transport der Dampfphase als wichtig angesehen und muss zusätzlich zum Flüssigwassertransport berücksichtigt werden. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze (Versionen des Fickschen Gesetzes) zur Modellierung der Dampfdiffusion. Thermodynamische Überlegungen (Grunewald, 1997), (Jischa, 1982), (Stephan & Mayinger, 1988) führen zu dem Schluss, dass die treibende Kraft der Massendiffusion der Gradient des chemischen Potentials der jeweiligen Massenkonzentration bei konstanter Temperatur ist. In unserem Fall ist dies der Gradient des chemischen Potentials des Wasserdampfes  $\nabla\mu_{ch,v}(p_v, p_g, T)_T = \text{const.}$

Der Gradient des chemischen Potentials kann in zwei unabhängige treibende Kräfte aufgeteilt werden, den Partialdruckgradienten  $\nabla p_v$  des Wasserdampfes und den Gesamtdruckgradienten  $\nabla p_g$  der Gasphase.

$$\nabla\mu_{ch,v}(p_v, p_g, T)_{T=\text{const}} = \frac{\partial\mu_{ch,v}}{\partial p_v} \nabla p_v + \frac{\partial\mu_{ch,v}}{\partial p_g} \nabla p_g \quad (14)$$

Der zweite Term auf der rechten Seite von Gleichung (14) ist der Druckdiffusionsstrom, der als Teil des konvektiven Dampfstroms betrachtet wird. Mit dem ersten Term kann ein Fall des Fickschen Gesetzes (15) zur Modellierung des Dampfdiffusionsflusses aufgestellt werden, das für nicht-isotherme Probleme gilt.

$$j_{v,diff} = -K_v \cdot \nabla p_v \quad (15)$$

Gleichung (15) definiert die Wasserdampfleitfähigkeit  $K_v(\theta_l, T)$ , die eine direkte Eingabe in die DELPHIN-Materialdatei ist.

In der Literatur werden üblicherweise Diffusionskoeffizienten definiert, um Diffusionsprozesse zu beschreiben. Unter Verwendung des Partialdruckgradienten von Wasserdampf und des allgemeinen Gasgesetzes würde die entsprechende Gleichung lauten:

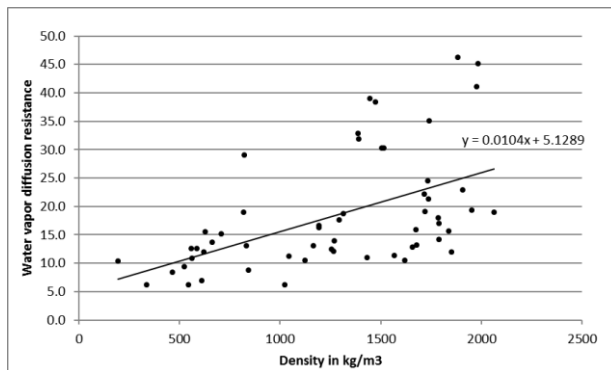
$$j_{v,diff} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu_v R_v T} \cdot f(\theta_l) \cdot \nabla p_v \quad (16)$$

Zu beachten ist, dass  $D_{v,air}(T)$  der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in ruhender Luft ist, und  $\mu_v$  der Dampfdiffusionswiderstandsfaktor, der die Auswirkungen von Porosität und Tortuosität der Materialien berücksichtigt. Die Funktion  $f(\theta_l)$  modelliert die Auswirkungen der Blockierung von Poren durch flüssiges Wasser und Diffusions-"Abkürzungen", die durch Flüssigkeitsinseln erzeugt werden. Nach (Schirmer, 1938) ist der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in freier Luft von der Temperatur abhängig, aber der Faktor  $D_{v,air}(T)/T$  ist nahezu konstant. Folglich kann die Dampfleitfähigkeit nur als feuchtigkeitsabhängige Funktion  $K_v(\theta_l)$  mit zwei Parametern betrachtet werden:  $\mu_v$  und  $f(\theta_l)$

Für die Erzeugung der feuchteabhängigen Wasserdampfleitfähigkeit von Böden vernachlässigen wir die „Diffusionskurzschlüsse“, die durch Flüssigkeitsinseln erzeugt werden, und nehmen den einfachsten Ansatz  $f(\theta_l) = (\theta_{eff} - \theta_l) / \theta_{eff}$ , der nur die Blockade von Porenräumen berücksichtigt. Diese

Funktion ist in DELPHIN6 als "Standard"-Fall implementiert. Dann ist der einzige noch zu bestimmende Parameter die Dampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu_v$ .

Dampfdiffusionswiderstandszahlen werden in der Bodenphysik nicht gemessen, sind aber in der Bauphysik verfügbar und für die Simulationsparameter notwendig. Daher müssen wir sie abschätzen, indem wir eine Beziehung zu einer bekannten Eigenschaft des Bodens herstellen, nämlich der Rohdichte. Da  $\mu_v$  die Auswirkungen der Porosität berücksichtigt, kann erwartet werden, dass  $\mu_v$  proportional zur Rohdichte ist. Diese Annahme wurde anhand von gemessenen Materialdaten des bauphysikalischen Forschungslabors des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden überprüft, die in der Materialdatenbank DELPHIN6 verfügbar sind. Insgesamt wurden 19 Ziegel und 45 Putze / Mörtel analysiert (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor von 19 Ziegeln und 45 Putzen im Bezug zur Rohdichte**

$$\mu_{soil} = 0.0104 \cdot \rho_{soil} + 5.1289 \quad (17)$$

Die sich daraus ergebende Gleichung (17) wird in Kombination mit tabellarischen Daten zur Bodendichte in Tabelle 2 verwendet, um die Wasserdampfleitfähigkeit von Böden zu ermitteln. Der Datensatz in Tabelle 2 basiert auf Messungen an den klassifizierten Böden von 15 deutschen Standorten. Deren Durchschnittswerte werden als Eingabe in (17) verwendet, und die erhaltenen Bodenwerte werden in den Abschnitt Transportbasisparameter der Materialdatei eingefügt.

**Tabelle 2: Rohdichte von Böden nach (Ramming, 2007)**

Reference location	Sand	Loamy Sand	Sandy Loam	Loam	Silt	Silty Loam	Sandy Clay Loam	Clay Loam	Silty Clay Loam	Sandy Clay	Silty Clay	Clay
1 Bremerhaven	1513	1517	1524	1816	1822	1820	1537	1820	1823	1820	1820	1821
2 Rostock	1512	1516	1523	1815	1820	1819	1535	1820	1823	1820	1820	1821
3 Hamburg	1513	1517	1524	1816	1821	1820	1537	1820	1823	1820	1820	1821
4 Potsdam	1511	1515	1522	1814	1820	1818	1534	1819	1823	1820	1820	1821
5 Essen	1513	1517	1525	1816	1822	1820	1537	1820	1823	1820	1820	1821
6 Bad Marienberg	1514	1518	1526	1817	1822	1821	1539	1821	1824	1821	1820	1821
7 Kassel	1512	1516	1523	1815	1821	1819	1536	1820	1823	1820	1820	1821
8 Braunlage	1514	1518	1527	1817	1823	1821	1539	1821	1824	1821	1820	1821
9 Chemnitz	1512	1515	1522	1815	1820	1818	1535	1819	1823	1820	1820	1821
10 Hof	1512	1516	1523	1815	1821	1819	1536	1820	1823	1820	1820	1821
11 Fichtelberg	1513	1517	1525	1816	1822	1820	1538	1821	1823	1820	1820	1821
12 Mannheim	1512	1515	1522	1815	1820	1819	1535	1819	1823	1820	1820	1821
13 Passau	1512	1517	1524	1816	1821	1820	1537	1820	1823	1820	1820	1821
14 Stötten	1513	1517	1525	1816	1822	1820	1538	1820	1823	1820	1820	1821
15 Garmisch-Patenk.	1513	1517	1525	1816	1822	1820	1538	1821	1823	1820	1820	1821
Average	1513	1517	1524	1816	1821	1820	1537	1820	1823	1820	1820	1821

**Erzeugen und Export der DELPHIN-Materialdatei**

Mit dem in den vorhergehenden Abschnitten dieses Papiers beschriebenen Verfahrens wird die erste Version einer DELPHIN5 / DELPHIN6-Materialdatei erzeugt (Abbildung 10).

DELPHIN6-Materialdateien sind ASCII-Dateien, unterteilt in Abschnitte für Identifikation, Basisparameter, Speicher- und Transportfunktionen. Die durch das Schlüsselwort FUNCTION identifizierten Datensätze sind die generierte Feuchtespeicherfunktion, ihre Umkehrfunktion, die Flüssigwasserleitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. In Simulationsprojekten interpoliert DELPHIN6 die gegebenen numerischen Daten der Funktionen durch kubische Splines. Das hat den Vorteil, dass jedes valide Modell zur Erzeugung von Materialfunktionen verwendet werden kann.

Die Software SoilGenerator exportiert die Daten automatisch in eine Materialdatei "soil.m6", sobald alle Funktionen generiert sind.



[IDENTIFICATION]				
NAME =	Silt			
PRODUCER =	EN: Data transformed from Mualem / Van Genuchten Model			
LABORATORY =	EN: PHD Thesis by Klaus Ramming, Dresden, 2007			
DATE =	08.10.2019			
COLOUR =	#ffffff00			
FLAGS =	AIR_TIGHT			
CATEGORY =	SOIL			
COMMENTS =	EN: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktorin			
HATCHING =	0			
[STORAGE_BASE_PARAMETERS]				
RHO =	1821 kg/m3			
CE =	1345 J/kgK			
THETA_POR =	0.474 m3/m3			
THETA_EFF =	0.474 m3/m3			
THETA_80 =	0.000 m3/m3			
[TRANSPORT_BASE_PARAMETERS]				
LAMBDA =	0.42 W/mK			
AW =	kg/m2s05			
MEW =	24.07 -			
[MOISTURE_STORAGE]				
FUNCTION =	Theta_l(pC)_de			
0.00E+00	2.00E-01	4.00E-01	6.00E-01	8.00E-01
4.74E-01	4.72E-01	4.71E-01	4.70E-01	4.69E-01
FUNCTION =	pC(Theta_l)_de			
1.33E-05	2.78E-05	5.64E-05	1.11E-04	2.10E-04
1.00E+01	9.80E+00	9.60E+00	9.40E+00	9.20E+00
[MOISTURE_TRANSPORT]				
FUNCTION =	lgKI(Theta_l)			
0.00E+00	4.74E-03	9.48E-03	1.90E-02	2.84E-02
-2.41E+01	-2.41E+01	-2.17E+01	-1.93E+01	-1.79E+01
[HEAT_TRANSPORT]				
FUNCTION =	lambda(Theta_l)			
0.00E+00	2.37E-02	4.74E-02	7.11E-02	9.48E-02
4.18E-01	6.24E-01	7.74E-01	8.89E-01	9.79E-01

**Abbildung 10: Auszug aus der DELPHIN6-Materialdatei für Schluff**

## 6. Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

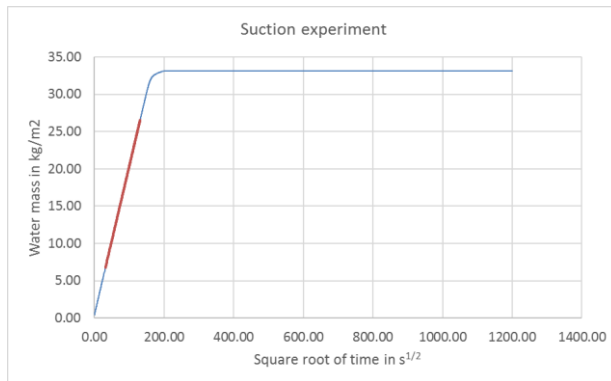
Der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_w$  ist zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt (in Abbildung 10 ausgelassen). Daher wird zunächst ein Standardwert von 1 kg/m2s angenommen, um eine gültige Materialdatei für die hygrothermische Simulation zu erstellen.

Da eine gültige Flüssigwasserleitfähigkeit gegeben ist, ist die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nicht zwingend erforderlich. Korrekte Simulationsergebnisse würden erhalten, wenn die Materialdatei mit diesem Stand verwendet wird. Andererseits sind Parametervariationen manchmal von Interesse. In diesem Fall muss der Wasseraufnahmekoeffizient im Voraus richtig bestimmt werden.

Es kann gezeigt werden, dass die Beziehung (18) so lange gilt, wie die Feuchtespeicherfunktion unverändert bleibt. Der Faktor  $k$  in (18) kann durch ein simuliertes Wasseraufnahme- (Aufsaug-)Experiment, wie in (Plagge, Scheffler, & Grunewald, 2005) beschrieben, bestimmt werden (Abbildung 11).

$$K_{eff} = k \cdot \frac{A_w^2}{\theta_{eff}} \quad (18)$$

Mit einer gegebenen Leitfähigkeitsfunktion für Flüssigwasser und einem berechneten Wasseraufnahmekoeffizienten aus der simulierten Wasseraufnahme (als Funktion der Quadratwurzel der Zeit) wird der Faktor  $k$  festgelegt. Dann kann eine Parametervariation von  $A_w$  in eine Skalierung von  $K_i(\theta_i)$  umgewandelt werden. Diese Möglichkeit besteht in der DELPHIN5-GUI ist, wenn sowohl  $A_w$  als auch  $K_i(\theta_i)$  in der Materialdatei angegeben sind.



**Abbildung 11: Simulierter Wasseraufnahmeversuch von Schluff**

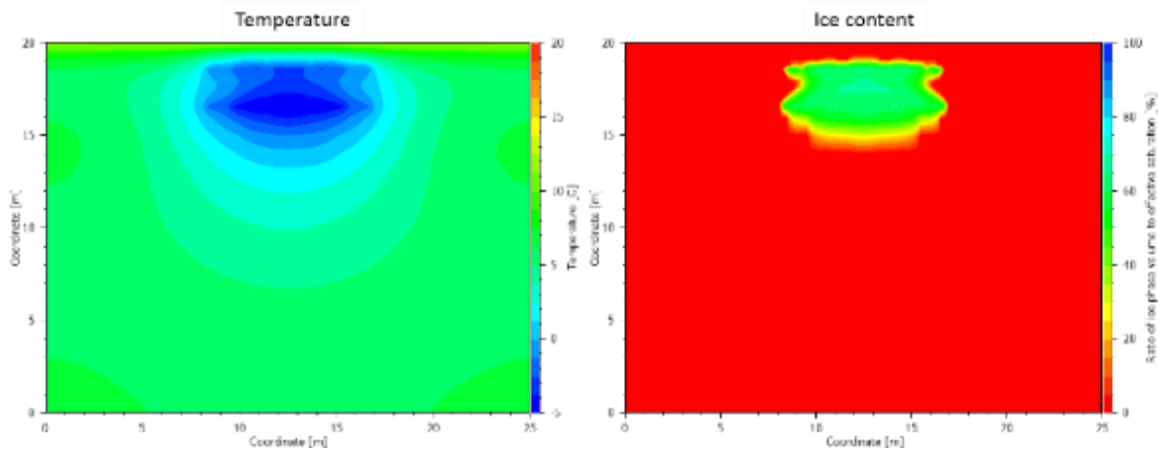
Im SoilGenerator wird eine DELPHIN5-Projektvorlage eingerichtet, in der eine Materialprobe von 7 cm Höhe diskretisiert und der Bodenoberfläche eine Wasserkontakt-Randbedingung zugewiesen wird. Die Seitenflächen werden als adiabatisch und wasserdicht betrachtet. Die Oberseite ist diffusionsoffen.

In der Projektvorlage werden die Platzhalter der Materialreferenz und des Ausgabedateinamens durch die jeweiligen Bodendaten ersetzt, die Projektdatei exportiert und der DELPHIN5-Solver aufgerufen, um den Prozess der Wasseraufnahme zu simulieren. Danach analysiert der SoilGenerator automatisch die Ausgabedatei, um den Wasseraufnahmekoeffizienten des Bodens zu bestimmen. Schließlich wird die Materialdatei mit dem korrekten Wasseraufnahmekoeffizienten aktualisiert und erneut in das Zielverzeichnis exportiert.

## 7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die auf Excel-Basis implementierte Software SoilGenerator ermöglicht die schnelle und komfortable Generierung von Bodeneigenschaften gemäß der Materialdateispezifikation für die Simulationssoftware DELPHIN. Ein Paket mit der SoilGenerator Version 1.3.2, dem DELPHIN5-Solver und drei vom Solver benötigten dynamischen Link-Bibliotheken (dlls) ist frei verfügbar.

Gegenüber den bisher verwendeten Materialsätzen zeigt sich ein numerisch stabileres Verhalten in Simulationen. Als Beispielprojekt zeigt Abbildung 12 die Temperatur- und Eisgehaltsfelder eines Bodens zu einem Zeitpunkt im Winter.



**Abbildung 12: Temperatur- und Eisgehaltsfeld einer Bodensimulation mit einem Kollektorfeld (Simulationsgröße 20 x 25 m)**

Ein noch zu klärender Punkt ist, dass die Leitfähigkeit des flüssigen Wassers nur aus den van-Genuchten-Parametern bestimmt wird. Möglicherweise könnte ein zusätzlicher Kalibrierungsschritt erforderlich sein, um eine bessere Qualität der Flüssigwasserleitfähigkeit zu erhalten. Eine experimentelle Validierung dieses Verfahrens ist noch Teil der aktuellen Forschungsaktivitäten.

## 8. Literaturverzeichnis

- Abdefattah, M., & Shahid, S. (2007). A comparative characterization and classification of soils in Abu Dhabi coastal area in relation to arid and semi-arid conditions using USDA and FAO soil classification systems. *Arid Land Research and Management*. 21(3), S. 145-271.
- Carsel, R., & Parrish, R. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*. 24(5), S. 755-769.
- Cote, J., & Konrad, J.-M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*. 42(2), S. 443-458.
- Duarte, I., Rodrigues, C., & Pinho, A. (2017). Classification of Soils. In P. Bobrowsky, & B. Marker, *Encyclopedia of Engineering Geology* (S. 1-9). Cham: Springer International Publishing.
- Grunewald, J. (1997). *Diffusiver und konvektiver Stoff und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen (dissertation)*. Dresden: Dresdner Universität.
- Jischa, M. (1982). *Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch*. Springer.
- Plagge, R., Scheffler, G., & Grunewald, J. (2005). Automatische Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes von porösen Baustoffen. *Bauphysik*. 27(6), S. 315-323.

Ramming, K. (2007). Optimierte Auslegung oberflächen naher Erdwärmekollektoren für Wärmepumpenanlagen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*. 56(3-4), S. 133-138.

Schirmer, R. (1938). *Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit*. VDI-Verlag.

Stephan, K., & Mayinger, F. (1988). *Thermodynamik. Bd 2: Mehrstoffsysteme und chemische Reaktionen. (Stichworte Teil 1)*. Springer.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*. 44(5), S. 892-898.

### 6.3 Beschreibung des DELPHIN-Rohrmodells

Verfasser: TU Dresden, Institut für Bauklimatik

Ergänzend zu Kapitel 2.1.1.5 wird hier das DELPHIN-Rohrmodell detaillierter beschrieben.

