

Ernte von urbaner solarer Abwärme von Gebäuden und Oberflächen zur Vermeidung der sommerlichen Überhitzung in Städten

Heat Harvest

E. Haslinger, S. Hoyer,
M. Lauermann, D. Rupprecht,
D. Lager, V. Vana, R. Philipp,
R. Friedrich

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

44/2021

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Ernte von urbaner solarer Abwärme von Gebäuden und Oberflächen zur Vermeidung der sommerlichen Überhitzung in Städten

Heat Harvest

DI Dr. Edith Haslinger, DI Dr. Michael Lauermann, DI Dr. Daniel Lager,
Mag. Veronica Vana, Robin Friedrich, BSc.
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Mag. Stefan Hoyer, Doris Rupprecht MSc
Geologische Bundesanstalt

DI Robert Philipp
TERRA Umwelttechnik GmbH

Wien, Februar 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	10
3	Ausgangslage	12
	3.1. Stand der Technik	12
	3.2. Motivation	17
	3.3. Ziele.....	19
	3.4. Innovationsgehalt	23
4	Projekthalt	25
	4.1. Oberirdische Testanlage für die Nachbildung der Einspeisung solarer Überschusswärme in die Test-Erdwärmesonde	26
	4.1.1. Konzeptionierung der Anlage	26
	4.1.2. Aufbau und Betrieb der Anlage:	28
	4.2. Thermal Response Tests	29
	4.3. Sonstige erhobene Daten	30
	4.4. Datenaufbereitung für die folgende Modellierung	31
	4.5. Messung von thermophysikalischen Parametern am Bohrkern der Test-Erdwärmesonde...31	
	4.5.1. Messungen mit Handmessgeräten.....	33
	(1) Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	33
	(2) Bodenfeuchte, Bodentemperatur, elektrische Leitfähigkeit.....	34
	4.5.2. Messungen im Thermophysiklabor	36
	(1) Wärmeleitfähigkeit mittels Heat Flow Meter - HFM.....	36
	(2) Wärmekapazität mittels Differential Scanning Calorimetry – DSC	39
	(3) Thermische Ausdehnung mittels Schubstangendilatometrie	41
	4.6. Numerische Modellierung aller Systemkomponenten unter Einbeziehung der Feld- und Laborversuche	43
	4.6.1. Modellaufbau und Parametrisierung	43
	4.6.2. Modellkalibrierung	43
	4.7. Kennfelderstellung Wärmepumpe und Szenarienmodellierung	47
5	Ergebnisse	52
	5.1. Daten aus der Versuchsanlage als Grundlage für die Modellierung	52
	5.2. Thermal Response Tests	54
	5.3. Thermophysikalische Bestimmungen am Bohrkernmaterial.....	56
	5.3.1. Stratigraphie des Bohrkerns	56
	5.3.2. Thermophysikalische Untersuchungen mit Handmessgeräten.....	56

5.3.3. Wärmeleitfähigkeitsmessungen mittels Heat Flow Meter.....	60
5.3.4. Effektive Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität	61
5.3.5. Thermische Ausdehnung	62
5.3.6. Diskussion	65
5.4. Kennfelderstellung Wärmepumpe und Szenarien-modellierung.....	66
6 Schlussfolgerungen.....	72
7 Ausblick und Empfehlungen.....	74
8 Verzeichnisse.....	75

1 Kurzfassung

Zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln werden vielerorts schon Begrünungsmaßnahmen sowie Grün- und/oder Wasserflächen propagiert und eingesetzt. Der Einsatz dieser Lösungen ist allerdings nicht immer ausreichend bzw. genehmigungsfähig oder erwünscht, wie z.B. bei Altbauten, historischen oder denkmalgeschützten Gebäuden. Eine einfache, unsichtbare und saisonal betriebene Lösung ist die „Ernte“ solarer urbaner Überschusswärme von Gebäudeoberflächen, Gehwegen, Straßen und Plätzen durch flach verlegte Absorberleitungen, welche danach in Erdsondenspeicher zur späteren Verwendung als Wärmequelle zur Gebäudeheizung eingebracht wird. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus urbaner Oberflächen von bis zu 50 °C ist mit Vorlauftemperaturen in den Speicher von bis zu 40 °C zu rechnen.

Übliche Berechnungs- und Simulationsmethoden für die Auslegung von Erdsondenfeldern stoßen bei den Bedingungen, wie sie in stark aufgeheizten innerstädtischen Flächen auftreten an ihre Grenzen bzw. sind Simulationen mit höheren Temperaturen nicht ohne weiteres möglich. Die Untergrundtemperaturen einer Stadt sind durch Bebauung und Nutzung ohnehin schon gegenüber den klimatisch bedingten Temperaturen erhöht. Eine Einbringung von Abwärme zur saisonalen Speicherung und die Integration von Wärmepumpen ist daher sehr sensibel zu behandeln und muss sich unbedingt auf verlässliche und genaue Zahlen und Berechnungen stützen.

Vor einem angestrebten Pilotprojekt mussten daher noch eine Vielzahl technischer Fragen geklärt werden. Das Ziel des Projekts Heat Harvest war es, umfassende Untersuchungen des thermischen Verhaltens des Untergrunds bei Eintragung solarer urbaner Abwärme in einem Großtestfeld auf einem