Das Rohrmodell bildet einen einzelnen Rohrstrang im Erdreich ab, wobei davon ausgegangen wird, dass alle anderen Rohrstränge identisch und parallel dazu verschaltet sind. Dieses Rohrmodell berechnet den Wärmeaustausch zwischen dem Fluid und der am Rohr anliegenden Erdreichtemperatur und damit die Rohraustrittstemperatur  $T_{\text{out}}$ . Dafür wird folgende Gleichung für die stationäre Durchströmung eines Rohrs verwendet

$$T_{\text{out}} = (T_{\text{in}} - T_{\text{soil}}) \exp\left(\frac{-k l}{\dot{m} c_p}\right) + T_{\text{soil}}$$

Dabei ist  $T_{\text{soil}}$  die Erdreichtemperatur,  $T_{\text{in}}$  die Einlasstemperatur,  $k$  der Wärmeübergangskoeffizient des Rohrs,  $l$  die Länge,  $\dot{m}$  der Massenstrom und  $c_p$  die Wärmekapazität des Fluids. Da alle Rohre im Erdreich parallelgeschaltet und hydraulisch abgeglichen sind, ergibt sich der Massenstrom eines einzelnen Rohrs  $\dot{m}_{\text{pipe}}$  als der Gesamtmassenstrom des Netzes geteilt durch die Gesamtanzahl der Rohre  $N_{\text{pipes,total}}$

$$\dot{m}_{\text{pipe}} = \frac{\dot{m}_{\text{Netz}}}{N_{\text{pipes,total}}} = \dot{m}_{\text{Netz}} f_{\dot{m}}$$

Die Erdreichtemperatur  $T_{\text{soil}}$  wird durch das Erdreichmodell (DELPHIN) berechnet. Dieses bekommt von dem Rohrmodell den Wärmestrom, welcher vom Erdreich an das Fluid abgegeben wurde. Das Erdreichmodell bildet einen zweidimensionalen Schnitt durch das gesamte Erdreichvolumen im Bereich um den Erdespeicher bzw. Großkollektoranlage ab. Der Wärmeaustausch mit den Rohrleitungen wird durch eine volumenbezogene Wärmequelle in DELPHIN modelliert. Um nun den Wärmestrom eines einzelnen Rohrs  $\dot{Q}_{\text{pipe}}$  in den volumenbezogenen Wärmestrom im Erdreich  $\dot{q}_{\text{Delphin}}$  umzurechnen, gilt folgende Gleichung

$$\dot{q}_{\text{Delphin}} = -\dot{Q}_{\text{pipe}} \frac{N_{\text{pipe}}}{V_{\text{Delphin}}} = -\dot{Q}_{\text{pipe}} f_{\dot{Q}}$$

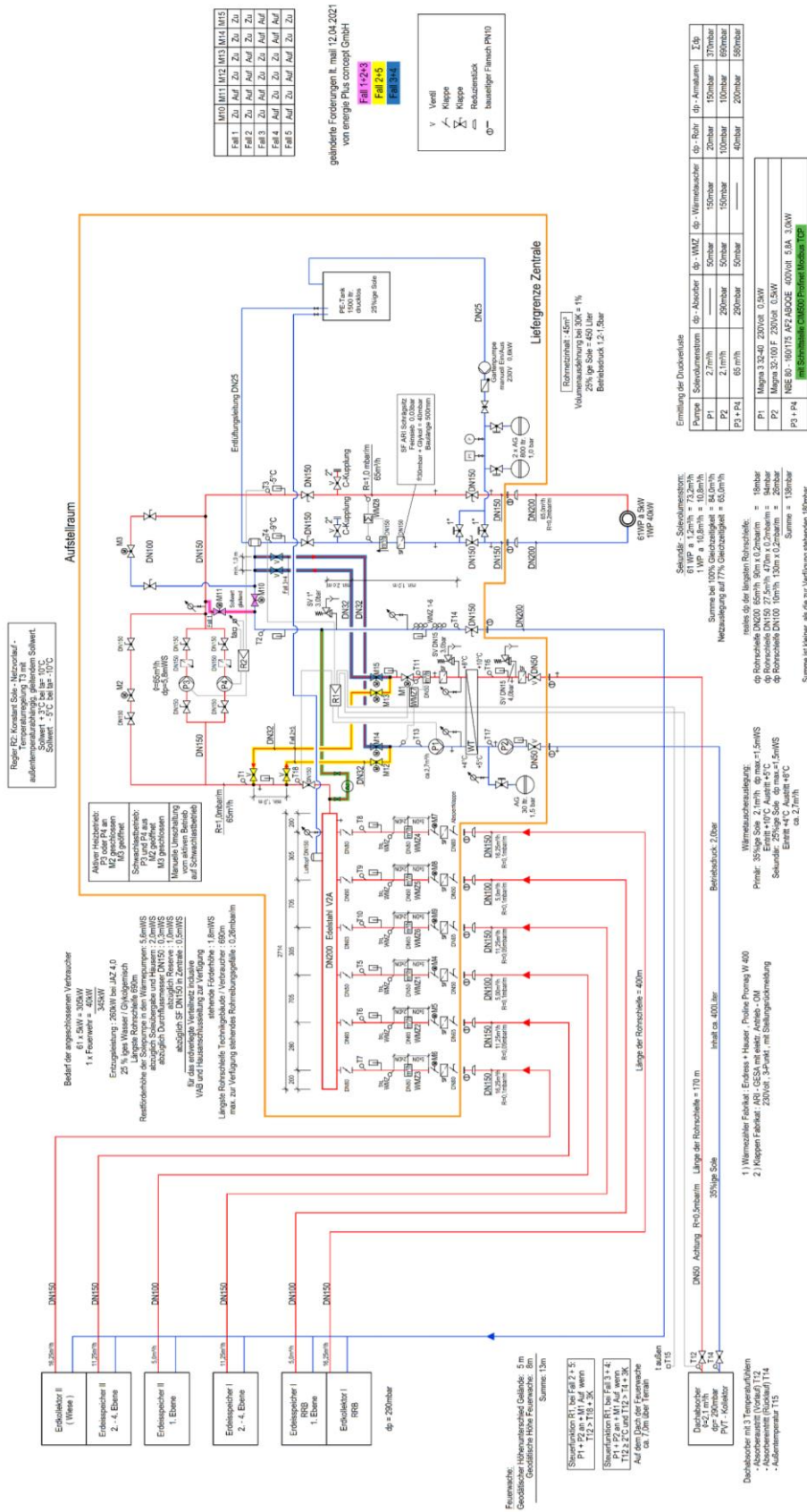
Dabei ist  $N_{\text{pipe}}$  die Anzahl der parallel geschalteten Rohre in dem betrachteten Volumen Großkollektoranlageschicht oder Erdespeicherebene und  $V_{\text{Delphin}}$  das Volumen der im Erdreich angesetzten Wärmequelle in dieser Schicht. Die Anzahl der Rohre und die Volumina der einzelnen Schichten für die Großkollektoranlage und den Erdespeicher sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Schließlich werden die Mittelwerte der Austrittstemperaturen der einzelnen Schichten des Erdespeichers und der Großkollektoranlage gebildet, woraus sich wiederum die Eintrittstemperatur des Kalten Nahwärmenetzes ergibt.

**Tabelle 1: Faktoren für die Umrechnung der Wärmeströme und Massenströme zwischen Rohrmodell und Erdreichmodell**

	Anzahl Kollektoren -	Rohrlänge eines Kollektors m	Wärmeentzug in Delphin				Umrechnungsfaktoren	
			Länge m	Breite m	Höhe m	Volumen m <sup>3</sup>	Faktor Wärmestrom $f_{\dot{Q}}$ 1/m <sup>3</sup>	Faktor Massenstrom $f_{\dot{m}}$ -
Summe	284							
EES Ebene 1	16	83	19	19	0.025	8.56	<b>1.8700</b>	<b>0.003521</b>
EES Ebene 2	14	72	17	17	0.025	6.81	<b>2.0569</b>	<b>0.003521</b>
EES Ebene 3	12	61	15	15	0.025	5.26	<b>2.2830</b>	<b>0.003521</b>
EES Ebene 4	10	50	13	13	0.025	3.91	<b>2.5600</b>	<b>0.003521</b>
Großkollektoranlage	90	50	73	16	0.025	29.20	<b>3.0822</b>	<b>0.003521</b>

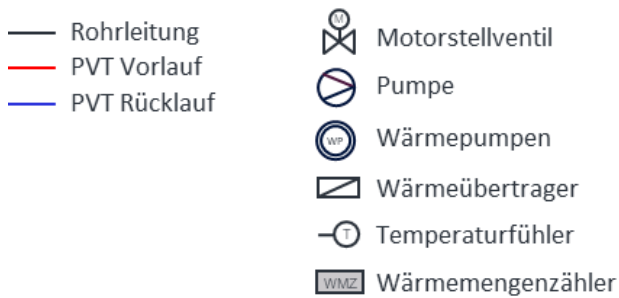
# 6.4 Darstellung des Hydraulikschemas



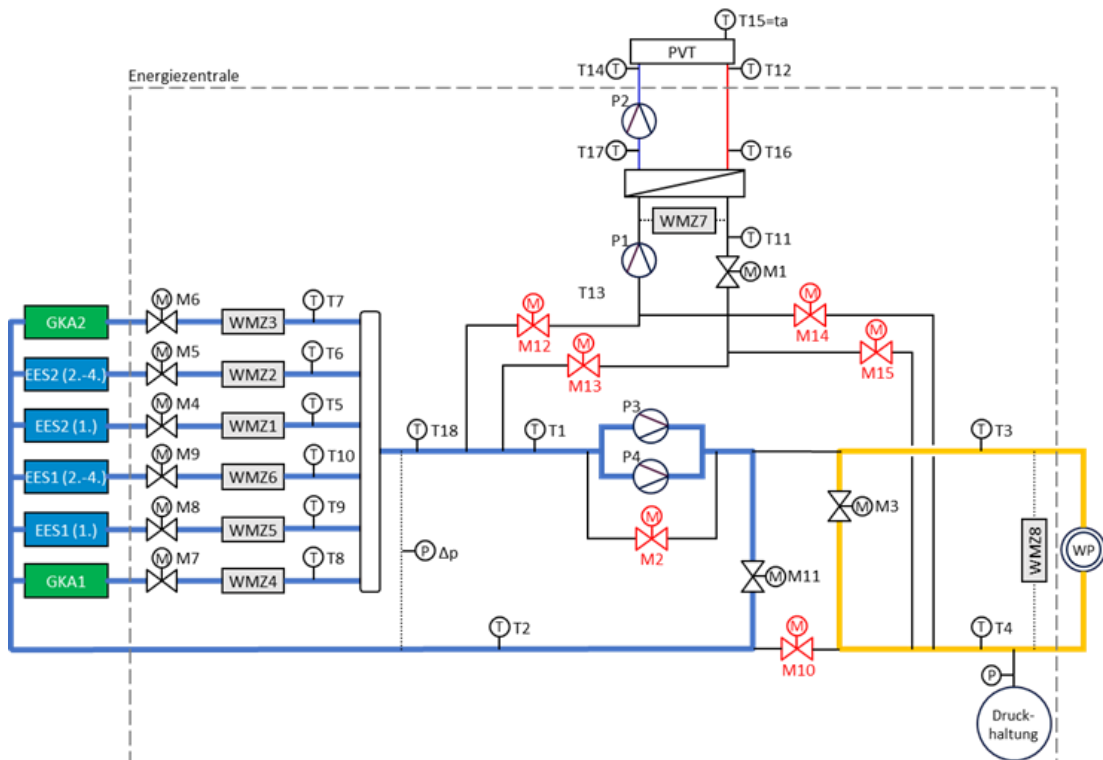
## 6.5 Darstellung der Betriebsvarianten

Im Folgenden sind die fünf unterschiedlichen Betriebsvarianten des Wärme- und Kälteversorgungs-konzeptes dargestellt. Es handelt sich dabei um eine vereinfachte Darstellung des Hydraulikschemas ohne bspw. Sicherheitsarmaturen. In blau und gelb sind die voneinander getrennten Kreisläufe der Sole dargestellt; geschlossene Ventile sind rot markiert.

Legende:

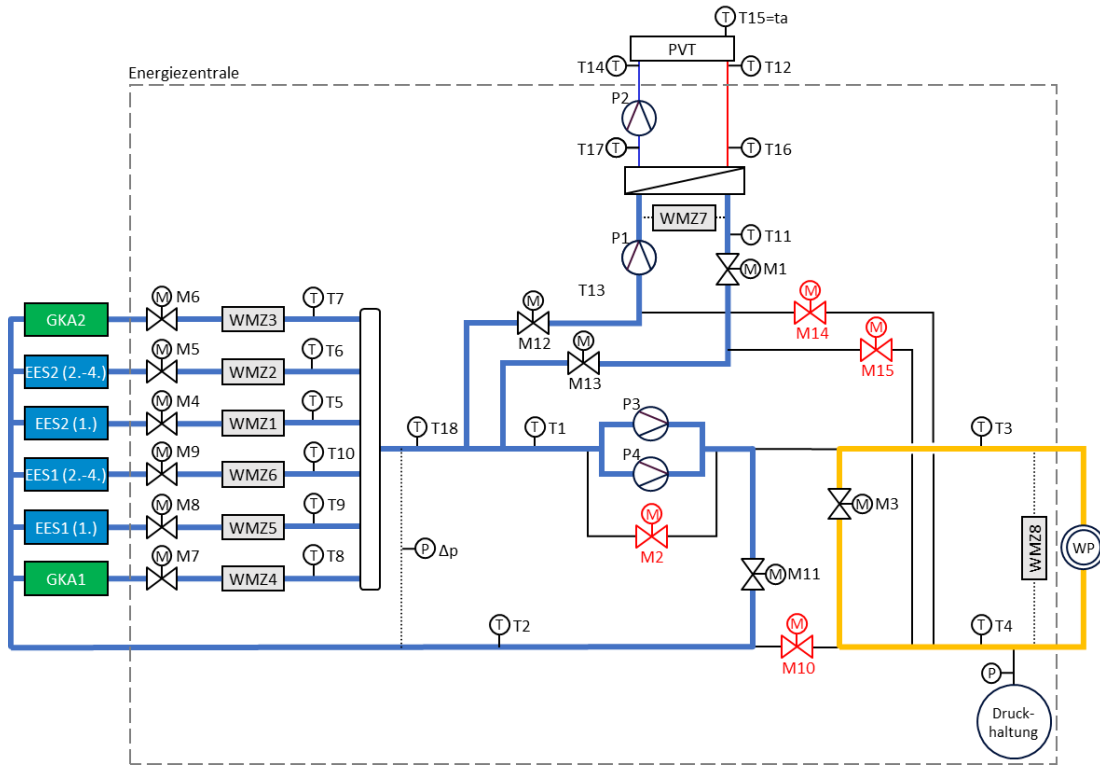


Betriebsvariante 1:

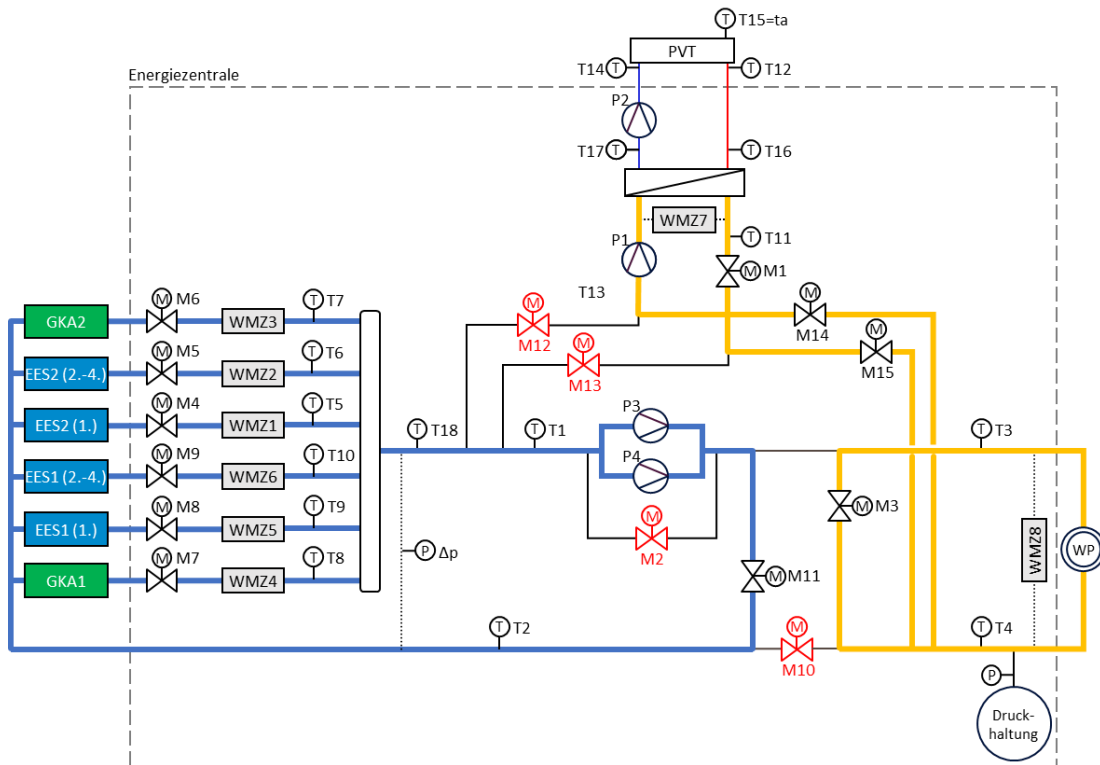




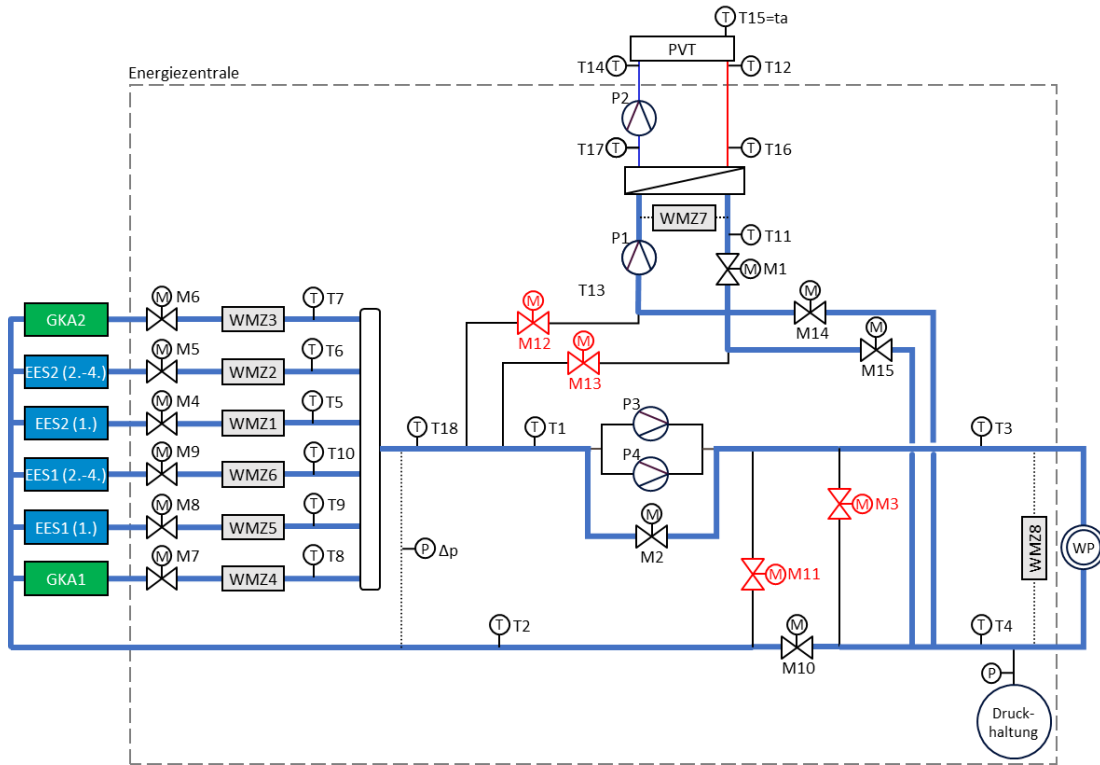
### Betriebsvariante 2:



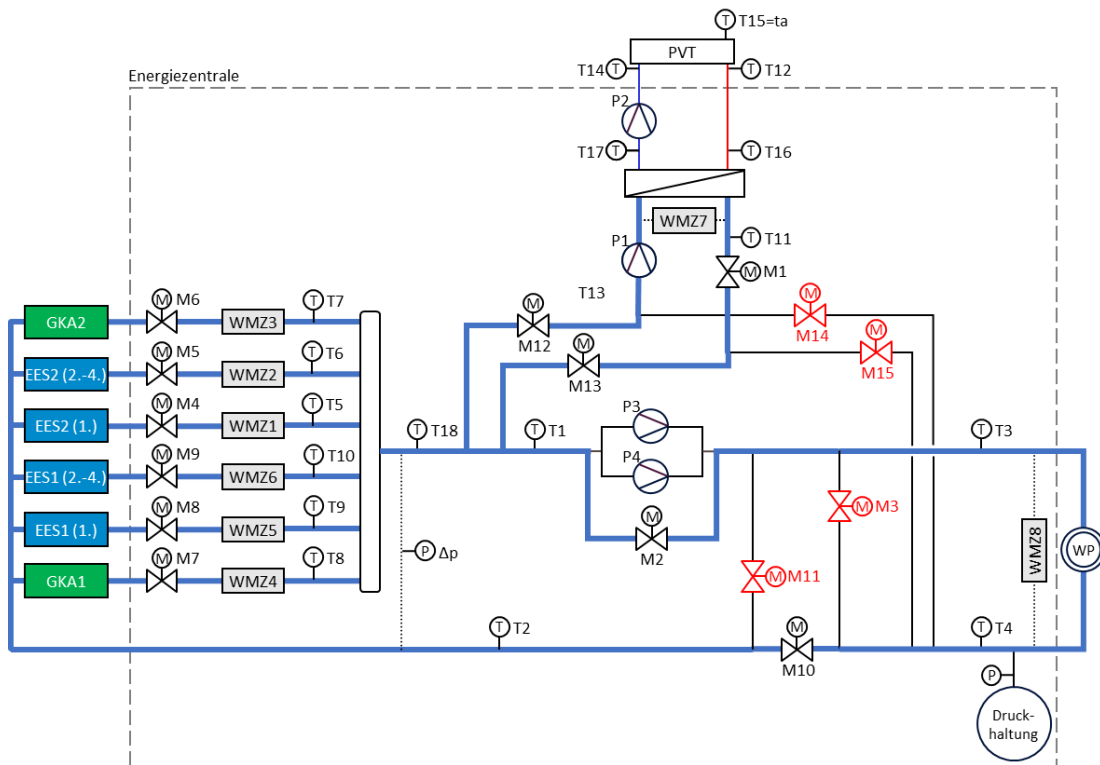
### Betriebsvariante 3:



Betriebsvariante 4:



Betriebsvariante 5:



## 6.6 Abschlussbericht des Lehrstuhls für Aroma- und Geruchsforschung der FAU zum Einfluss von Leckagen auf die Umwelt (AP 3.2)

### Abschlussbericht zu den Untersuchungen im Projekt Erdeis II

#### Leckage-Simulation und Einflüsse auf die Umwelt

##### 1. Ziele

Ziel der Untersuchungen war es, die Substanzen aus Wärmeträgermedien (WTM), die im Falle einer Leckage des Erdeisspeichers in den Boden gelangen, zu identifizieren. Dafür sollte die Leckage eines Erdeisspeichers im Laborversuch simuliert werden. Die Identifizierung der Substanzen erfolgte mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS). Der Identifizierung sollte eine Literaturrecherche zu den möglichen Auswirkungen der jeweiligen Substanzen auf die Umwelt folgen. Um eine potenzielle Umweltgefährdung besser einschätzen zu können, sollten zudem die wichtigsten Substanzen quantifiziert werden. Die durch die Quantifizierung erhaltenen Konzentrationen der einzelnen Stoffe im Boden sollten mit den entsprechenden Grenzwerten verglichen werden und so die potenzielle Umweltgefährdung diskutiert werden. Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war es, einen möglichen Abbau der Substanzen aus WTM in den Bodenproben zu untersuchen, um einen Rückschluss auf die Stabilität der Stoffe zu erhalten und die Möglichkeit einer Persistenz im Boden einschätzen zu können. Das Ergebnis dieser Untersuchungen sollte ebenfalls mit in die Bewertung der potenziellen Umweltgefährdung durch Substanzen aus WTM mit aufgenommen werden.

##### 2. Rechtlicher Hintergrund

Gesetzt dem Fall einer Leckage kann es zu einem Austreten des WTM und einen Eintrag der im Medium enthaltenen Stoffe in den Boden und das Grundwasser kommen. Daher ist es wichtig, die Verhaltensweisen der eingesetzten Stoffe im Boden, deren Grundwassergefährdungspotenzial und deren Abbaubarkeit zu untersuchen (Eggeling und Schneider, 2018).

Die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) regelt die Einstufung wassergefährdender Stoffe in drei Wassergefährdungsklassen (WGK). Als wassergefährdende Stoffe werden Stoffe definiert, die geeignet sind, die biologische, chemische oder physikalische Beschaffenheit des Wassers nachteilig zu verändern. In die WGK 1 werden schwach wassergefährdende Substanzen, in die WGK 2 deutlich wassergefährdende und in die WGK 3 stark wassergefährdende Stoffe eingeteilt. Darüber hinaus gibt es die Kategorie der allgemein wassergefährdenden

Stoffe. In diese werden meist landwirtschaftliche Abfälle und Dünger, wie beispielsweise Gülle, Jauche oder Silage eingruppiert. Des Weiteren gibt es die Kategorie der nicht wassergefährdenden Stoffe. Dazu zählen Stoffe, die als Lebens- oder Futtermittel Anwendung finden (Umweltbundesamt, 2017).

Laut der Empfehlung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) dürfen Wasser und nicht wassergefährdende Stoffe als WTM in Erdwärmeeinrichtungen Anwendung finden. Ist deren Verwendung nicht möglich, so können auch WTM mit Additiven eingesetzt werden, die in der Positivliste der LAWA enthalten sind. Für Wasserschutz- und Einzugsgebiete der öffentlichen Wasserversorgung gelten strengere Vorschriften. Hier dürfen nur Wasser, nicht wassergefährdende WTM sowie WTM der LAWA-Positivliste ohne zugesetzte Additive eingesetzt werden.

Wässrige Lösungen der WGK 1 auf Basis von Ethylenglykol und Propylenglykol dürfen in Gebieten, die nicht unter die strengeren Vorschriften der Wasserschutzgebiete fallen, als WTM zum Einsatz kommen. Zulässig sind auch WTM mit anderen Hauptkomponenten, solange sie ein ähnliches Gewässergefährdungspotenzial wie die aus Ethylen und Propylen bestehenden WTM aufweisen.

Additive der WGK 1 dürfen generell nur in einem Anteil von unter 3 % (Massenprozent) in WTM vorhanden sein. Additive der WGK 2 und 3 sind für einen Einsatz in WTM verboten. Der Positivliste der LAWA können WTM hinzugefügt werden, die diese Kriterien erfüllen (LAWA, 2019).

Die konkreten Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und -kollektoren (2019) lauten:

„In Wasserschutz- und Einzugsgebieten der öffentlichen Wasserversorgung, Heilquellenschutzgebieten sowie vergleichbaren wasserwirtschaftlich sensiblen Grundwassernutzungen (siehe Empfehlung 4) dürfen ausschließlich Wasser oder nicht wassergefährdende WTM in Erdwärmesondenanlagen und in Erdwärmekollektoren zusätzlich nur WTM der LAWA-Positivliste ohne Additive verwendet werden, wenn sich die Erdwärmeeinrichtung im selben Grundwasserleiter wie die Wassergewinnung befindet.“ (S. 21)

„In Wasserschutzgebieten ist dem Schutz des Grundwassers als Trinkwasserressource grundsätzlich Vorrang vor der Nutzung der Erdwärme einzuräumen.“ (S. 10)

### 3. Material und Methoden

#### 3.1 Probenmaterial und Simulation der Leckage

Um die Leckage eines Erdeisspeichers und deren Folgen auf die Umwelt zu untersuchen, wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Einerseits wurden vier verschiedene WTM ausgewählt und untersucht. Hierbei handelte es sich um GeoFluid® N (Fischer Spezialbaustoffe GmbH, Heilsbronn), Glysofor L (WITTIG Umweltchemie GmbH, Graftschaft), coracon® GT ECO AF-14 (Aqua-concept GmbH, Gräfeling) sowie coracon® GEKO AF-8 (Aqua-concept GmbH, Gräfeling). Bei GeoFluid® N und Glysofor L handelt es sich um glykolbasierte, bei coracon® GT ECO AF-14 und coracon® GEKO AF-8 um ethanolbasierte WTM. Zudem wurden Bodenproben unterschiedlicher Zusammensetzung getestet, wobei sich die Anteile an Sand, Schluff und Ton unterschieden. Die WTM sowie die Bodenproben wurden zunächst getrennt voneinander analysiert. In einem weiteren Schritt wurde eine Leckage simuliert, wobei die Bodenproben mit WTM versetzt wurden. Hierbei wurden jeweils ca. 290 g der entsprechenden Bodenprobe in eine ca. 5 cm hohe zylinderförmige Form gegeben. Die Bodenprobe wurde mit 150 ml WTM versetzt, wobei überschüssiges Medium durch Löcher im Boden der Form nach unten austreten konnte. Auf diese Weise wurde die Leckage eines Erdeisspeichers simuliert. Die Proben wurden direkt im Anschluss aufgearbeitet (siehe 3.4) oder im Falle des Lagertests verwahrt, siehe 3.3. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Boden- bzw. Leckageproben.

**Tabelle 1: Zusammensetzung der Bodenproben hinsichtlich Korngrößenverteilung, Bezeichnung des Bodentyps und zugesetztem Wärmeträgermedium**

Probe	Korngrößen			Bezeichnung	Wärmeträgermedium
	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]		
1	89,78	7,27	2,95	reiner Sand	GeoFluid® N
2	62,33	27,28	10,40	lehmiger Sand	GeoFluid® N
3	72,63	14,07	13,31	lehmiger Sand	GeoFluid® N
4	> 85	< 10	< 5	reiner Sand	Glysofor L
5	> 85	< 10	< 5	reiner Sand	coracon® GT ECO AF-14
6	> 85	< 10	< 5	reiner Sand	coracon® GEKO AF-8
7	23,04	60,04	16,92	lehmiger Schluff	GeoFluid® N
8	3,68	6,38	89,94	reiner Ton	GeoFluid® N
9	17,29	66,48	16,24	lehmiger Schluff	GeoFluid® N
10	< 1	< 34	> 65	reiner Ton	GeoFluid® N

#### 3.2 Chemikalien

Tabelle 2 listet alle für die Untersuchungen verwendeten Chemikalien auf.

**Tabelle 2: Verwendete Chemikalien zur Identifizierung von Substanzen aus Wärmeträgermedien in Bodenproben.**

Substanz	Reinheit	Hersteller
Alkane C <sub>5</sub> bis C <sub>26</sub> in DCM	-	Fluka®, Steinheim, Deutschland
Benzoessäure	99,6 % (GC-Reinheit)	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
Benzotriazol	≥ 98,0 %	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol	98 %	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
Essigsäure	99,8 %	Acros Organics, Geel, Belgien
Ethan-1,2-diol (Ethylenglykol)	99,8 %	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
2-Ethylhexansäure	99 %	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
n-Octansäure	≥ 98 %	SAFC, Steinheim, Deutschland
1,1'-Oxydipropan-2-ol	61,1 % (GC-Reinheit)	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
Propan-1,2-diol (Propylenglykol)	≥ 99,5 %	Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland
Dichlormethan	HPLC-grade	VWR International GmbH, Darmstadt, Deutschland
Methanol	LC-MS-hypergrade	Merck, Darmstadt, Deutschland
Natriumsulfat wasserfrei	-	VWR International GmbH, Darmstadt, Deutschland

### 3.3 Lagertest und Abbauverhalten

Um das Abbauverhalten potenziell umweltgefährdender Substanzen im Boden zu untersuchen, wurde ein vierwöchiger Lagertest durchgeführt. Hierbei wurden Leckage-Simulationen der WTM Glysofor L, coracon® GT ECO AF-14 sowie coracon® GEKO AF-8 in Kombination mit einem Boden bestehend aus > 85 % Sand, < 10 % Schluff und < 5 % Ton angesetzt. Diese Proben wurden zum einen bei 20 °C und zum anderen bei 8 °C gelagert, um den Abbau bei sommerlichen bzw. bei eher winterlichen Bedingungen zu simulieren. Die Proben wurden anschließend an Tag 0, 2, 4, 7, 14 und 28 aufgearbeitet.

### 3.4 Aufarbeitung der Proben und Identifizierung mittels Gaschromatographie-Olfaktometrie

Basierend auf einer Methodenentwicklung unter Variation des verwendeten Lösungsmittels (Dichlormethan oder Methanol), der Extraktionstemperatur (0 °C, 10 °C, 20 °C oder 30 °C) sowie der Extraktionszeit (30 min, 60 min, 120 min oder 300 min) wurden die Proben wie folgt aufgearbeitet:

25 g Probe wurden mit 100 ml Dichlormethan unter Rühren bei 20 °C für 60 min extrahiert, anschließend filtriert, über Natriumsulfat getrocknet und ein weiteres Mal filtriert. Im Fall der reinen

Wärmeträgermedien wurde der erste Filtrationsschritt durch eine Abtrennung mittels Scheidetrichter ersetzt. Der Extrakt wurde anschließend für die Analyse mittels GC-MS eingesetzt. Im Folgenden sind die Einstellungen des GC-MS-Systems aufgelistet, mit denen die Proben vermessen wurden:

**Tabelle 3: Geräteparameter des GC-MS-Systems**

Geräteparameter	
Chromatograph	Agilent 7890A GC System
Autosampler	Gerstel Multi Purpose Sampler
Spritzenvolumen	10 µl
Injektionsvolumen	1,0 µl
Injektionssystem	Cool-on-column
Injektionstemperatur	40 °C
Temperaturprogramm	40 °C [2 min] > 10 °C/min > 240 °C [5 min]
Trägergas	Helium
Fluss	1 ml/min
Säule	DB-FFAP
Massenspektrometer	Agilent 5975C MSD
Detektionsmodus	Total Ion Current (TIC), Mass Range: 40-400 m/z

Die vorläufige Identifizierung der Substanzen aus WTM in Bodenproben erfolgte mittels GC-MS unter Verwendung der NIST-14-Datenbank. Zur Absicherung des Ergebnisses der Datenbankrecherche in Hinblick auf die Semiquantifizierung ausgewählter Substanzen (s. 3.5) wurden Lösungen der entsprechenden Referenzsubstanzen ebenfalls mittels GC-MS vermessen. Die Retentionsindices (RIs) der Analyten sowie der Referenzsubstanzen wurden mit Hilfe von n-Alkanen auf der DB-FFAP-Säule bestimmt und miteinander verglichen. Ebenso wurden die MS-Spektren der Analyten mit denen der Referenzsubstanzen verglichen. Der Vergleich mit den Referenzsubstanzen erfolgte lediglich bei den Substanzen, die für die spätere Semiquantifizierung herangezogen wurden.

### 3.5 Semiquantifizierung ausgewählter Substanzen mittels GC-MS

Für die semiquantitative Bestimmung wurden Benzoesäure, Benzotriazol, 2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol, Ethylenglykol, 2-Ethylhexansäure, n-Octansäure, 1,1'-Oxydipropan-2-ol und Propylenglykol ausgewählt. Die Glykole wurden zur Semiquantifizierung ausgewählt, da sie von den Herstellern der untersuchten WTM oft als Hauptbestandteil angegeben wurden. Zudem wurden die Ergebnisse der Identifizierung bei der Auswahl berücksichtigt. Es wurden vorrangig Substanzen für die Semiquantifizierung ausgewählt, die intensive Signale bzw. hohe Intensitätsflächen im Massenspektrometer

und somit einen vermutlich hohen Anteil der flüchtigen Substanzen im Probenextrakt ergaben. Die Semiquantifizierung erfolgte mittels externer Kalibrierung.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

Aus der Literaturrecherche ergaben sich die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten in WTM üblicherweise eingesetzten Additive, ihre Eingruppierung in Wassergefährdungsklassen bzw. Ökotoxizität sowie deren Verwendungszweck.

**Tabelle 4: Typische Additive und Zerfallsprodukte in WTM sowie deren Wassergefährdungsklasse (WGK), Ökotoxizität und Verwendungszweck. - = keine Eingruppierung in eine WGK oder Informationen zur Ökotoxizität vorhanden**

Substanz	WGK/ggf. Ökotoxizität	Verwendungszweck
Ethylenglykol	1	Basissubstanz
Propylenglykol	1	Basissubstanz
Benzotriazol	-/persistent	Korrosionsinhibitor
Benzoessäure	1	Korrosionsinhibitor
Ethylhexansäure	1	Korrosionsinhibitor
Essigsäure	1	Zerfallsprodukt/Additiv
n-Hexansäure	1	Ggf. Tensid/Emulgator
n-Octansäure	1	Ggf. Tensid/Emulgator
n-Decansäure	1	Ggf. Tensid/Emulgator
2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol	-/-	Zerfallsprodukt
Ethylenglykolmonobenzoat	-/-	Zerfallsprodukt
1,1'-Oxydipropan-2-ol	-/-	Zerfallsprodukt
1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol	-/-	Zerfallsprodukt

Für drei der oben dargestellten Additive ergaben sich aus der Literaturrecherche ökotoxikologische Grenzwerte, welche in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt sind.

**Tabelle 5: LC50-Werte (Konzentration eines Stoffes, ab der eine Sterblichkeitsrate von 50 % der Population erreicht ist) von 2-Ethylhexansäure, Benzoessäure sowie Benzotriazol.**

Substanz	LC50 für Fische oder Bakterien
2-Ethylhexansäure	43 mg/L <sup>1</sup>
Benzoessäure	9 mg/L <sup>1</sup>
Benzotriazol	65 mg/L <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ilieva et al. 2012

### 4.2 Ergebnisse der Identifizierung



Die Ergebnisse der Identifizierung werden in Tabelle 6 dargestellt. Es sind auch die Identifizierungskriterien für die jeweiligen Substanzen angegeben (vorläufige Identifizierung über NIST oder Identifizierung über Abgleich mit Referenzsubstanzen). Es ließ sich ein deutlicher Unterschied in der Zusammensetzung der einzelnen WTM erkennen, wobei die Anzahl der enthaltenen Substanzen stark variierte. Das WTM GeoFluid® N enthielt Benzoesäure, Benzotriazol, n-Decansäure, 2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol, Ethylenglykol, 2-Ethylhexansäure, n-Octansäure und Propylenglykol. Im WTM Glysofor L konnten 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol, Benzoesäure, Benzotriazol, 1,1'-Oxydipropan-2-ol und Propylenglykol identifiziert werden. Im WTM coracon® GT ECO AF-14 konnte nur 6-Methyl-3-heptanon identifiziert werden. Das WTM coracon® GEKO AF-8 enthielt n-Octansäure und Ethylenglykol.

**Tabelle 6: (Vorläufig) identifizierte Bestandteile in den untersuchten WTM GeoFluid® N, Glysofor L, coracon® GT ECO AF-14 und coracon® GEKO AF-8. \*Substanz vorläufig durch NIST-Datenbank-Abgleich identifiziert; alle anderen Substanzen wurden durch Abgleich mit der Referenzsubstanz identifiziert.**

Substanz	GeoFluid® N	Glysofor L	coracon® GT ECO AF-14	coracon® GEKO AF-8
Ethylenglykol	x			x
Propylenglykol	x	x		
Benzotriazol	x	x		
Benzoessäure	x	x		
Ethylhexansäure	x			
n-Octansäure	x			x
n-Decansäure	x*			
2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol	x			
1,1'-Oxydipropan-2-ol		x		
1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol		x*		
6-Methyl-3-heptanon			x*	

### 4.3 Ergebnisse der Semiquantifizierung

Für die Semiquantifizierung wurden alle Leckage-Proben (siehe Tabelle 1) herangezogen und analysiert. In den mit GeoFluid® N versetzten Proben wurden 600-1200 mg/kg Benzoesäure, 49-74 mg/kg Benzotriazol, 10-21 mg/kg 2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol, 2800-4500 mg/kg Ethylenglykol, 41-54 mg/kg n-Octansäure sowie 40-300 mg/kg Propylenglykol nachgewiesen. In den mit Glysofor L versetzten Proben wurden 24-26 mg/kg Benzoesäure, 35-77 mg/kg Benzotriazol, 2-7 mg/kg 1,1'-Oxydipropan-2-ol sowie 6000-12000 mg/kg Propylenglykol nachgewiesen. Die Semiquantifizierung von 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol in den mit mit Glysofor L versetzten Proben war

nicht auswertbar. In den mit coracon® GEKO AF-8 versetzten Proben wurden 600-1400 mg/kg Ethylenglykol und 32-79 mg/kg n-Octansäure nachgewiesen. Die Semiquantifizierung von 6-Methyl-3-heptanon in den mit coracon® GT ECO AF-14 versetzten Proben war nicht auswertbar, weitere Substanzen waren in diesen Proben nicht in quantitativen Mengen detektierbar.

Um das ermittelte Worst-Case-Szenario darzustellen, werden in Tabelle 7 die jeweils höchsten Konzentrationen von Rückständen aus WTM in Bodenproben dargestellt, die in den unterschiedlichen Leckagesimulationen ermittelt wurden (Tabelle 7). Hierfür wurden alle quantifizierten Proben einbezogen.

**Tabelle 7: Konzentrationen der identifizierten Additive in den jeweils untersuchten Leckageproben [mg/kg Boden]. Dargestellt sind jeweils die höchsten Konzentrationen der jeweiligen Substanzen für das entsprechende WTM aus allen quantifizierten Proben. \*Konzentration liegt über dem LC50 nach Ilieva et al.2012; <sup>2, 3, 4, 6</sup> = Probe 2, 3, 4, 6 entsprechend Tabelle 1; /1:X: GeoFluid® N wird für gewöhnlich in einem Wassermischungsverhältnis von 1:4, Glysofor L in einem Verhältnis von 1:3 eingesetzt mit X = theoretischer Wert nach Verdünnung; n.a. = nicht auswertbar**

Substanz	GeoFluid® N [mg/kg] /1:4	Glysofor L [mg/kg] /1:3	coracon® GT ECO AF- 14 [mg/kg]	coracon® GEKO AF- 8 [mg/kg]
Ethylenglykol	4500 <sup>3</sup> /900			1400 <sup>5</sup>
Propylenglykol	300 <sup>3</sup> /60	12000 <sup>4</sup> /3000		
Benzotriazol	74 <sup>3,*</sup> /15	77 <sup>4,*</sup> /19		
Benzoessäure	1200 <sup>2,*</sup> /240*	26 <sup>4,*</sup> /7		
Ethylhexansäure	n.a.			
n-Octansäure	54 <sup>2</sup> /11			79 <sup>6</sup>
n-Decansäure	n.a.			
2,5-Dimethyl-3-hexin-2,5-diol	21 <sup>3</sup> /4			
1,1'-Oxydipropan-2-ol		7 <sup>4</sup> /2		
1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol		n.a.		
6-Methyl-3-heptanon			n.a.	

#### 4.4 Abbauverhalten

Bei der Untersuchung des Einflusses der Lagerzeit zeigten sich für die Substanzen aus WTM unterschiedliche Stabilitäten in den Bodenproben. Bei der Betrachtung der Intensitätsflächen von 1,1'-Oxydipropan-2-ol im Verlauf der 28 Tage des Lagerversuchs konnte eine abnehmende Tendenz sowohl bei 8 °C als auch bei 20 °C festgestellt werden. Die prozentualen Abbauraten betragen 68,2 % bei 8 °C bzw. 66,8 % bei 20 °C. Es konnte somit ein Abbau von 1,1'-Oxydipropan-2-ol beobachtet werden.

Die Werte der Peakflächen von Benzotriazol schwankten während des Lagerversuchs bei 8 °C sowie bei 20 °C stark. Die prozentualen Schwankungen betragen 52,0 % bzw. 55,8 %. Dadurch ließ sich keine Aussage treffen, ob Benzotriazol innerhalb des betrachteten Zeitraums von 28 Tagen bei 8 °C bzw. 20 °C abgebaut wird.

Im Verlauf des Lagerversuchs konnte n-Octansäure nicht immer in den Proben bei Raumtemperatur detektiert werden. Die wenigen Daten reichten hier nicht aus, um eine Aussage zum potenziellen Abbau von n-Octansäure bei Raumtemperatur zu treffen. Ebenso war keine Aussage zu einem potenziellen Abbau von n-Octansäure innerhalb des betrachteten Zeitraums von 28 Tagen bei 8 °C möglich, da hierbei die Werte zu stark schwankten. Die prozentuale Schwankungsrate betrug 94,1 %.

Die Werte von 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol blieben während des Lagerversuchs bei 8 °C weitgehend konstant. Für 1-(2-Methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol konnte kein Abbau innerhalb von 28 Tagen bei 8 °C gezeigt werden. Zu einem potenziellen Abbau von 1-(2-Methoxy-1-methyl-ethoxy)-2-propanol bei Raumtemperatur konnte keine Aussage getroffen werden, da die Peakflächen zu stark schwankten. Die prozentuale Schwankungsrate betrug 39,7 %.

Die Werte der Peakflächen von Benzoesäure, Ethylenglykol und Propylenglykol blieben während des Lagerversuchs bei 8 °C und bei 20 °C weitgehend konstant. Für die drei Substanzen konnte im Lagerversuch kein Abbau innerhalb von 28 Tagen bei 8 °C sowie bei 20 °C gezeigt werden.

Ein Abbau innerhalb des betrachteten Zeitraums von 28 Tagen ließ sich somit nur bei 1,1'-Oxydiprop-2-ol feststellen. Benzoesäure, Ethylenglykol, Propylenglykol und 1-(2-Methoxy-1-methyl-ethoxy)-2-propanol zeigten keine Tendenz zum Abbau. Für Benzotriazol und n-Octansäure ließ sich aufgrund schwankender Werte keine Aussage zu einem potenziellen Abbau treffen.

## 5. Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die potenzielle Umweltgefährdung von WTM, welche im Falle einer Leckage der Erdwärmeanlage in den Boden gelangen, einzuschätzen. Dafür wurden geeignete Methoden für die Isolierung und Identifizierung der Substanzen aus Bodenproben entwickelt. Anschließend wurde das Umweltgefährdungspotential der einzelnen identifizierten Stoffe mittels Literaturrecherche ermittelt. Um die potenzielle Umweltgefährdung besser einschätzen zu können, folgte anschließend eine Abschätzung der Konzentrationen der relevanten Substanzen aus WTM in den Bodenproben. Darüber hinaus wurde der Abbau der Substanzen in den Bodenproben untersucht.

Durch GC-MS-Messungen wurden einige teils umweltgefährdende Substanzen aus den WTM in den Bodenproben detektiert, u.a. Benzotriazol und Benzoessäure. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Wärmeträgermedien, wobei die untersuchten ethanolbasierten WTM im Allgemeinen weniger (qualitativ sowie quantitativ) potentiell umweltgefährdende Additive enthielten als die untersuchten glykolbasierten WTM. Es zeigte sich, dass in den meisten WTM Substanzen enthalten waren, die nicht als Bestandteile des WTM angegeben waren. Meist wurde nur die Hauptkomponente der WTM vom jeweiligen Hersteller angegeben. Es konnte zudem festgestellt werden, dass sich die WTM deutlich in ihrer Zusammensetzung unterschieden. Im Modellversuch der Untersuchung der Stabilität der Stoffe im Boden konnte für den Großteil der untersuchten Substanzen kein Abbau innerhalb von 28 Tagen bei 8 °C sowie bei 20 °C beobachtet werden.

Im Modellversuch überschritten die Substanzkonzentrationen teilweise umweltrelevante Grenzwerte. So überschritten die WTM Glyosfor L sowie GeoFluid® N im Leckageversuch teils die durch die Literaturrecherche ermittelten kritischen Ökotoxizitätswerte für die Substanzen Benzotriazol sowie Benzoessäure. Die Frage, ob die ermittelten Konzentrationen der Substanzen im Boden zu einer Umweltgefährdung führen können, kann jedoch noch nicht abschließend beantwortet werden. Dargestellt wurde ein Szenario einer massiven Leckage: 150 ml WTM auf 290 g Bodenprobe bei Ablauf des Überschusses. Durch Mikroorganismen, Pflanzen, Unterspülung durch Regen oder Versickerungsszenarien (Ahuja und Ross 1983, Conde-Avila et al. 2020, Reis und Sakakibara 2012) könnte es im Gelände zu einem vermehrten Abbau bzw. zu einer stärkeren Verteilung der Substanzen kommen. Solche Effekte könnten die Einflüsse einer Leckage auf die Umwelt wesentlich beeinflussen.


Weiterer Forschungsbedarf besteht einerseits zur ökotoxischen Wirkung und zum Wassergefährdungspotential einiger Stoffe, die in WTM zum Einsatz kommen, da über manche der enthaltenen Substanzen bislang wenig bekannt ist. Darüber hinaus sollten nicht nur die Auswirkungen der einzelnen Stoffe auf die Umwelt untersucht werden, sondern ebenso die Auswirkungen der gesamten WTM näher betrachtet werden. Eine exakte Quantifizierung der potenziell wassergefährdenden flüchtigen sowie nicht-flüchtigen Substanzen ist ebenfalls ausstehend, um präzisere Aussagen zum realen Umweltgefährdungspotenzial zu treffen. Um die nicht-flüchtigen Substanzen zu charakterisieren, fanden im Rahmen dieses Projektes bereits erste Messungen mittels Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie statt. Es wurden bis zu 49 potenzielle Substanzen (m/z-Verhältnisse) in den einzelnen Probenextrakten gefunden. Eine genaue Zuordnung bzw. tiefergehende Auswertung der m/z-Verhältnisse war im Zuge der Studie nicht möglich. Die Ergebnisse legen jedoch nahe, dass hier möglicherweise noch weitere Erkenntnisse erhalten werden könnten. Eine möglichst

realistische Probenahme sowie Simulationen zum Versickerungsverhalten der Substanzen werden ebenfalls eine wichtige Rolle bei zukünftigen Studien in diesem Bereich spielen.

## 6. Literatur

- AHUJA, L. R., ROSS, J. D. 1983. Effect of subsoil conductivity and thickness on interflow pathways, rates and source areas for chemicals in a sloping layered soil with seepage face. *Journal of Hydrology*, 64 (1-4), 189-204.
- CONDE-AVILA, V., ORTEGA-MARTÍNEZ, L. D., LOERA, O., EL KASSIS, E. G., DÁVILA, J. G., VALENZUELA, C. M., ARMENDÁRIZ, B. P. 2020. Pesticides degradation by immobilised microorganisms. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 10.1080/03067319.2020.1715375.
- EGGELING, L. & SCHNEIDER, J. 2018. Auswirkungen der Grundwasserbeschaffenheit auf Bau und Betrieb Oberflächennaher Geothermieranlagen. In: BAUER, M., FREEDEN, W., JACOBI, H. & NEU, T. (eds.) *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 289-290.
- GOLOVKO, O., KOBÁ, O., KODESOVA, R., FEDOROVA, G., KUMAR, V. & GRABIC, R. 2016. Development of fast and robust multiresidual LC-MS/MS method for determination of pharmaceuticals in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 14068-14077.
- ILIEVA, D., MORASCH, B. & HADERLEIN, S. 2012. Risikominimierung beim Einsatz von Wärmeträgerflüssigkeiten: Einfluss von Additiven auf Umweltverhalten und Abbaubarkeit im Untergrund.
- LAWA 2019. Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und -kollektoren. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA; [www.lawa.de/documents/lawa-empfehlungen-anforderungen-erdwaermeanlagen\\_umlauf\\_umk\\_2\\_1559634462.pdf](http://www.lawa.de/documents/lawa-empfehlungen-anforderungen-erdwaermeanlagen_umlauf_umk_2_1559634462.pdf)).
- REIS, A. R., SAKAKIBARA, Y. 2012. Enzymatic degradation of endocrine-disrupting chemicals in aquatic plants and relations to biological Fenton reaction. *Water Science and Technology*, 66 (4), 775-782.
- ROGERS, J. D., THURMAN, E. M., FERRER, I., ROSENBLUM, J. S., EVANS, M. V., MOUSER, P. J. & RYAN, J. N. 2019. Degradation of polyethylene glycols and polypropylene glycols in microcosms simulating a spill of produced water in shallow groundwater. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21, 256-268.
- UMWELTBUNDESAMT 2017. Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV; [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/369/dokumente/awsv\\_bgb117s0905\\_75158\\_0.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/369/dokumente/awsv_bgb117s0905_75158_0.pdf))

**6.7 Abschlussbericht zum Einfluss der Einbringung und Vereisung eines Erdeisspeichers auf die Umwelt (AP 3.1)**

<p><b>EnEff: Wärme: ErdEis II: Eisspeicher und oberflächennahe Geothermie</b></p>	
<p><b>Teilvorhaben: Planung Erdeisspeicher und messtechnische Erfassung, Komponentenentwicklung und wissenschaftliche Projektkoordination</b></p>	
<p>AP 3 Untersuchung nichttechnischer Hemmnisse</p>	
<p>Projektbeginn: 01. März 2019</p>	<p>03ET1634A-E</p>
	<p>Einfluss der Einbringung und Vereisung eines Erdeisspeichers auf die Umwelt</p>
<p>Dokument:</p>	<p>Bericht für ErdEis II AP 3.1 (Endversion)</p>

**Projektleitung**      **Dr. David Bertermann**

**Ort**                      **91054 Erlangen**

**Datum**                 **31.01.2022**

## Dokumentenhistorie

Version	Datum	Autor:	Prüfung durch:	Freigabe durch:
1	31.01.2022	Jan Wagner		Dr. David Bertermann
2				

### Autoren

**Dr. David Bertermann**

*FAU Erlangen-Nürnberg*

**M.Sc. Jan Wagner**

*FAU Erlangen-Nürnberg*

### **GeoZentrum Nordbayern – Friedrich-Alexander-Universität**

Lehrstuhl für Geologie - Arbeitsgruppe oberflächennahe Geothermie

Schlossgarten 5

91054 Erlangen

Tel: +49 9131 85 25824

E-Mail: [david.bertermann@fau.de](mailto:david.bertermann@fau.de)

## Inhaltsverzeichnis

1. Fragestellung und Ziele.....	
2. Ausgangslage.....	
2.1 Beschreibung Arbeitsgebiet.....	
2.2 Aufbau und Funktionsweise Erdeisspeicher.....	
3. Prozesse infolge der Vereisung und des Einbaus/Nutzung der Geothermieanlagen.....	
4. Bewertung der Ergebnisse bezogen auf die Erdeisspeichertechnologie.....	
5. Fall „An den Wichelkoppeln“.....	
6. Ausblick.....	
7. Literaturverzeichnis.....	



## 1. Fragestellung und Ziele

Beim Einbau von oberflächennahsten geothermischen Anlagen (Sammelbegriff – Horizontale Systeme und deren Sonderformen), insbesondere bei Erdeisspeichern die das sie umgebende Erdreich gezielt einfrieren, ist es erforderlich, nichttechnische Hemmnisse zu untersuchen und auch zu bewerten. Dies soll sicherstellen, dass sowohl der Einbau an sich als auch der spätere Regelbetrieb keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Eine Folge des Wärmeentzugs aus dem Boden ist zum Beispiel, dass die Erdreichtemperatur in den Monaten Januar bis April niedriger liegt, als es mit dem natürlichen Bodenfrost zu erwarten wäre (Rieberer & Em, 2006). In der Literatur werden als weitere mögliche Auswirkungen einer Vereisung des Bodenkörpers noch eine Veränderung der Lagerungsdichte und der Porenraumzusammensetzung, Hebungen des Erdreichts und eine zeitliche Verschiebung der Vegetationsperiode beschrieben (Kellner, 2007; Rieberer & Em, 2006). Bisher wurden diese Auswirkungen aber nur im obersten Bereich des Erdreichts untersucht. Es gibt keine wissenschaftlichen Untersuchungen, die sich gezielt mit der Vereisung in Folge des Betriebs eines Erdeisspeichers in einer Tiefe von 4 m beschäftigen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die im und auf dem Boden befindliche Pflanzen- und Tierwelt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der betrachtet werden muss, ist das Austrocknen des Bodenkörpers im umliegenden Bereich der Kollektorelemente durch Kühlprozesse in den Sommermonaten.

In dieser Studie sollen wissenschaftliche Arbeiten und Untersuchungen aus verschiedenen Forschungsbereichen kritisch hinterfragt und miteinander kombiniert werden, um eine möglichst allgemeingültige Aussage über die Auswirkungen der Einbringung und des Betriebs eines Erdeisspeichers in einer Tiefe von 4 m treffen zu können. Zudem sollen mögliche Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsfragen gefunden werden.

## 2. Ausgangslage

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojektes ErdEis II werden im Untersuchungsgebiet an zwei verschiedenen Positionen jeweils ein einlagiger Flächenkollektor und ein vierlagiger Erdeisspeicher eingebracht (vgl. Abb. 1). Die beiden Positionen unterschieden sich insbesondere in ihrer nachträglichen Nutzung.

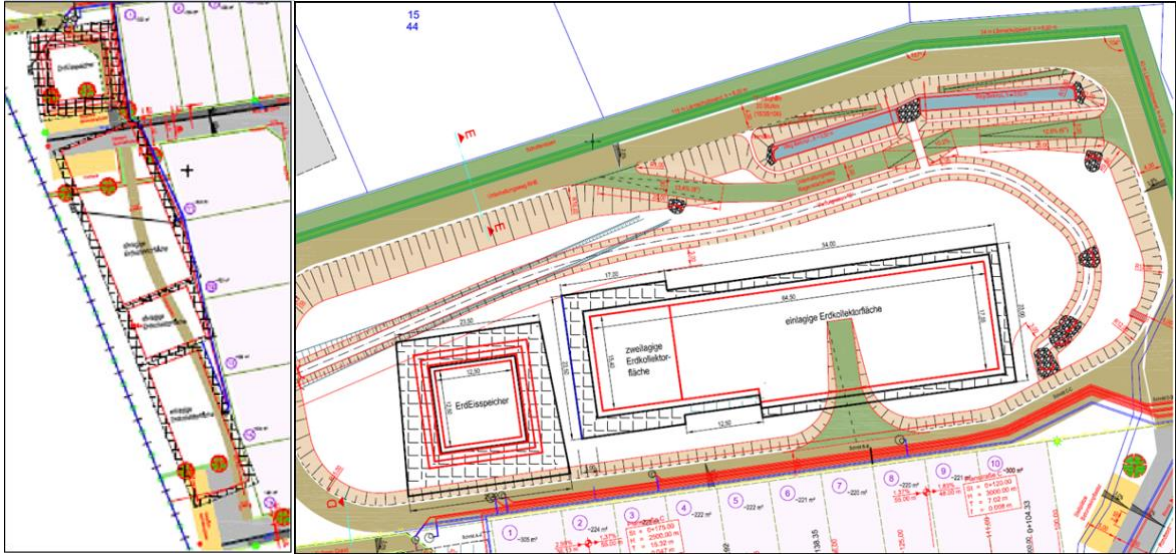


Abbildung 1: Darstellung der westlichen (links) und nördlichen (rechts) eingebauten geothermischen Anlagen (verändert nach SSW 2020).

Während über den westlich gelegenen Anlagen (vgl. Abb. 1) später ein Kinderspielplatz sowie mehrere Stellplätze für Fahrzeuge entstehen sollen, liegen die nördlichen Anlagen (vgl. Abb. 1) unterhalb eines Regenrückhaltebeckens, welches bei Starkregeneignissen als Vorfluter für die im Süden gelegene Schlei dienen soll.

Beide Anlagen werden genutzt, um das neu entstehende Siedlungsgebiet mit ca. 60 Wohneinheiten zu versorgen. Gleichzeitig beinhaltet das Forschungsprojekt ein Monitoring der Erdreichtemperatur, der Bodenfeuchte und des Grundwasserstandes über einen längeren Zeitraum. Da aber ein solches Monitoring etwaige negative oder auch positive Einflüsse der Anlagen erst später zu Tage bringt, sollen mögliche Einflüsse im Folgenden anhand einer Literaturstudie vorab kritisch betrachtet werden.

## 2.1 Beschreibung Arbeitsgebiet

Das Baugebiet „An den Wichelkoppeln“ befindet sich im nördlichen Teil der Stadt Schleswig in Schleswig-Holstein. Die Stadt Schleswig selbst liegt im nördlichen Teil des Landes an der Mündung des Flusses Schlei. Diese Landschaft ist geologisch gesehen durch eiszeitliche oder nacheiszeitliche Lockersedimente und deren anschließende Verwitterung geprägt. Der an die Ostsee grenzende Teil Schleswig-Holsteins zeichnet sich dabei durch einen höheren Sandgehalt aus (vgl. Abb. 2).

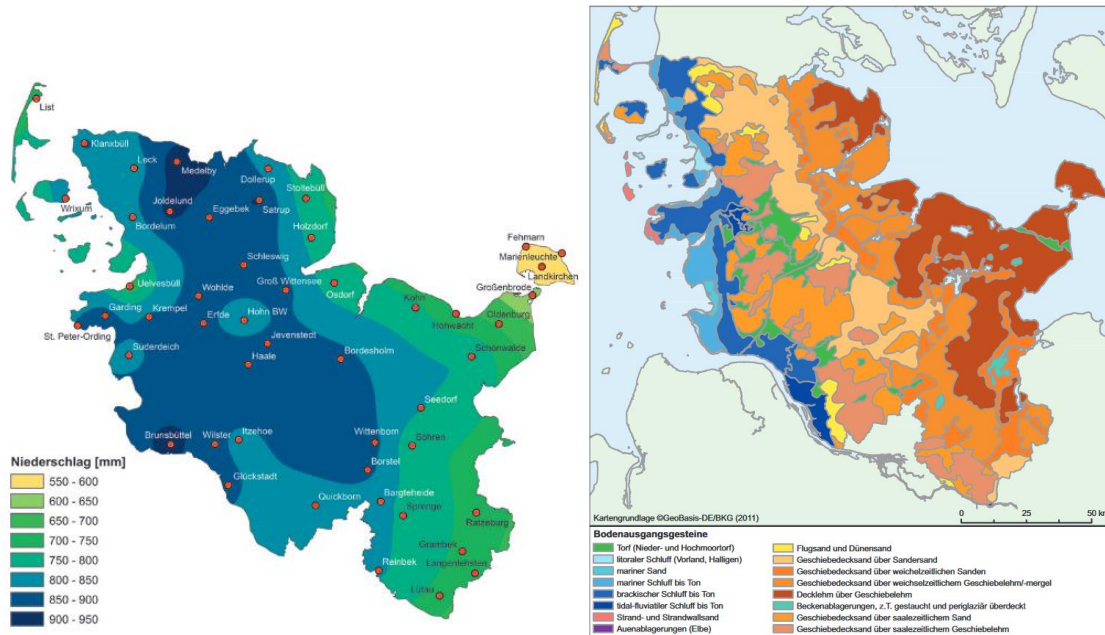


Abbildung 2: Übersicht der langjährigen mittleren Niederschläge 1981 – 2010 (links) und der Bodenausgangsgesteine in Schleswig Holstein (Burbaum et al., 2019).

Diese Tatsache deckt sich auch mit der im Zuge des Forschungsprojektes vorangegangenen Labormesskampagne. Dabei wurden unter anderem verschiedene Bodenproben auf ihre Korngrößenzusammensetzung untersucht. In nahezu allen Proben überwiegt der Sandanteil deutlich. Das Klima ist feuchtgemäßigt und ozeanisch geprägt. Dabei ist ein leichtes Gefälle der Niederschläge von Norden nach Süden zu erkennen (vgl. Abb. 2). Die Stadt Schleswig liegt in einem Bereich in welchem der Niederschlag im Jahresmittel über 850 mm liegt (Burbaum et al., 2019). Im Rahmen einer Neuerschließung wird auf dem Gelände einer ehemaligen Kleingartenkolonie eine neue Wohnsiedlung mit bis zu 60 Wohneinheiten entstehen (vgl. Abb. 3). Über die eingebrachten geothermischen Anlagen und einer PVT-Anlage auf der neu erbauten Feuerwache sollen diese Wohneinheiten über ein Kaltes Nahwärmenetz mit Wärme und Warmwasser versorgt werden. Ein weiterer Verwendungszweck der geothermischen Anlagen ist die sommerliche Kühlung der Wohneinheiten.



Abbildung 3: Darstellung der nördlich (violett) und westlich (grün) verbauten Flächenkollektoren und Erdeisspeicher im Bezug auf das neu entstehende Baugebiet „An den Wichelkoppeln“ (verändert nach SSW 2020) sowie eine Luftaufnahme aus dem Jahr 2016 (Google Earth, 2016).

Die westlichen geothermischen Anlagen befinden sich dabei nicht weit von zukünftigen Grundstücken entfernt im Untergrund (vgl. Abb. 3) Mit Abschluss des Bauvorhabens soll in diesem Bereich ein neuer Kinderspielplatz entstehen sowie nördlich davon einige Parkplätze für die Anwohner. Der nördliche Abschnitt befindet sich unterhalb des neu gebauten Regenrückhaltebeckens. Dieses dient bei Starkregenereignissen als Vorfluter für die südlich der Stadt gelegene Schlei und soll eine Überschwemmung in diesem Bereich, insbesondere bei dem aus dem westlichen Wäldchen führenden Bach verhindern.

## 2.2 Aufbau und Funktionsweise Erdeisspeicher

Die beiden einlagigen Flächenkollektoren wurden in herkömmlicher Weise auf einer Tiefe von 1,50 m vertikal modular (System: Boden-Klima-Tauscher) verlegt und dienen der Versorgung der Wohneinheiten mit Wärme und Warmwasser. Die Boden-Klima-Tauscher haben eine Breite von 200 cm und eine Höhe von 5 cm. Die Länge der Module kann je nach Bedarf variiert werden. Die Rohre mit einer Wandstärke von 2,3 mm haben einen Außendurchmesser von 25 mm (Steinhäuser, 2020). Bei den Erdeisspeichern wurden 4 Lagen Flächenkollektoren, die konisch bis in eine Tiefe von 4,50 m mit jeweils 1 m Abstand zwischen den einzelnen Lagen reichen, verlegt (vgl. Abb. 4). Man könnte in diesem Fall auch von einem „geschichteten Erdkorb“ sprechen.

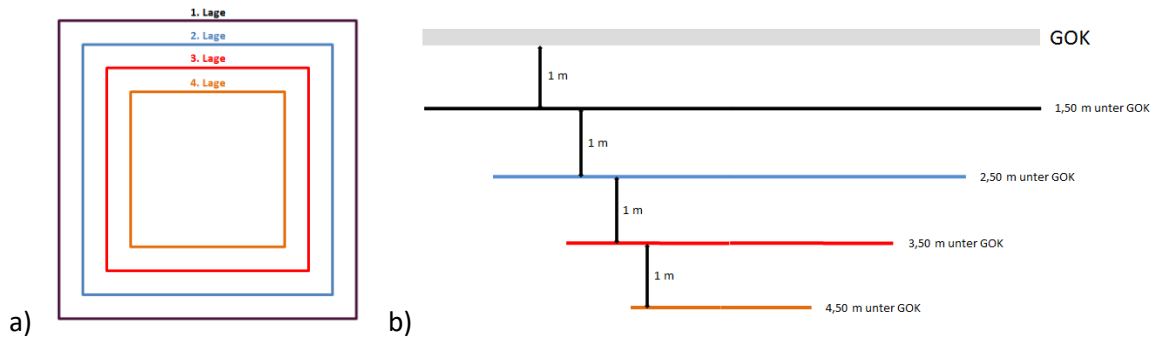


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Erdeisspeichers. Draufsicht (a) und Seitenansicht (b) (eigene Darstellung).

Im Regelbetrieb besitzt der Erdeisspeicher zwei Vorläufe und zwei Rückläufe. Die oberste Lage (1. Lage) ist separat, wohingegen die übrigen drei Lagen in einem Vor- und einem Rücklauf zusammengefasst sind (vgl. Abb. 5). Dadurch soll erreicht werden, dass nur die unteren drei Ebenen gezielt eingefroren werden können. Dieses Vorgehen soll es ermöglichen, dass mit dem gefrorenen Bodenkörper und den dadurch herrschenden niedrigen Temperaturen die angeschlossenen Wohneinheiten im Sommer auch gekühlt werden können.

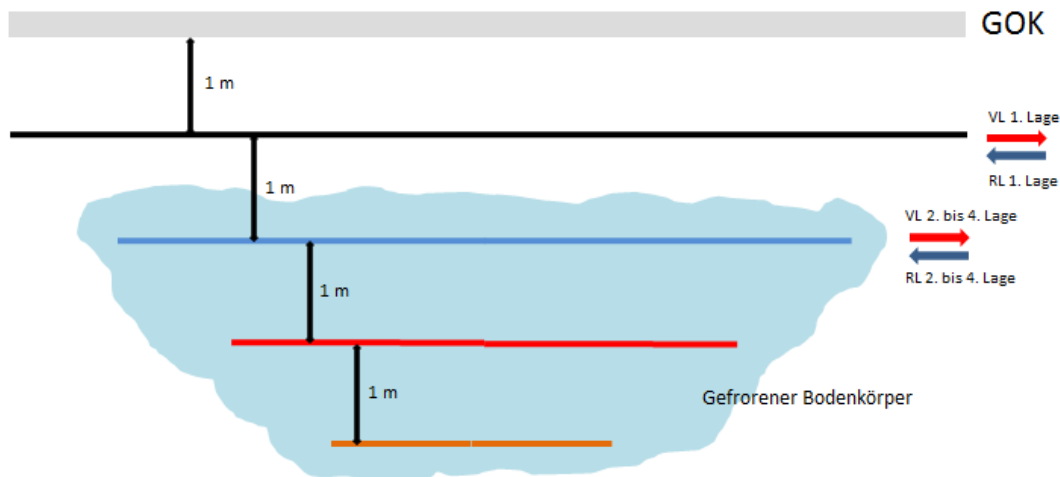


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Erdeisspeichers (eigene Darstellung).

Durch die Gebäudekühlung in den Sommermonaten soll sich der Erdeisspeicher wieder regenerieren, um im Winter dann erneut eingefroren zu werden. Ein dauerhaft gefrorener Bodenkörper ist nicht gewollt. Um eine dauerhafte Vereisung des Bodenkörpers zu vermeiden, soll im Sommer das aus den Häusern kommende und dann erwärmte Wärmeträgermedium dazu genutzt werden, die natürliche Regeneration zu unterstützen bzw. diese zu beschleunigen.

### 3. Prozesse infolge der Vereisung und des Einbaus/Nutzung der Geothermieranlagen

Im Folgenden sollen anhand einer Literaturstudie die einzelnen Prozesse beziehungsweise Systemabläufe aufgezeigt werden, die infolge der Bodenvereisung und des Einbaus innerhalb des Bodenkörpers auftreten.

#### Einflüsse durch den Einbau des Erdeisspeichers

Die Einflüsse durch den Einbau lassen sich in zwei Systembereiche gliedern: den Einbau und die betriebsbedingten Auswirkungen.

Die ersten großen Eingriffe erfahren die Umwelt und hier insbesondere der Bodenkörper bei der Einbringung der Anlagen. Die Fläche für die Kollektoren und die Erdeisspeicher muss ausgekoffert werden und nach dem Einbau wird der vorhandene Aushub in Ergänzung mit Bettungsmaterial wieder eingebracht. Hierbei ist insbesondere auf den horizontgenauen Ausbau der Bodensubstrate und deren getrennte Lagerung auf entsprechenden Boden-Mieten zu achten, um eine schnellere Wiederherstellung der Bodenfunktionen nach dem Einbau zu gewährleisten. Es sind demnach bei den Tiefbauarbeiten die Leitlinien/Vorgaben der Bodenkundlichen Baubegleitung anzuwenden (Lehmann, 2013; Suttner, 2013).

Dadurch entstehen Veränderungen in der Lagerungsdichte bzw. in der Zusammensetzung des Bodenkörpers. In dieser Phase nimmt der Einbau insofern Auswirkungen auf die Umwelt, dass zeitweise keine Möglichkeiten für Pflanzen und Tiere bestehen, sich darauf anzusiedeln. Sobald die Anlagen dann verbaut sind, stellen sie einen Teil des Bodenkörpers. Hier nehmen sie nur in geringem Maße Einfluss auf die Pflanzen und Tierwelt. In diesem Stadium sind sie mit anderen im Boden verbauten anthropogenen Einbringungen wie Abwasserleitungen, Fundamenten, etc. gleichzusetzen und stellen lediglich ein physikalisches Hindernis dar wie auch größere Gesteinsbrocken, dicke Wurzeln oder ein Grundwasserkörper. Um im Nachgang dann eine ungefährdete Besiedelung durch Pflanzen und Tiere zu gewährleisten, ist es wichtig, dass im Rahmen dieses vehementen Eingriffs die Richtlinien zur Erhaltung der Bodenfunktion in der bodenkundlichen Baubegleitung eingehalten werden (Lehmann, 2013; Suttner, 2013).

Erst der Betrieb bringt stärkere Veränderungen für die Umgebung der geothermischen Anlagen mit sich, da dieser die im Folgenden aufgezeigten Prozesse beeinflusst bzw. hervorruft.

#### Hebungs- und Senkungseignisse des Bodenkörpers

Hebungen und Senkungen im Erdreich können auf zwei verschiedene Ursprünge zurückgeführt werden.

Erstens kann es zu Hebungs- und Senkungsprozessen durch die Volumenvergrößerung beim Phasenübergang von Wasser zu Eis kommen (ca. 9 %-ige Volumenvergrößerung). Voraussetzung ist eine Temperaturabsenkung der Umgebung, normalerweise der Lufttemperatur. Für den innerhalb dieser Untersuchung speziell betrachteten Fall der oberflächennahen Geothermiesysteme geht die Temperaturabsenkung und damit verbundene Eisbildung vom Wärmeträgermedium innerhalb der Kollektoren aus. Dadurch gefriert das in den Spalten und Poren innerhalb des Bodenkörpers

vorhandene Wasser. Geht dieser Vorgang relativ schnell, kann es durch den vom Eis ausgeübten kryostatischen Druck über andere noch nicht gefrorene Poren oder Spalten ebenfalls zu Änderungen im Bodengefüge allein durch den Druck des Wassers kommen (Kellner, 2007).

Zweitens kann es durch die Bildung von Eislinsen, welche ausschließlich aus Eiskristallen bestehen, am Übergangsbereich von gefrorenem Boden zu ungefrorenem Boden zu Veränderungen kommen (Kellner, 2007).

Eine Folge dieser Prozesse ist die Kryoturbation, also die Durchmischung bzw. Verlagerung einzelner Bodenbestandteile oder Trennung des Korngefüges. Eine weitere mögliche Folge ist das Aufreißen des Bodens durch die Eislinsenbildung. Ebenso kann es zu Verschiebungen und Stauchungen einzelner Bodenhorizonte kommen (Kellner, 2007). Zudem können sich infolge von Kryoturbation Hohlräumen bilden. Dieser Vorgang ist bodenartspezifisch stärker bzw. schwächer ausgeprägt und hat neben ökologischen Veränderungen im Bodenkörper auch Einfluss auf physikalische Parameter, die den Wärmetransport bestimmen. Denn Bodenparameter wie Lagerungsdichte, Porenraumzusammensetzung und Wassergehalt beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit eines Bodens (Kersten, 1949; Lu et al., 2007) und somit auch die Effizienz einer geothermischen Anlage.

Für eine aussagekräftige Voraussage der Hebungen ist eine Abschätzung der Größenordnung der möglichen Hebungen im gefrorenen Bodenkörper notwendig. Kellner (2007) definiert für diese Abschätzung zunächst die folgenden Randbedingungen:

- der Bodenkörper besitzt undrainede Verhältnisse
- der Boden ist voll gesättigt
- die auftretenden Frosthebungen bewegen sich nur einaxial
- das gesamte Porenwasser wird gefroren

Als erstes muss für eine Bodenprobe das vorhandene Wasservolumen mit Hilfe des Wassergehaltes ermittelt werden. Dieser ist für eine würfelförmige Bodenprobe mit der Kantenlänge 1 cm wie folgt definiert.

(1)

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{\rho_w \cdot V_w}{\rho_d \cdot V}$$

Mit der Dichte des Wassers  $\rho_w = 1,0 \text{ g/cm}^3$  und einem Volumen  $V = 1,0 \text{ cm}^3$  wird nach dem in der Probe herrschenden Wasservolumen aufgelöst und anschließend der durch das Gefrieren neu entstehende Wassergehalt berechnet. Dabei entsprechen  $\rho_d$  der Trockendichte und  $w$  dem Wassergehalt der Probe.

(2)

$$V_w = w \cdot \rho_d \cdot \frac{V}{\rho_w}$$

Über die Multiplikation mit 1,09 (9 %-ige Volumenvergrößerung) wird das neue Wasservolumen berechnet ( $V_{w,1}$ ).

(3)

$$V_{w,1} = 1,09 \cdot V_w$$

Nach der Berechnung der Trockendichte anhand der Feuchtedichte  $p$  und des Wassergehaltes  $w$  kann schließlich die Volumenzunahme  $H_{Vol}$  berechnet werden. Dabei wird von einer Ausdehnung in eine Richtung ausgegangen.

(4)

$$p_d = \frac{p}{1+w}$$

(5)

$$H_{Vol} = V_{w,1} - V_w = 0,09 \cdot w \cdot p_d \cdot \frac{V}{p_w \cdot A}$$

Kellner (2007) erhält am Beispiel eines tertiären Tons mit einer Feuchtedichte von  $2,07 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 20 % eine Hebung von 0,03 cm.

Bei der Betrachtung eines Einheitselementes ist der Betrag der volumetrischen Hebung  $H_{Vol}$  gleich dem Betrag der bezogenen volumetrischen Hebung  $Vol_H$ . Die bezogene volumetrische Hebung wird als Anteil der gefrorenen Bodenschicht angegeben und stellt die mit diesem Wassergehalt maximal mögliche Hebung dar. Dabei ist die bezogene volumetrische Frosthebung  $Vol_H$  das Verhältnis der Dicke einer gefrorenen Bodenschicht zu der beim Gefrieren dieser Schicht entstandenen volumetrischen Frosthebung.

Da bei der Eislinnenbildung innerhalb der Bodenkörper die Literatur bisher kaum Möglichkeiten liefert, die Eislinnenbildung ohne Laborversuche zu quantifizieren, müssen zunächst zusätzliche Messgrößen eingeführt werden, um diesen Prozess genauer zu betrachten. Zum einen sind das der Zeitpunkt des Einsetzens der Eislinnenbildung, zum anderen die konstante Hebungsgeschwindigkeit bei stationären Temperatur- und gleichbleibenden Auflastverhältnissen. Die Geschwindigkeit wiederum ist von den Faktoren Boden, insbesondere Granulometrie und Durchlässigkeit, dem eingepprägten Temperaturgradienten und der auf den Boden wirkenden Auflast abhängig.

Im Falle des Bodens konnten Jelinek et al. (1968) und Kellner (2007) belegen, dass sich verschiedene Bodenarten bei konstanten Randbedingungen (Temperaturgradient, Auflast etc.) auf die Hebungsgeschwindigkeiten auswirken. Dabei wird die Eislinnenbildung in Schluffen am besten gefördert, da diese bereits feinkörnig genug, aber auch noch ausreichend durchlässig sind, um einen kapillaren Wassernachschub an die Gefrierfront zu ermöglichen (Jelinek et al., 1968). In der folgenden Grafik (Abb. 6) sind die unterschiedlichen Bodenarten hinsichtlich ihrer kapillaren Steighöhe, ihrer Durchlässigkeit und der daraus resultierenden Frostempfindlichkeit dargestellt. Das Maximum liegt somit im Bereich des Grobschluffs.



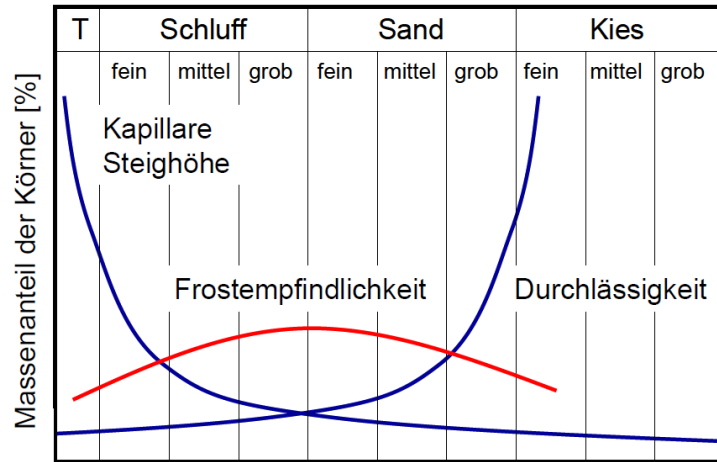


Abbildung 6: Zusammenhang der kapillaren Steighöhe (fallend) und der Durchlässigkeit (steigend) in verschiedenen Bodenarten (Kellner, 2007).

Der Temperaturgradient wirkt sich bei sonst gleichen Randbedingungen ebenfalls auf die Hebungsgeschwindigkeit aus. Ist der Gradient gleich Null, herrscht überall im Boden die gleiche Temperatur und es kommt zu keiner Hebung, da der Bodenkörper entweder komplett gefroren oder gänzlich ungefroren ist. Konrad (1980ff) stellte mit seinen Untersuchungen einen linearen Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten und der Hebungsgeschwindigkeit fest. Kellner (2007) hingegen kam bei seinen Versuchen zu dem Ergebnis, dass bei steileren Gradienten die Frosthebungen nur noch unterproportional wachsen. Eine Verifizierung dieser These konnte Kellner (2007) jedoch aufgrund zu geringer Versuchsdurchführungen nicht durchführen.

Kellner (2007) zeigt zudem mit seinen Versuchen, dass mit steigender Auflast die Frosthebungsgeschwindigkeit abnimmt und ebenfalls ein Zusammenhang von Auflast und Unterdruck bei Gefrierprozessen besteht, da die Frosthebungsgeschwindigkeit nicht linear mit der steigenden Auflast abnimmt, sondern eher überproportional.

Aus den eben aufgezeigten Faktoren kann gefolgert werden, dass die gemessene Hebungsgeschwindigkeit genügt, um die Bildung von Eislinsen zu beschreiben. Voraussetzung ist ein ausgewählter Boden mit konstanten geometrischen und mechanischen Randbedingungen. Der Vorgang an sich zeigt sich als Gerade (vgl. Abb. 7).

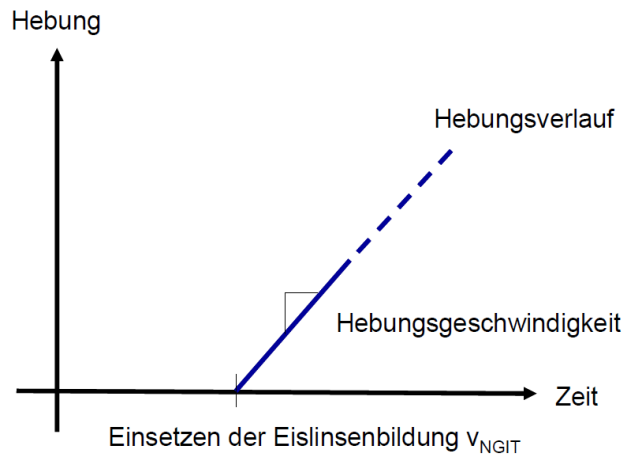


Abbildung 7: Frosthebungen infolge Eislinsenbildung (Kellner, 2007)

Die Nullstelle zeigt dabei den Punkt, an dem die Null-Grad-Isotherme die kritische Frosteindringgeschwindigkeit erreicht hat und die Eislinsenbildung beginnt.

Der Frosthebungsverlauf kann somit als Summe aus der mit der Zeit abklingenden volumetrischen Hebung und der mit Erreichen der kritischen Frosteindringgeschwindigkeit einsetzenden linear verlaufenden Eislinsenbildung beschrieben werden. Dabei ist er in 3 Phasen eingeteilt.

1. Reine volumetrische Hebung
2. Mischform aus volumetrischer Hebung und Eislinsenbildung
3. Eislinsenbildung

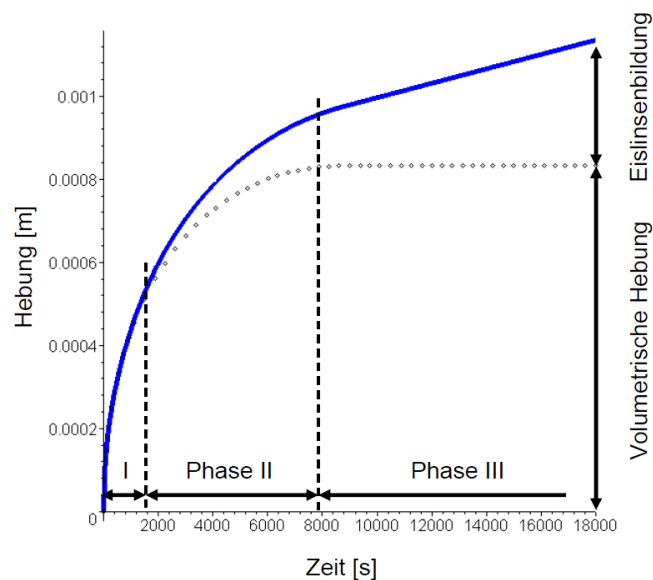


Abbildung 8: Rechnerische Simulation der Frosthebung eines tertiären Tones mit einer Feuchtedichte von  $2,07 \text{ g/cm}^3$  und einem Wassergehalt von 20 % (Kellner, 2007).

Mit der weiter oben aufgezeigten Beispielprobe (S. 7) eines tertiären Tons von Kellner (2007) lässt sich die folgende volumetrische Hebung abschätzen (vgl. Abb. 8). Bis zum Einsetzen der reinen

Eislinsenbildung kommt es zu einer Hebung von etwa 0,0009 m. Bei der linearen Eislinsenbildung wächst die Hebung dann um 0,001 m pro 10000 s. Dies würde einer täglichen Hebung von 0,008 m entsprechen. Für das Beispiel wurden im Falle einer Auflast von 6 kN/m<sup>2</sup> Hebungsgeschwindigkeiten zwischen 1,62 und 2,65 mm/d gemessen.

#### Verschiebung der Vegetationsperiode durch Herabsetzen der Erdreichtemperatur

Dieser Punkt behandelt den Wärmeentzug des Bodens und die daraus resultierenden niedrigeren Bodentemperaturen und ihren Einfluss auf die Vegetation. Zwar ist in der VDI 4640 (2010) folgende Aussage zu finden:

*Bei erdgekoppelten Wärmepumpen mit Erdwärmekollektoren kann eine Unterdimensionierung der Kollektoren zu örtlich begrenzten Auswirkungen auf die Vegetation führen (Verkürzung der Vegetationsperiode).*

Aber dennoch finden sich hierzu keine Referenzen in der VDI 4640 (2010), um dies nachzuvollziehen, bzw. ist auch kaum einschlägige Literatur zu diesem Thema zu finden.

Vor diesem Hintergrund haben Rieberer & Em (2006) eine Literaturstudie angefertigt, in der verschiedene Forschungsergebnisse diskutiert wurden. Die einzelnen Ergebnisse ausgewählter Studien sowie das Fazit werden hier kurz aufgegriffen.

In einer Simulationsreihe von Jansson & Lundin (1984) beispielsweise wurde die Abhängigkeit der Bodentemperatur, der Frosttiefe und den damit verbundenen Verschiebungen in der Vegetationsperiodenlänge in verschiedenen Böden untersucht. Dabei anzumerken ist noch, dass es sich dabei um Standorte in Schweden handelt, also die klimatische Umgebung eine andere ist. Bei den Simulationen wurden die Bodenarten Sand, Schlick (mit und ohne Grundwasser), Lehm und Torf betrachtet. Der Wärmeentzug wurde standardmäßig für eine Tiefe von 80 cm festgelegt und als Bepflanzung wurde Gras gewählt, weil dies die häufigste Bepflanzungsart auf Kollektoren darstellt. Die Simulationen kamen zu dem Ergebnis, dass die Erdreichtemperaturen im Bereich der Erdwärmeeinbauten in den Sommermonaten fast identisch mit den Temperaturen in ungestörten Bereichen sind. Dabei sinkt mit zunehmender Tiefe allerdings die Regenerierfähigkeit des Bodens, was auf die Regeneration der oberen Bodenschichten hauptsächlich durch Regen und Sonne schließen lässt. Ebenso konnte mit steigendem Wärmeentzug eine Verkürzung der Vegetationsperiodenlänge beobachtet werden, insbesondere bei Torf. Dieser hat aber ohnehin eine im Vergleich mit den anderen Bodenarten verkürzte Vegetationsperiode und eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufgrund des hohen Humusgehaltes und ist daher für den Einbau von Kollektoranlagen per se eher ungeeignet. Bei Sand und bei Lehm ergab sich eine kaum quantifizierbare Veränderung der Vegetationsperiode (Jansson & Lundin, 1984).

Bauer (1992) wiederum untersuchte die Auswirkungen des Wärmeentzuges auf die Erdreichtemperatur und die Vegetation. Die Untersuchungen wurden an einem Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 200 m<sup>2</sup> und „sehr guter“ (Stand 1984) Wärmedämmung durchgeführt. Der Wärmeeintrag erfolgte über eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer in 150 cm Tiefe verlegten 700 m<sup>2</sup> großen Kollektorfläche. Im Untersuchungsgebiet dominierten die Bodenarten Sand und Lehm. Bauer (1992)

kommt zu dem Ergebnis, dass es zu keinem Einfluss auf die oberen Bodenschichten hinsichtlich der Temperatur kommt, denn relevante Temperaturunterschiede waren nur in unmittelbarer Nähe zu den Kollektorrohren zu detektieren. Ebenso konnte der keine Auswirkungen auf die Vegetation feststellen, da im Hauptwurzelbereich der Boden ab Anfang April die gleiche Temperatur aufwies wie der ungestörte Boden auf einer Referenzfläche. Hierbei ist aber noch zu erwähnen, dass die Kollektoranlage, an der Bauer (1992) seine Studie durchgeführt hat, sehr groß dimensioniert war, was wiederum die Aussage aus der VDI 4640 (2010) bezüglich einer korrekten Dimensionierung untermauert.

Rieberer & Em (2006) sammelten auch Informationen von Anlagenbauern. Auch hier waren die Aussagen relativ ähnlich zu den bereits aufgezeigten Studien. So gaben alle befragten Anlagenbauer an, dass bei der Bepflanzung keine Einschränkung besteht. Man solle lediglich auf Tiefwurzler verzichten, da deren Wurzeln die Anlagen selbst beschädigen können. Ebenso gaben alle Befragten an, dass sich die Vegetationsperiode gar nicht bzw. kaum merklich verändert, dass aber eine korrekte Dimensionierung der Anlage eine sehr wichtige Rolle spiele.

Zusammenfassend für die in Rieberer & Em (2006) aufgezeigten Studien lässt sich sagen, dass mit Hilfe von Erdkollektoranlagen eine nachhaltige Nutzung des Erdreichs bedenkenlos möglich ist und keine negativen Auswirkungen hinsichtlich der Erdreichtemperatur und der damit verbundenen Vegetation bzw. Vegetationsperiode auftreten. Voraussetzung ist aber eine ordnungsgemäße Auslegung wie es schon in der VDI 4640 (2010) erwähnt wird.

Rieberer & Em (2006) selbst kamen bei weiteren persönlichen Studien zu dem Ergebnis, dass die Abkühlung im Bereich des Kollektors am größten ist. So zeigen die Messergebnisse im September auf Flächen mit und ohne Kollektoren ähnliche Temperaturen mit Unterschieden zwischen 1 und 2 °C. Im Herbst fallen die Temperaturen dann ab und beginnen im März wieder zu steigen, ab April/Mai schneller. Mit Beginn der Heizperiode wird der Einfluss der Wärmeentnahme des Kollektors deutlich. Die Abkühlung des Bodens geht rascher voran und die Differenz zwischen ungestörter Erdreichtemperatur und der Temperatur des Erdreiches um den Kollektor kann zwischen 2 und 6 °C betragen. Bei richtig dimensionierten Anlagen kommt es aber zu keiner Zeit zu dauerhaften Temperaturen um 0 °C, wodurch das Erdreich einfrieren würde. Die Temperaturunterschiede sind mit 6 bis 10 °C im Frühling und Frühsommer im Monatsmittel am größten, gleichen sich aber bis zum Sommer wieder an. Auch Ginschel (1977) beobachtete, dass das Erdreich über dem Kollektor im April kälter war als in einer Fläche ohne Kollektor, sich aber zum Sommer hin wieder annähernd gleich einstellen. Ebenso konnte Bauer (1992) feststellen, dass der Temperatureinfluss bis in eine Tiefe von 0,75 m mehr den tageszeitlichen Temperaturschwankungen unterliegt als der Temperatur, die vom Kollektor ausgeht. Zudem konnte er nachweisen, dass die Bodenart einen besonderen Einfluss hat. So weisen feuchte, schwere Böden einen ausgeglicheneren Temperaturhaushalt als beispielsweise trockene Sandböden auf.

Rieberer & Em (2006) führten zudem noch anhand von sieben Gärten Feldbeobachtungen durch. Diese hatten zum Ergebnis, dass der Boden über einer Kollektorfläche länger kühl bleibt, was sich durch eine längere Schneebedeckung und einen späteren Blühbeginn der Frühlingsblüher Löwenzahn, Tulpe und Narzisse zeigte. Allerdings waren die Unterschiede meist marginal. So blieb die Schneedecke maximal 2 Tage länger erhalten auf einer Fläche mit einem Kollektor im Untergrund. Auch beim Blühbeginn waren es meist nur wenige Tage – in Ausnahmen bis maximal 20 Tage. Die gleichen Beobachtungen wurden bei Kleinsträuchern und Bäumen gemacht. Bei einem Standort

befand sich der Flieder auf einer Fläche ohne Kollektor bereits im Blattaustrieb und zeigte erste Blütenknospen, wohingegen die gleiche Art über dem Kollektor lediglich den Blattaustrieb vorzuweisen hatte. Mit einer Ausnahme verzögerte sich auch der Rasenwuchs in den ausgewählten Gärten, jedoch in einem für die Bewohner annehmbaren Bereich. Im Falle der Ausnahme allerdings kamen noch weitere Standortfaktoren hinzu, die dafür sorgten, dass der Rasen sehr viel später ins Wachstum ging bzw. überhaupt nicht und sich ein fleckiger optisch eher unansehnlicher Bestand von wenigen robusten Arten gebildet hatte. Zur Lage über der Kollektorfläche kam noch eine windexponierte Lage. Dadurch wurde der Boden noch zusätzlich gekühlt. Ebenso wirkt der Wind austrocknend, was die Dominanz von *Festuca rubra* (Rotschwingel) und das Fehlen von *Lolium perenne* (Weidelgras) erklärt. Zudem konnte durch eine Bodentemperaturmessung festgestellt werden, dass sich das Erdreich im Jahr 2005 an diesem Standort die Temperatur betreffend nicht regeneriert hat (Rieberer & Em 2006).

#### Auswirkungen auf die Umwelt (Fauna)

Nach der Betrachtung der Einflüsse auf die Vegetation muss aber auch die Tierwelt näher betrachtet werden und wie sich der Einbau und der Betrieb einer Erdwärmeanlage auf deren Lebenssituation auswirkt. Dabei ist zwischen größeren Lebewesen (Kleinsäugetern, bodenbewohnenden Insekten etc.) und Mikroorganismen zu unterscheiden.

Bodenbewohnende Kleinsäuger wie beispielsweise der Maulwurf sind ein wichtiger Bestandteil des Ökosystems. Ihre Anwesenheit deutet meist auf einen gesunden Boden mit ausreichendem Nahrungsangebot hin. Dabei stellen im Boden verlegte Erdwärmekollektoren für den Maulwurf einen neuen Bestandteil in seinem Lebensraum dar. In direkter Linie wirken sich diese Anlagen kaum auf diese Kleinsäuger aus, da diese Tiere in den meisten Fällen nicht in diese Tiefe vordringen.



Abbildung 9: Maulwurf bei der Nahrungsaufnahme (Levermann, o.J.)

Der Maulwurf (Abb. 9) beispielsweise legt seine Nester in einer Tiefe zwischen 50 und 80 cm an, seine Vorratskammern befinden sich sogar nur wenige Zentimeter unter der Erdoberfläche. Im

Winter bei kühleren Temperaturen werden die Kammern entsprechend tiefer gesetzt, aber maximal 1 m tief (Levermann, o.J.). Auch auf das Nahrungsangebot des Maulwurfs sollten die Systeme an sich keine Auswirkungen haben, da auch Würmer und Insektenlarven oder andere bodenbewohnende Insekten, die dem Maulwurf als Nahrung dienen, nicht bis in diese Tiefe vordringen. Denn geht man bei Erdwärmekollektoren von einer normalen Verlegetiefe aus, beginnen diese meist erst ab einer Tiefe von 1,50 m. Stoßen diese Tiere doch einmal auf einen Flächenkollektor, stellt dieser meist einfach ein Hindernis dar, welches umgraben werden kann. Auch bei den Mikroorganismen ist die Verlegetiefe ein gutes Argument, weshalb Erdwärmekollektoren keinen negativen Einfluss auf die Mikroorganismen ausüben, denn natürlich bedingt sinkt die Anzahl der Mikroorganismen pro 1 g Boden mit zunehmender Tiefe. Einerseits liegt das am fehlenden Sauerstoff in den tieferen Bodenschichten, andererseits aber auch an den verfügbaren Nährstoffen durch Pflanzen- und Wurzelreste (Ottow, 2011). Um diese natürlichen Gegebenheiten zu gewährleisten, ist eine ordnungsgemäße Trennung der Horizonte, sowohl beim Auskoffern als auch beim anschließenden Verfüllen, notwendig. So würde die natürliche Bodenfunktion wieder hergestellt und die Auswirkungen auf Bodenorganismen verringert werden (Lehmann, 2013; Suttner, 2013).

Indirekt kann sich aber der Betrieb durch etwas kühlere Bodentemperaturen auf Bodenlebewesen auswirken, da hier die komplette Nahrungskette betroffen ist. Beginnend von Vegetation, die nicht sehr tief oder später wurzelt, über die biologischen Strukturen zersetzende Mikroorganismen und Insekten bis zu den Kleinsäugetieren und ökologischen Stoffkreisläufen innerhalb des Bodenkörpers. Wie aber schon weiter oben ausgeführt, sind die Temperaturdifferenzen beziehungsweise die Verschiebungen in der Vegetationsperiode relativ gering. Zudem haben die meisten Mikroorganismen die Möglichkeit, durch Herunterfahren ihres Stoffwechsels längere Frostperioden problemlos zu überstehen. Größere Lebewesen werden bei ungünstigen Bedingungen eher in andere Lebensräume ausweichen. Im Falle des Maulwurfs oder anderer Kleinsäugetiere ist diese Migration seit einigen Jahrzehnten aufgrund des gestiegenen Nutzungsdruckes, der im Zuge des Wohnungs- und Infrastrukturbaus unabhängig von der Installation von Kollektoranlagen auf den Freiflächen herrscht, zu beobachten.

#### Austrocknung in den Sommermonaten durch Kühlprozesse

Durch Kühlprozesse kann es in den Sommermonaten zu Austrocknungserscheinungen im Bodenkörper kommen. Ursache dafür ist, dass der Bodenkörper im Bereich der Kollektoranlagen infolge der Gebäudekühlung in der damit verbundenen Wärmeemission in den Bodenkörper stärker erwärmt wird als das ihn umgebende Erdreich. Folglich kommt es in ungesättigten Böden zu Ausgleichsströmungen des Wasserdampfes und damit zu einem Abtransport der Feuchtigkeit aus diesem Bereich. Dadurch verringert sich nicht nur die Wärmeableitung, sondern es kommt auch zu einem Anstieg des osmotischen Effektes durch die Salzausscheidung (Scheffer & Schachtschabel, 2010). Generell wird durch diesen Prozess das Bodengefüge beeinträchtigt. Durch Wasserdampfbewegungen kommt es nicht nur zu Austrocknung, sondern auch zur Entstehung von Hohlräumen und somit einer Verringerung der Lagerungsdichte. Der geringere Wassergehalt und die geringere Lagerungsdichte sind Verursacher einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit im Boden, da die luftgefüllten Poren ein

schlechterer Leiter sind als das schwindende Wasser und die Bodenpartikel (Kersten, 1949; Lu et al., 2007).

#### Veränderung der Lagerungsdichte und der Porenraumzusammensetzung

Die Änderungen der Lagerungsdichte können auf sämtliche zuvor aufgezählten Prozesse zurückgeführt werden. Damit verbunden ist auch eine Änderung der Porenraumzusammensetzung (vgl. Abb. 10).

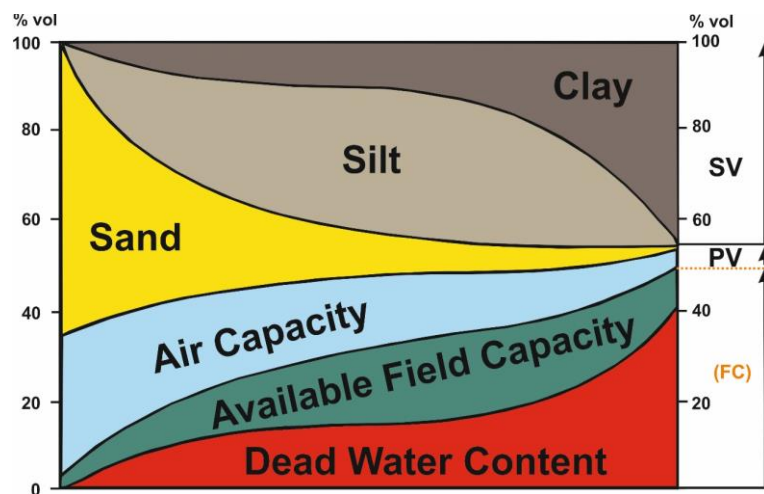


Abbildung 10: Anordnung verschiedener Porenraumzusammensetzungen in Abhängigkeit ihrer Korngrößenverteilung, mit einer Unterscheidung in Substratvolumen (SV) und Porenvolumen (PV). Die Feldkapazität (FC) bestehend aus der verfügbaren Feldkapazität und dem Totwasseranteil gibt den gesättigten Teil des Porenvolumens an (Bertermann & Schwarz, 2018).

Diese beiden wiederum beeinflussen aber auch direkt oder indirekt die zuvor aufgezeigten Prozesse mit Ausnahme der Einflüsse, die durch den Einbau der Anlagen entstehen. So wirkt sich beispielsweise eine erhöhte Lagerungsdichte negativ auf die Durchwurzelbarkeit, also auf das Pflanzenwachstum, aber positiv auf die Wärmeleitfähigkeit aus (Bertermann & Schwarz 2017). Dies zeigt, wie wichtig ein ordnungsgemäßer Einbau und das Einbringen von Bettungsmaterial in Verbindung mit dem ursprünglichen Boden sind (vgl. S. 6, Lehmann, 2013; Suttner, 2013). Ein weiterer Punkt, der dabei beachtet werden muss, ist, dass die Änderungen dieser Parameter nicht nur negativen oder positiven Einfluss auf ihre Umwelt haben können, sondern auch den Wirkungsgrad der geothermischen Anlagen verändern.

#### **4. Bewertung der Ergebnisse bezogen auf die Erdeisspeichertechnologie**

Wendet man die aufgezeigten Prozesse mit ihren möglichen Auswirkungen auf Erdeisspeicher an, ergeben sich einige Unterschiede zu normalen erdwärmebasierten Flächenkollektoren, abgesehen vom Einbau, der hier ebenso einen bautechnischen Eingriff in das bestehende Ökosystem Boden darstellt.

Der Erdeisspeicher besteht aus mehreren Lagen, von denen die unteren beiden oder im Fall der „Wichelkoppeln“ die unteren 3 Lagen gezielt eingefroren werden sollen, um die Anlage im Sommer zur Kühlung nutzen zu können. Dabei beginnt der gefrorene Bodenkörper ab der zweiten Lage auf einer Tiefe von 2,50 m, nicht wie üblicherweise bei 1,50 m. Dadurch ist die Auflast auf den Bodenkörper größer als in normalen gefrorenen Bodenkörpern, was sich auf die Frosthebung und die daran anschließende Eislinsenbildung auswirkt und diese verringern kann (Kellner 2007). Hinsichtlich des Herabsenkens der Erdreichtemperatur und der damit verbundenen Verschiebung der Vegetationsperiode spielt der gezielt eingefrorene Bodenkörper eine größere Rolle, da der Eiskörper definitiv länger im Bodenkörper verbleibt als bei unterdimensionierten Kollektoren, bei denen dieses Phänomen eigentlich nicht erwünscht ist. Eine weitere Abweichung zum herkömmlichen Kollektor ergibt sich daraus, dass der gewünschte Eiskörper erst ab der zweiten Ebene in einer Tiefe von 2,5 m beginnt, was tiefer ist als die üblicherweise verlegten Kollektoren. Dementsprechend wird sich bei der Verschiebung der Vegetationsperiode je nach Einfluss des tief liegenden Vereisungskörpers ebenso eine leichte Verschiebung im Frühjahr ergeben wie bei der von Rieberer & Em (2006) aufgeführten Studie. In einem Tiefenbereich von 4,5 m sind keine größeren Lebewesen wie Kleinsäuger oder Insekten anzutreffen. Hier gibt es nur noch Mikroorganismen, deren Zahl aber natürlicherweise mit der Tiefe abnimmt. Diese werden in diesen Bereichen mit einem gezielt eingefrorenen Bodenkörper konfrontiert, also mit einer längeren Frostperiode als üblich, was für diese aber kein Problem darstellen sollte (vgl. Kap. 3). Durch die systembedingte Einbaugeometrie sind die durch Vereisung bedingten Auswirkungen auf im Boden lebenden Kleintiere und Pflanzen also eher als gering einzustufen. Die Austrocknung durch Wärmeeinbringung infolge der Gebäudekühlung sollte sich im Falle eines Erdeisspeichers auch in Grenzen halten. Zwar wird in den Sommermonaten der Boden durch diesen Prozess erwärmt, allerdings dauert es länger, bis der Abtransport von Wasserdampf aufgrund von Temperaturunterschieden stattfindet, da sich um die untersten 3 Lagen eine Eisschicht gebildet hat, die einen kühlenden Effekt auf das umgebende Erdreich ausübt. Darüber hinaus wird durch das im Folgenden auftretende Schmelzen des Frostkörpers noch zusätzlich Wasser zum Grund-, Schicht- und Regenwasser verfügbar. Bezogen auf den Erdeisspeicher ergeben sich keine signifikanten Unterschiede in der Veränderung der Lagerungsdichte zu einem normalen einlagigen Flächenkollektor.

## 5. Fall „An den Wichelkoppeln“

Anhand einer Beispielprobe aus dem Untersuchungsgebiet „An den Wichelkoppeln“ wird die zu erwartende Hebung eines 1 cm Bodenwürfels berechnet. Dabei handelt es sich um eine Mischprobe aus dem vierten Baggerschurf, welche einen Sandanteil von über 70 % besitzt. An dieser Stelle etwa ist der westliche Erdeisspeicher eingebracht worden. Die entsprechende Feuchtedichte  $p$  wurde auf  $2,01 \text{ g/cm}^3$  und der Wassergehalt  $w$  auf 23 % ermittelt.

Für diese Probe ergibt sich demnach eine Hebung von 0,03 cm. Wie weiter oben erwähnt, ist bei der Betrachtung eines Einheitselementes der Betrag der volumetrischen Hebung  $H_{\text{Vol}}$  gleich dem Betrag der bezogenen volumetrischen Hebung  $\text{Vol}_H$ . Die bezogene volumetrische Hebung beträgt also 3,0 % der gefrorenen Bodenschicht und stellt die mit diesem Wassergehalt maximal mögliche Hebung in unserem Beispiel dar. Da die verwendete Beispielprobe hinsichtlich Dichte und Wassergehalt ähnliche Eigenschaften aufweist, wäre eine maximalen Hebung durch reinen Frosthub und die



anschließende Eislinsenbildung wie in dem aufgezeigten Beispiel (vgl. Kap. 3) zu erwarten. Allerdings handelt es sich im Falle der „Wichelkoppeln“ um einen sandigen Boden und nicht um einen tonigen Boden, weshalb die Wasserhaltekapazität geringer ist und weniger Feuchtigkeit im Boden verbleibt, die gefrieren könnte. Kellner (2007) stellte bei seinen Versuchen fest, dass beispielsweise bei gleicher Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$  ein sandiges Substrat nur um  $1,5 \text{ mm/d}$  gehoben wird, ein toniges Substrat hingegen um  $2,0 \text{ mm/d}$ . Zudem wurden etwaige Parameter wie Wassernachstrom oder Auflast nicht berücksichtigt. So entspricht eine Auflast von  $600 \text{ kN/m}^2$  etwa einer Auflast von  $600 \text{ kg}$ . Nimmt man die ausgewählte Sandprobe aus dem Untersuchungsgebiet mit einer Feuchtedichte von  $2,03 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich eine Auflast von ca.  $9000 \text{ kg pro m}^2$ . Man kann also davon ausgehen, dass die durch Frosthebung und Eislinsenbildung entstehenden Beeinflussungen des Bodenkörpers selbst während einer längeren Frostperiode gering sind. Sichtbare Auswirkungen auf die Oberfläche sollte es auf Basis der Literaturwerke keine geben.

Durch die geothermischen Anlagen kann es zwar zu einer kaum merklichen bis zu 2 Wochen dauernden Verschiebung der Vegetationsperiode infolge von kühleren Bodentemperaturen kommen (Literatur). Im Falle der „Wichelkoppeln“ aber ist dieser Aspekt als weniger problematisch einzustufen, da es sich bei den betroffenen Flächen um keine bewirtschafteten Gärten oder Äcker handelt. Über dem westlichen Erdeisspeicher wird im Nachhinein hauptsächlich Wiese anzutreffen sein und oberhalb des nördlichen Erdeisspeichers befindet sich das Regenrückhaltebecken. Zudem kommt noch hinzu, dass die länger gefrorenen Bodenbereiche erst ab einer etwaigen Tiefe von  $2,50 \text{ m}$  anzutreffen sind und weder Gräser noch die im Regenrückhaltebecken entstehende Vegetation Wurzeln in dieser Tiefe ausbilden.

Eine Austrocknung ist im Gebiet der „Wichelkoppeln“ nicht zu erwarten. Innerhalb der humiden Klimaten, in denen sich der Standort befindet, steht der Wasserdampftransport immer hinter dem Flüssigwassertransport an. Durch ausreichende Regenfälle, nachströmendes Grund- oder Schichtwasser und schmelzendes Eis sollte genug Wasser vorhanden sein, zumal es in dieser Tiefe keine Bedeutung für Pflanzen hat. Lediglich die Effizienz der geothermischen Anlage würde durch den geringen Wassergehalt im Boden gesenkt werden. Zudem sollte die Veränderung des Temperaturunterschiedes durch das Aufheizen des Bodens infolge von Kühlprozessen anfangs noch von dem bestehenden gefrorenen Wasser ausgeglichen werden.

Ein gefrorener Bodenkörper stellt eine Umstellung für die bodenbewohnenden Lebewesen da. Gerade im Bereich des Erdeisspeichers sind diese Umstellungen am größten, da das Erdreich in dieser Tiefe normalerweise nicht gefriert bzw. nicht solch niedrige Temperaturen erreicht. Zudem kommt es durch die geothermischen Anlagen auch zu einer längeren Frostperiode im Boden als üblicherweise. Dies sollte jedoch auf längerer Sicht kein Problem für die Tierwelt darstellen. Wie bereits aufgezeigt, verringern Mikroorganismen ihren Stoffwechsel in Frostperioden, um diese unbeschadet überstehen zu können. Somit bleibt die Grundlage des Nahrungssystems erhalten. Für Kleintiere wie Insekten oder bodenbewohnende Kleinsäuger stellt der Verbau auch kein Problem dar, da diese nicht bis in diese Tiefen vordringen. Generell kann man im Falle der „Wichelkoppeln“ in erster Linie davon ausgehen, dass Kleinsäuger wie der Maulwurf diesen Bereich möglichst meiden, da sie nicht genügend Freifläche zur Verfügung haben und ein Großteil des Gebietes für die Erstellung des Baugebietes stark anthropogen überprägt wurde, durch Nivellierungsprozesse des gesamten Geländes und damit verbundenen Aufschüttungen oder Abtragungen sowie durch das Anlegen von gepflasterten Straßen und Schotterwegen. In den Gärten werden Kleinsäuger und Maulwürfe meist

bekämpft und deren Lebensräume beschnitten. Ebenso bietet sich der Bereich des Regenrückhaltebeckens aufgrund der periodischen Überschwemmung als eher ungünstiger Lebensraum für Kleinsäuger und Maulwürfe an.

Bezüglich der Austrocknung in den Sommermonaten sollte man am Standort „Wichelkoppeln“ klima- und bodenbedingt keine Probleme haben. Zum einen ist ein ständiger Nachschub mit Grund- oder Schichtwasser gegeben. Zum anderen fallen mit jährlich etwa 850 mm (vgl. Abb. 2) in dieser Region genügend Niederschläge, um einer Austrocknung ebenfalls entgegenzuwirken.

## 6. Ausblick

Für die Zukunft ergeben sich in diesem Themenfeld noch zahlreiche weitere Aspekte aus verschiedenen Forschungsbereichen, die untersucht werden müssen, um die aufgezeigten Risiken zu minimieren oder vorzubeugen und genauer zu betrachten. Im Projekt ErdEis II wurde mit Hilfe von Temperatur- und Feuchtefühlern im Erdreich um die Flächenkollektoren und Erdeisspeichern ein detailliertes und langfristiges Monitoring aufgebaut, welches als Basis für weitere Untersuchungen dienen kann. Für genauere Aussagen ob und wie sich diese Anlagen negativ auf das Ökosystem auswirken, ist eine genauere Untersuchung der Prozesse im Boden notwendig. Eine laborgestützte Analyse des Frosthebungsverhaltens von verschiedenen Bodenarten wäre ein möglicher Ansatz, aber auch die Simulation von Wärmetransportprozessen im Boden infolge des gefrorenen Bodenkörpers, um dessen Wirkungsbereich zu definieren. Ebenso wichtig sind fortführende Beobachtungen der Vegetation und der Tierwelt um hier mögliche Auswirkungen festzustellen. Hier stellt das erarbeitete Mess- und Sensorikkonzept für den Standort „Wichelkoppeln“ ideale Bedingungen für weitere längerfristige Monitoringkampagnen gerade in Bezug auf betriebsbedingte Auswirkungen auf das Ökosystem dar.

## 7. Literaturverzeichnis

Ahmels, P., Brandmeyer, O., Bruns, E., Grünert, J., Voß, U. (2016): Auswirkungen verschiedener Erdkabelsysteme auf Natur und Landschaft. Projektbericht; „EKNA“ FKZ: 3514821600.

Bauer B. (1992). Ökologische Auswirkungen beim Betrieb von Wärmepumpen. In Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft (ÖZE), Jg. 45, Heft 5, Springer Verlag / Wien – New York, S. 145 – 150.

Bertermann, D. & Schwarz, H. (2017). Laboratory device to analyse the impact of soil properties on electrical and thermal conductivity. *Int. Agrophys.*, 2017, 31, S. 157-166. Erlangen.  
doi: 10.1515/intag-2016-0048

Bertermann, D. & Schwarz, H. (2018). Bulk density and water content-dependent electrical resistivity analyses of different soil classes on a laboratory scale. *Environmental Earth Sciences* 77. 16 (2018), 1-14. Erlangen. doi: 10.1007/s12665-018-7745-3

Brüggmann, J.; Jungnitz, L.; Uther, D. (2015): Heat dissipation of high voltage cable systems – a technical and agricultural study. Beitrag zur “9th International Conference on Insulated Power Cables - Jicable’15. 21.-25.06.2015 in Versailles. 6 S.

Burbaum, B., Filipinski, M., Krienke, K. (2019). Die Böden Schleswig-Holsteins mit Erläuterungen zur Bodenübersichtskarte 1:250.000. Kiel.

Ginschel, J. (1977). Betriebsergebnisse einer Erdreich-Wasser-Wärmepumpe, Elektrowärme im Technischen Ausbau. *Elektrowärme international Edition A35* (1977) A6

Jansson P.-E., Lundin L. C. (1984). Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag – Simulerade uttag för olika marker och klimat (Physikalische Effekte eines Wärmeaustzugs aus dem Boden). Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1984, R50.

Jelinek, R. & Jessberger, H. L., & Lackinger, F. (1968). Frostwirkungen im Straßenbau, Donau-Europäische Konferenz Wien, S. 106-138.

Kellner C. (2007). Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper. München.

Kersten, M.S. (1949). Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. ACFEL Tech. Rep. 23. Univ. of Minnesota, Minneapolis.

Konrad, J. M. & Morgenstern, N. R. (1980). A mechanistic theory of ice lens formation in finegrained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.17, no.4, pp. 473-486.

Konrad, J. M. & Morgenstern, N. R. (1981). The segregation potential of a freezing soil, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.18, no.4, pp. 482-491.

Konrad, J. M. & Morgenstern, N. R. (1982). Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.19, no.3, pp. 250-259.

Konrad, J. M. & Morgenstern, N. R. (1982). Effects of applied pressure on freezing soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.19, no.4, pp. 494-505.

Konrad, J. M. (1993). Sixteenth Canadian Geotechnical Colloquium: Frost heave in soils: concepts and engineering, vol.31, pp. 223-245.

Konrad, J. M. (2005). Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.42, pp. 38-50.

Lehmann, A. (2013). Die DIN 19731 in der Bodenkundlichen Baubegleitung – Praxisbeispiele. Hohenheim.

Levermann, E.-M. (26.01.2022). Leben im Untergrund – Beim Maulwurf zu Besuch. <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/saeugetiere/sonstige-saeugetiere/maulwurf/03204.html>

Lu, S., Ren, T.S., Gong, Y.S. & Horton, R. (2007). An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 8-14.

Ottow, J.C.G. (2011). *Mikrobiologie von Böden*. Berlin – Heidelberg.

Rieberer, R., & Em, G. (2006). *Wärmepumpen, Erdkollektoren, Garten- und Wohnqualität*. Eigenverlag.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Heidelberg.

Steinhäuser, H. (2020). *Boden-Klima-Tauscher*. Technisches Datenblatt für den horizontalen Einbau im Tichelmann-System. Bamberg.

Suttner, T. (2013). *Boden in der Planung – Bodenkundliche Baubegleitung*. München.

Trüby, P. u. Aldinger, E. (2013): Auswirkungen der Wärmeemission von Hochspannungserdkabeln auf den Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens. In: DRL (Hrsg.) (2013): Anforderungen an den Um- und Ausbau des Höchstspannungsstromnetzes – aus der Sicht von Naturschutz und Kulturlandschaftspflege. Schriftenreihe des DRL, Heft 84, S. 100-108.

Uther, D.; Trüby, P.; Aldinger, E.; Brakelmann, H.; Stammen, J. (2009): Wärmeemission bei Hoch- und Höchstspannungserdkabeln. *EW, Magazin für Energiewirtschaft*, Jg. 108, H. 10, S. 66-74.

VDI 4640, Blatt 1 (2010). *Thermische Nutzung des Untergrundes*. Richtlinie des Vereins der deutschen Ingenieure, Ausgabe Juni 2010.

## 6.8 Abschlussbericht des Instituts für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik der TU Chemnitz zur Prüfung der Systemdichtheit (AP 3.2)

# Abschlussbericht zu den Untersuchungen im Projekt Erdeis II

## Prüfung der Systemdichtheit an Rohrverbindungen

### 1. Ziele

Für die Untersuchung nichttechnischer Hemmnisse, die den Bau von Erdeisspeichern nachdrücklich behindern, wurden gängige Rohrverbindungen auf ihre Dichtigkeit geprüft. Dies soll einen nachhaltigen Betrieb des Erdeisspeichers gewährleisten und einen bedenkenlosen Einbau garantieren sowie eine Vermeidung bzw. frühzeitige Erkennung drohender Leckagen ermöglichen.

### 2. Prüfkörper

Für die Versuchsdurchführung wurden insgesamt fünf verschiedene Verbindungsvariationen gewählt und davon jeweils zwei Prüfkörper gefertigt. Die unterschiedlichen Rohrtypen sowie die dazu verwendeten Verbindungstypen sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

**Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Prüfkörper**

Bez.	Rohr	Verbindung
A1	PE-Xa	Schiebehülse
A2	PE-Xa	Schiebehülse
A3	PE-Xa	Q&E Uponor
A4	PE-Xa	Q&E Uponor
B1	PE-100 RC	Dornschw.
B2	PE-100 RC	Dornschw.
C1	PE-100 RC	Elektromuffe
C2	PE-100 RC	Elektromuffe
D1	PE-Xa	Elektromuffe
D2	PE-Xa	Elektromuffe

Die folgende Abbildung 1 gibt ergänzend eine bildliche Darstellung der unterschiedlichen Prüfkörper.

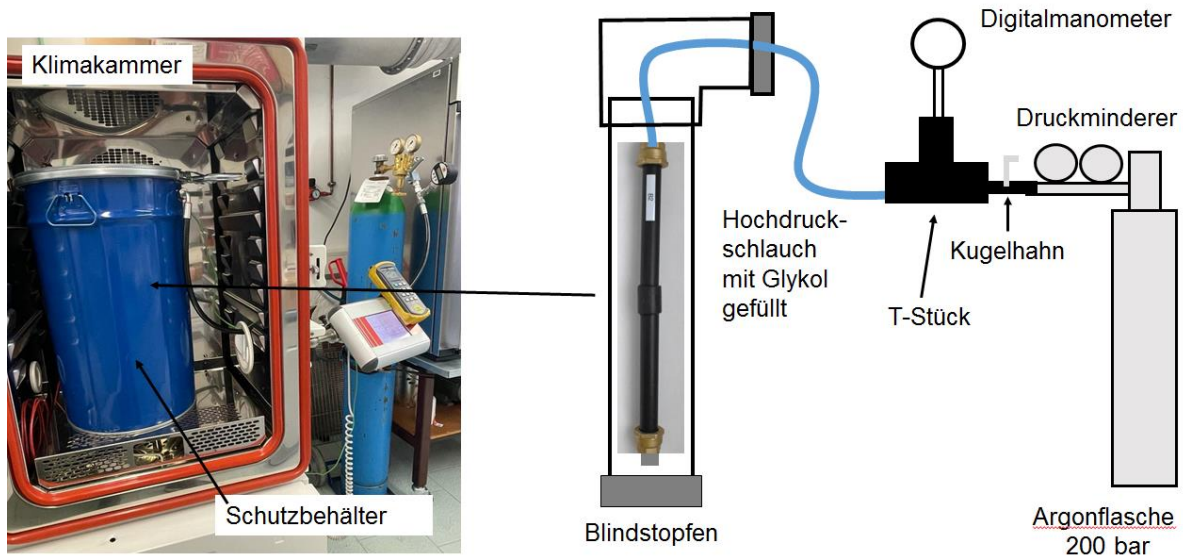


**Abbildung 1: Intakte Prüfkörper vor der Versuchsdurchführung**

Abgedrückt wurden die Prüfkörper mit reinem GeoFluid N®.

### 3. Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wurden die Prüfkörper innerhalb einer Schutzkammer in einer Klimakammer aufgestellt. Die Schutzkammer sollte dabei verhindern, dass das Wärmeträgermedium im Falle von Undichtigkeiten die Klimakammer beschädigt. Über einen mit Glykol gefüllten Hochdruckschlauch war der Versuchsaufbau mit einer Gasdruckflasche mit 200 bar verbunden. Zur Regelung sowie zum Entnehmen des aktuellen Druckes wurden ein T-Stück mit Manometer, ein Kugelhahn und ein Druckminderer dazwischengeschaltet. Der schematische Aufbau sowie ein Bild des realen Versuchsaufbaus können Abbildung 2 entnommen werden.



**Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Klimakammer, Schutzbehälter und Gasflasche**

#### 4. Versuchsablauf

Der Versuchsaufbau wurde für die beiden Prüfkörper je Variation in zwei Teile gegliedert. Mit dem ersten Prüfkörper wurde ein Berstversuch bei einer konstanten Temperatur von 20 °C durchgeführt. Dabei wurde der Druck schrittweise bis auf maximal 40 bar erhöht. Im zweiten Teil wurden dann die jeweiligen Gegenstücke in einem 3 Phasen-Test auf ihre Flexibilität getestet. In der ersten Testphase wurde der Prüfkörper mit dem darin befindlichen Glykol bei einer konstanten Temperatur von 20 °C auf den handelsüblichen Betriebsdruck gebracht, also 3 bar. Phase 2 beinhaltete eine Temperaturabsenkung von 20 °C auf -10 °C bei ebendiesem Betriebsdruck. Anschließend wurde in Phase 3 bei gleichbleibender Temperatur von -10 °C der Druck bis auf 13 bar erhöht. Die daraus resultierenden negativen Ergebnisse wurden dann bildlich vermerkt. Die entsprechenden Zeit-, Temperatur- und Druckwerte wurden zusätzlich tabellarisch und grafisch dargestellt.

#### 5. Ergebnisse

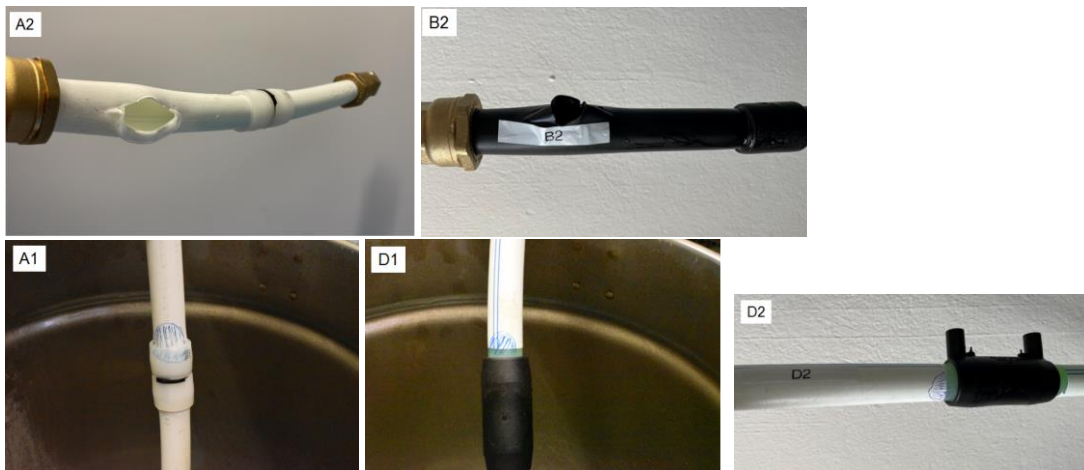
Zur übersichtlicheren und knapperen Darstellung wurde in diesem Abschnitt auf die Einzeldarstellung der jeweiligen Prüfkörper mit den Ergebnistabellen sowie den Grafiken verzichtet und lediglich eine Gesamttabelle (siehe Tabelle 2) beigefügt. Die Einzelergebnisse der jeweiligen Versuche können im Anhang betrachtet werden.

Die Varianten A3/4, B1 sowie C1/2 zeigten bei den Versuchen keine Undichtigkeiten. A2 und B2 erreichten im Berstversuch nicht den gewünschten maximalen Berstdruck, wurden aber auch in diesem Sinne nicht undicht, sondern es kam bei 32 bar bzw. 28 bar zu einem Versagen des Rohres (vgl. Abb. 3 oben). Bei A1 kam es bereits bei einem Druck von 2,51 bar zu einer Undichtigkeit am Verbindungsstück (vgl. Abb. 3 unten links). Die Charge D wurde bei beiden Versuchsvarianten schon nach kürzester Zeit undicht (vgl. Abb. 3 unten Mitte/rechts).

**Tabelle 2: Ergebnisse des 3-Phasen-Tests sowie der Berstversuche**

■ bestanden ■ versagt

Verbindung	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Berstdruck (max. 40 bar)	Versagen
A1	2,51 bar	-	-	-	<u>Verbindung</u>
A2	■	-	-	32 bar	Rohr
A3	■	■	■	-	-
A4	■	-	-	> 40 bar	-
B1	■	■	■	-	-
B2	■	-	-	28 bar	Rohr
C1	■	■	■	-	-
C2	■	-	-	> 40 bar	-
D1	1,15 bar	-	-	-	<u>Verbindung</u>
D2	2,02 bar	-	-	-	<u>Verbindung</u>



**Abbildung 3: Detektierte Undichtigkeiten im Überblick**

## 6. Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, es kam bei fünf von zehn Verbindungen zu Glykolaustritten, wobei sich bei zwei Verbindungen das Rohr als Schwachstelle erwies – und das bei Drücken die in der Realität nicht vorhanden sind. Bei den anderen drei Prüfkörpern konnten die Undichtigkeiten an den Verbindungen bereits im niedrigen Druckbereich festgestellt werden. Bezüglich der Ergebnisse wurde auch mit der Firma Rücksprache gehalten, welche die Prüfkörper hergestellt hat. Bei der Verbindung A1 wurde nicht mit einer Undichtigkeit gerechnet, da dies die gebräuchlichste Verbindung ist. Hier wurde ein Produktions- oder Materialfehler vermutet. Dies wird auch durch die Tatsache bestätigt, dass die Verbindung des zweiten Prüfkörpers dieser Variante beim Berstversuch dichtgehalten hat und lediglich das Rohr keinen höheren Druck aushält. Bei der Variante D hingegen wurde mit Undichtigkeiten gerechnet, da diese sonst nur in größerem Rohrdurchmesser verwendet werden



und für diesen kleinen Rohrdurchmesser auf ein anderes Schälgerät zur Schweißvorbereitung zurückgegriffen werden musste.

Folgernd lässt sich für diese Versuche sagen, dass es bei hochwertiger Produktion und Verbau nicht zu Undichtigkeiten kommt, auch nicht über einen längeren Zeitraum und sogar Drücke bis über 40 bar ausgehalten werden können. Hinzu kommt, dass etwaige Undichtigkeiten schon frühzeitig detektiert werden konnten. Überträgt man das in die Realität, sollte es möglich sein, solche Material-/Einbaufehler bereits frühzeitig – spätestens bei der Druckprüfung – zu erkennen und zu beheben, ohne dass erneute Tiefbauarbeiten notwendig sind.

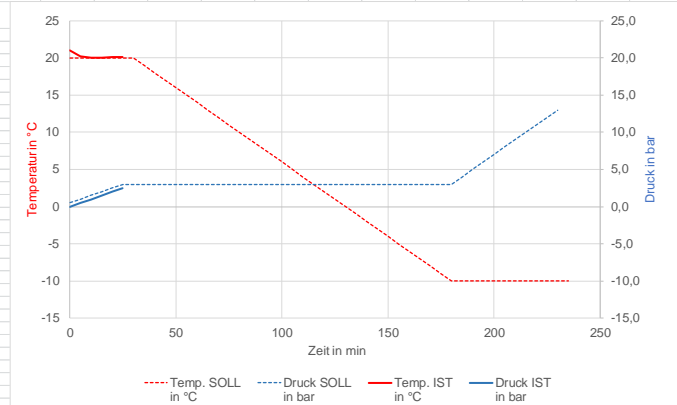
Fakt ist aber auch, dass für eine genauere Aussage eine deutlich höhere Anzahl an Versuchskörpern nötig gewesen wäre, was aber den zeitlichen Rahmen dieses Arbeitspaketes überstiegen hätte.

## 7. Anhang

### Ergebnistabellen der Einzelversuche mit entsprechenden Grafiken

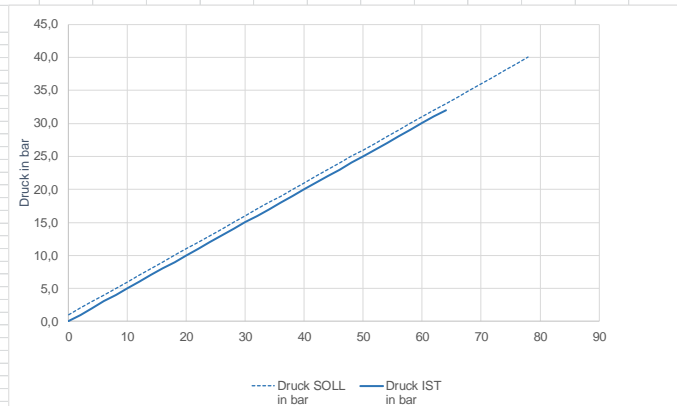
#### A1

Auftrag Prüfung der Systemdichtheit						
Prüfphase I Erhöhung des Druckes von 0 bar auf 3 bar (Betriebsdruck) bei konst. Temp. 20 °C						
Prüfphase II Absenkung der Temp. von 20 °C auf -10 °C bei Betriebsdruck (3 bar)						
Prüfphase III Erhöhung des Druckes von 3 bar auf 15 bar bei konst. Temp. -10°C						
Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	21,0	0	0,00	
5	5	20	20,2	0,5	0,53	
10	10	20	20,0	1,0	0,99	
15	15	20	20,0	1,5	1,49	
20	20	20	20,1	2,0	2,01	
25	25	20	20,1	2,5	2,51	Druckabfall, Verbindungsstück undicht
30	30	20		3,0		
30	0	20		3,0		
35	5	19		3,0		
40	10	18		3,0		
45	15	17		3,0		
50	20	16		3,0		
55	25	15		3,0		
60	30	14		3,0		
65	35	13		3,0		
70	40	12		3,0		
75	45	11		3,0		
80	50	10		3,0		
85	55	9		3,0		
90	60	8		3,0		
95	65	7		3,0		
100	70	6		3,0		
105	75	5		3,0		
110	80	4		3,0		
115	85	3		3,0		
120	90	2		3,0		
125	95	1		3,0		
130	100	0		3,0		
135	105	-1		3,0		
140	110	-2		3,0		
145	115	-3		3,0		
150	120	-4		3,0		
155	125	-5		3,0		
160	130	-6		3,0		
165	135	-7		3,0		
170	140	-8		3,0		
175	145	-9		3,0		
180	150	-10		3,0		
185	0	-10		3,0		
190	5	-10		4,0		
195	10	-10		5,0		
200	15	-10		6,0		
205	20	-10		7,0		
210	25	-10		8,0		
215	30	-10		9,0		
220	35	-10		10,0		
225	40	-10		11,0		
230	45	-10		12,0		
235	50	-10		13,0		



#### A2

Auftrag Prüfung der Systemdichtheit						
Berstversuch Erhöhung des Druckes von 0 bar auf Berstdruck (max 40 bar) bei RT						
Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20		0,0	0,00	
2	2	20		1,0	1,01	
4	4	20		2,0	2,02	
6	6	20		3,0	3,04	
8	8	20		4,0	4,02	
10	10	20		5,0	5,01	
12	12	20		6,0	6,00	
14	14	20		7,0	7,02	
16	16	20		8,0	8,03	
18	18	20		9,0	9,01	
20	20	20		10,0	10,03	
22	22	20		11,0	11,02	
24	24	20		12,0	12,03	
26	26	20		13,0	13,04	
28	28	20		14,0	14,03	
30	30	20		15,0	15,01	
32	32	20		16,0	16,00	
34	34	20		17,0	17,01	
36	36	20		18,0	18,01	
38	38	20		19,0	19,03	
40	40	20		20,0	20,02	
42	42	20		21,0	21,03	
44	44	20		22,0	22,02	
46	46	20		23,0	23,01	
48	48	20		24,0	24,04	
50	50	20		25,0	25,01	
52	52	20		26,0	26,01	
54	54	20		27,0	27,04	
56	56	20		28,0	28,03	
58	58	20		29,0	29,02	
60	60	20		30,0	30,02	
62	62	20		31,0	31,03	
64	64	20		32,0	32,03	Rohr ist Explodiert
66	66	20		33,0		
68	68	20		34,0		
70	70	20		35,0		
72	72	20		36,0		
74	74	20		37,0		
76	76	20		38,0		
78	78	20		39,0		
80	80	20		40,0		

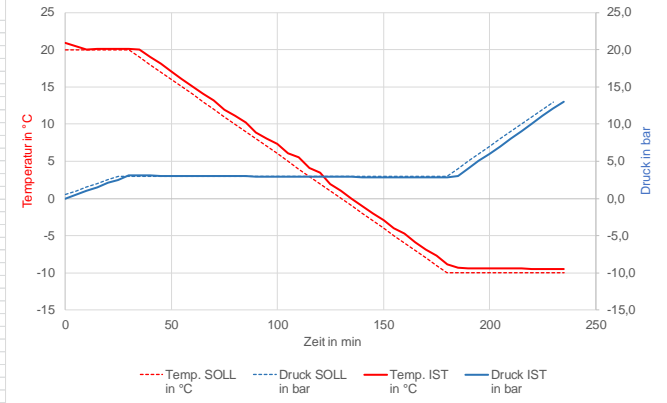


### A3

#### Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Prüfphase I Erhöhung des Druckes von 0 bar auf 3 bar (Betriebsdruck) bei konst. Temp. 20 °C  
 Prüfphase II Absenkung der Temp. von 20 °C auf -10 °C bei Betriebsdruck (3 bar)  
 Prüfphase III Erhöhung des Druckes von 3 bar auf 15 bar bei konst. Temp. -10°C

Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	20,9	0	0,00	
5	5	20	20,5	0,5	0,46	
10	10	20	20,0	1,0	1,07	
15	15	20	20,1	1,5	1,47	
20	20	20	20,1	2,0	2,09	
25	25	20	20,1	2,5	2,49	
30	30	20	20,1	3,0	3,09	
30	0	20	20,1	3,0	3,09	
35	5	19	20,0	3,0	3,08	
40	10	18	19,0	3,0	3,08	
45	15	17	18,1	3,0	3,06	
50	20	16	17,1	3,0	3,05	
55	25	15	16,1	3,0	3,04	
60	30	14	15,1	3,0	3,03	
65	35	13	14,1	3,0	3,03	
70	40	12	13,2	3,0	3,01	
75	45	11	11,9	3,0	3,00	
80	50	10	11,1	3,0	2,99	
85	55	9	10,2	3,0	2,98	
90	60	8	8,9	3,0	2,97	
95	65	7	8,1	3,0	2,96	
100	70	6	7,3	3,0	2,96	
105	75	5	6,1	3,0	2,94	
110	80	4	5,5	3,0	2,94	
115	85	3	4,1	3,0	2,93	
120	90	2	3,5	3,0	2,92	
125	95	1	1,9	3,0	2,91	
130	100	0	1,0	3,0	2,90	
135	105	-1	0,0	3,0	2,89	
140	110	-2	-1,0	3,0	2,88	
145	115	-3	-2,0	3,0	2,86	
150	120	-4	-2,9	3,0	2,85	
155	125	-5	-4,0	3,0	2,84	
160	130	-6	-4,7	3,0	2,83	
165	135	-7	-5,9	3,0	2,82	
170	140	-8	-6,9	3,0	2,82	
175	145	-9	-7,7	3,0	2,81	
180	150	-10	-8,9	3,0	2,80	
185	0	-10	-9,3	3,0	3,00	
190	5	-10	-9,4	4,0	4,04	
195	10	-10	-9,4	5,0	5,05	
200	15	-10	-9,4	6,0	6,03	
205	20	-10	-9,4	7,0	7,01	
210	25	-10	-9,4	8,0	8,05	
215	30	-10	-9,4	9,0	9,07	
220	35	-10	-9,5	10,0	10,06	
225	40	-10	-9,5	11,0	11,08	
230	45	-10	-9,5	12,0	12,07	
235	50	-10	-9,5	13,0	13,01	

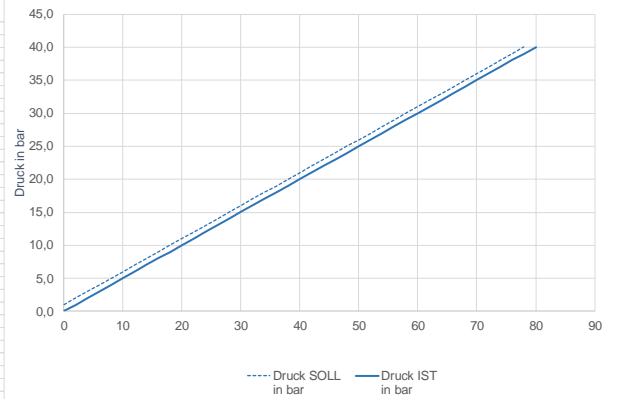


### A4

#### Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Berstversuch Erhöhung des Druckes von 0 bar auf Berstdruck (max 40 bar) bei RT

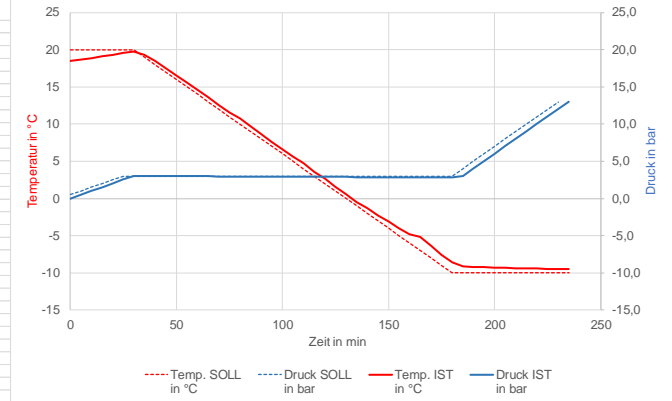
Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	0	0,00		
2	2	20	1,0	1,00		
4	4	20	2,0	2,01		
6	6	20	3,0	3,01		
8	8	20	4,0	4,02		
10	10	20	5,0	5,00		
12	12	20	6,0	6,01		
14	14	20	7,0	7,01		
16	16	20	8,0	8,01		
18	18	20	9,0	9,01		
20	20	20	10,0	10,03		
22	22	20	11,0	11,01		
24	24	20	12,0	12,02		
26	26	20	13,0	13,02		
28	28	20	14,0	14,02		
30	30	20	15,0	15,01		
32	32	20	16,0	16,02		
34	34	20	17,0	17,04		
36	36	20	18,0	18,02		
38	38	20	19,0	19,04		
40	40	20	20,0	20,02		
42	42	20	21,0	21,01		
44	44	20	22,0	22,02		
46	46	20	23,0	23,01		
48	48	20	24,0	24,01		
50	50	20	25,0	25,02		
52	52	20	26,0	26,04		
54	54	20	27,0	27,03		
56	56	20	28,0	28,02		
58	58	20	29,0	29,02		
60	60	20	30,0	30,01		
62	62	20	31,0	31,02		
64	64	20	32,0	32,01		
66	66	20	33,0	33,02		
68	68	20	34,0	34,03		
70	70	20	35,0	35,01		
72	72	20	36,0	36,01		
74	74	20	37,0	37,03		
76	76	20	38,0	38,03		
78	78	20	39,0	39,01		
80	80	20	40,0	40,02		



## B1

### Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

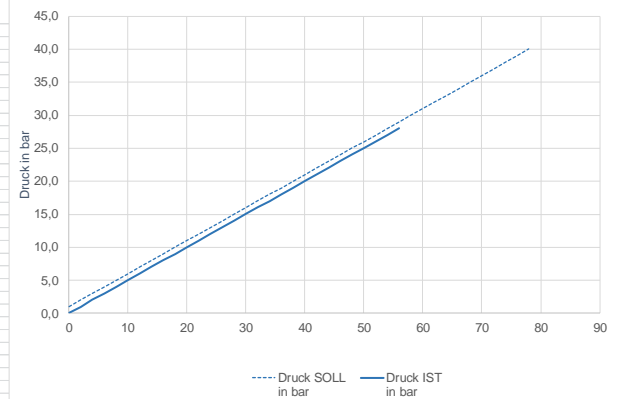
Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	19,5	0	0,00	
5	5	20	18,7	0,5	0,53	
10	10	20	18,9	1,0	1,05	
15	15	20	19,1	1,5	1,51	
20	20	20	19,3	2,0	2,02	
25	25	20	19,6	2,5	2,57	
30	30	20	19,8	3,0	3,05	
30	0	20	19,8	3,0	3,05	
35	5	19	19,3	3,0	3,04	
40	10	18	18,5	3,0	3,03	
45	15	17	17,5	3,0	3,02	
50	20	16	16,5	3,0	3,00	
55	25	15	15,6	3,0	3,00	
60	30	14	14,6	3,0	2,99	
65	35	13	13,6	3,0	2,98	
70	40	12	12,6	3,0	2,97	
75	45	11	11,6	3,0	2,96	
80	50	10	10,8	3,0	2,96	
85	55	9	9,7	3,0	2,95	
90	60	8	8,7	3,0	2,95	
95	65	7	7,6	3,0	2,94	
100	70	6	6,6	3,0	2,93	
105	75	5	5,6	3,0	2,92	
110	80	4	4,7	3,0	2,92	
115	85	3	3,6	3,0	2,91	
120	90	2	2,7	3,0	2,90	
125	95	1	1,6	3,0	2,90	
130	100	0	0,6	3,0	2,89	
135	105	-1	-0,5	3,0	2,88	
140	110	-2	-1,3	3,0	2,87	
145	115	-3	-2,3	3,0	2,87	
150	120	-4	-3,1	3,0	2,86	
155	125	-5	-4,0	3,0	2,85	
160	130	-6	-4,8	3,0	2,85	
165	135	-7	-5,2	3,0	2,84	
170	140	-8	-6,3	3,0	2,83	
175	145	-9	-7,6	3,0	2,82	
180	150	-10	-8,6	3,0	2,82	
185	0	-10	-9,1	3,0	3,02	
190	5	-10	-9,2	4,0	4,01	
195	10	-10	-9,2	5,0	5,04	
200	15	-10	-9,3	6,0	6,03	
205	20	-10	-9,3	7,0	7,06	
210	25	-10	-9,4	8,0	8,02	
215	30	-10	-9,4	9,0	9,05	
220	35	-10	-9,4	10,0	10,02	
225	40	-10	-9,5	11,0	11,03	
230	45	-10	-9,5	12,0	12,05	
235	50	-10	-9,5	13,0	13,01	



## B2

### Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	20	0	0,00	
2	2	20	20	1,0	1,01	
4	4	20	20	2,0	2,03	
6	6	20	20	3,0	3,01	
8	8	20	20	4,0	4,01	
10	10	20	20	5,0	5,01	
12	12	20	20	6,0	6,00	
14	14	20	20	7,0	7,04	
16	16	20	20	8,0	8,02	
18	18	20	20	9,0	9,02	
20	20	20	20	10,0	10,01	
22	22	20	20	11,0	11,02	
24	24	20	20	12,0	12,02	
26	26	20	20	13,0	13,02	
28	28	20	20	14,0	14,04	
30	30	20	20	15,0	15,01	
32	32	20	20	16,0	16,02	
34	34	20	20	17,0	17,01	
36	36	20	20	18,0	18,01	
38	38	20	20	19,0	19,02	
40	40	20	20	20,0	20,01	
42	42	20	20	21,0	21,01	
44	44	20	20	22,0	22,01	
46	46	20	20	23,0	23,02	
48	48	20	20	24,0	24,03	
50	50	20	20	25,0	25,01	
52	52	20	20	26,0	26,01	
54	54	20	20	27,0	27,03	
56	56	20	20	28,0	28,01	Rohr ist Explodiert
58	58	20	20	29,0		
60	60	20	20	30,0		
62	62	20	20	31,0		
64	64	20	20	32,0		
66	66	20	20	33,0		
68	68	20	20	34,0		
70	70	20	20	35,0		
72	72	20	20	36,0		
74	74	20	20	37,0		
76	76	20	20	38,0		
78	78	20	20	39,0		
80	80	20	20	40,0		

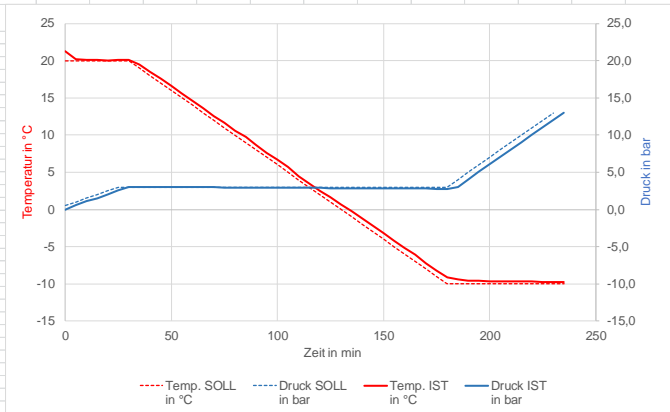


# C1

## Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Prüfphase I Erhöhung des Druckes von 0 bar auf 3 bar (Betriebsdruck) bei konst. Temp. 20 °C  
 Prüfphase II Absenkung der Temp. von 20 °C auf -10 °C bei Betriebsdruck (3 bar)  
 Prüfphase III Erhöhung des Druckes von 3 bar auf 15 bar bei konst. Temp. -10°C

Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	21,3	0	0,00	
5	5	20	20,2	0,5	0,56	
10	10	20	20,1	1,0	1,12	
15	15	20	20,1	1,5	1,53	
20	20	20	20,0	2,0	2,07	
25	25	20	20,1	2,5	2,61	
30	30	20	20,1	3,0	3,04	
30	0	20	20,1	3,0	3,04	
35	5	19	19,5	3,0	3,04	
40	10	18	18,5	3,0	3,03	
45	15	17	17,6	3,0	3,02	
50	20	16	16,6	3,0	3,01	
55	25	15	15,6	3,0	3,00	
60	30	14	14,6	3,0	3,00	
65	35	13	13,6	3,0	2,99	
70	40	12	12,6	3,0	2,98	
75	45	11	11,7	3,0	2,97	
80	50	10	10,6	3,0	2,96	
85	55	9	9,8	3,0	2,95	
90	60	8	8,7	3,0	2,94	
95	65	7	7,6	3,0	2,93	
100	70	6	6,7	3,0	2,92	
105	75	5	5,7	3,0	2,91	
110	80	4	4,5	3,0	2,91	
115	85	3	3,5	3,0	2,90	
120	90	2	2,5	3,0	2,89	
125	95	1	1,7	3,0	2,88	
130	100	0	0,7	3,0	2,87	
135	105	-1	-0,2	3,0	2,86	
140	110	-2	-1,2	3,0	2,85	
145	115	-3	-2,2	3,0	2,84	
150	120	-4	-3,2	3,0	2,83	
155	125	-5	-4,2	3,0	2,82	
160	130	-6	-5,2	3,0	2,81	
165	135	-7	-6,1	3,0	2,80	
170	140	-8	-7,2	3,0	2,80	
175	145	-9	-8,2	3,0	2,79	
180	150	-10	-9,1	3,0	2,78	
185	0	-10	-9,4	3,0	3,05	
190	5	-10	-9,6	4,0	4,01	
195	10	-10	-9,6	5,0	5,07	
200	15	-10	-9,7	6,0	6,09	
205	20	-10	-9,7	7,0	7,06	
210	25	-10	-9,7	8,0	8,10	
215	30	-10	-9,7	9,0	9,06	
220	35	-10	-9,7	10,0	10,04	
225	40	-10	-9,8	11,0	11,05	
230	45	-10	-9,8	12,0	12,03	
235	50	-10	-9,8	13,0	13,02	

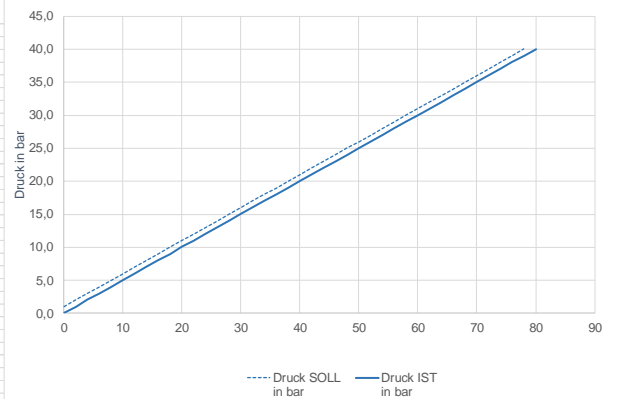


# C2

## Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Berstversuch Erhöhung des Druckes von 0 bar auf Berstdruck (max 40 bar) bei RT

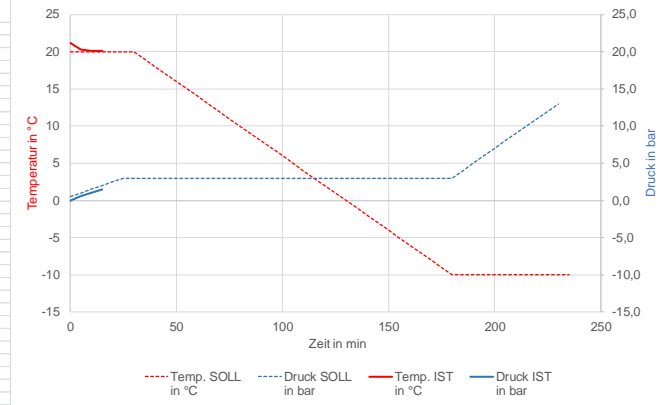
Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	0	0,00		
2	2	20	1,0	1,01		
4	4	20	2,0	2,03		
6	6	20	3,0	3,01		
8	8	20	4,0	4,01		
10	10	20	5,0	5,01		
12	12	20	6,0	6,02		
14	14	20	7,0	7,02		
16	16	20	8,0	8,01		
18	18	20	9,0	9,01		
20	20	20	10,0	10,04		
22	22	20	11,0	11,01		
24	24	20	12,0	12,02		
26	26	20	13,0	13,01		
28	28	20	14,0	14,02		
30	30	20	15,0	15,01		
32	32	20	16,0	16,02		
34	34	20	17,0	17,04		
36	36	20	18,0	18,02		
38	38	20	19,0	19,04		
40	40	20	20,0	20,02		
42	42	20	21,0	21,01		
44	44	20	22,0	22,02		
46	46	20	23,0	23,01		
48	48	20	24,0	24,01		
50	50	20	25,0	25,02		
52	52	20	26,0	26,04		
54	54	20	27,0	27,03		
56	56	20	28,0	28,02		
58	58	20	29,0	29,02		
60	60	20	30,0	30,01		
62	62	20	31,0	31,02		
64	64	20	32,0	32,01		
66	66	20	33,0	33,02		
68	68	20	34,0	34,03		
70	70	20	35,0	35,01		
72	72	20	36,0	36,01		
74	74	20	37,0	37,03		
76	76	20	38,0	38,03		
78	78	20	39,0	39,01		
80	80	20	40,0	40,02		



# D1

## Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20	21,2	0	0,00	
5	5	20	20,3	0,5	0,58	
10	10	20	20,1	1,0	1,05	
15	15	20	20,1	1,5	1,51	Druckabfall, Verbindungsstück undicht
20	20	20		2,0		
25	25	20		2,5		
30	30	20		3,0		
30	0	20		3,0		
35	5	19		3,0		
40	10	18		3,0		
45	15	17		3,0		
50	20	16		3,0		
55	25	15		3,0		
60	30	14		3,0		
65	35	13		3,0		
70	40	12		3,0		
75	45	11		3,0		
80	50	10		3,0		
85	55	9		3,0		
90	60	8		3,0		
95	65	7		3,0		
100	70	6		3,0		
105	75	5		3,0		
110	80	4		3,0		
115	85	3		3,0		
120	90	2		3,0		
125	95	1		3,0		
130	100	0		3,0		
135	105	-1		3,0		
140	110	-2		3,0		
145	115	-3		3,0		
150	120	-4		3,0		
155	125	-5		3,0		
160	130	-6		3,0		
165	135	-7		3,0		
170	140	-8		3,0		
175	145	-9		3,0		
180	150	-10		3,0		
185	0	-10		3,0		
190	5	-10		4,0		
195	10	-10		5,0		
200	15	-10		6,0		
205	20	-10		7,0		
210	25	-10		8,0		
215	30	-10		9,0		
220	35	-10		10,0		
225	40	-10		11,0		
230	45	-10		12,0		
235	50	-10		13,0		



# D2

## Auftrag Prüfung der Systemdichtheit

Zeit in min	Zeit in min	Temp. SOLL in °C	Temp. IST in °C	Druck SOLL in bar	Druck IST in bar	Beobachtung (undicht, zischt, beult aus, Druckabfall, etc.)
0	0	20		0	0,00	
2	2	20		1,0	1,01	
4	4	20		2,0	2,02	Druckabfall, Verbindungsstück undicht
6	6	20		3,0		
8	8	20		4,0		
10	10	20		5,0		
12	12	20		6,0		
14	14	20		7,0		
16	16	20		8,0		
18	18	20		9,0		
20	20	20		10,0		
22	22	20		11,0		
24	24	20		12,0		
26	26	20		13,0		
28	28	20		14,0		
30	30	20		15,0		
32	32	20		16,0		
34	34	20		17,0		
36	36	20		18,0		
38	38	20		19,0		
40	40	20		20,0		
42	42	20		21,0		
44	44	20		22,0		
46	46	20		23,0		
48	48	20		24,0		
50	50	20		25,0		
52	52	20		26,0		
54	54	20		27,0		
56	56	20		28,0		
58	58	20		29,0		
60	60	20		30,0		
62	62	20		31,0		
64	64	20		32,0		
66	66	20		33,0		
68	68	20		34,0		
70	70	20		35,0		
72	72	20		36,0		
74	74	20		37,0		
76	76	20		38,0		
78	78	20		39,0		
80	80	20		40,0		
82	82	20		41,0		
84	84	20		42,0		
86	86	20		43,0		
88	88	20		44,0		
90	90	20		45,0		
92	92	20		46,0		
94	94	20		47,0		
96	96	20		48,0		
98	96	20		49,0		
100	96	20		50,0		

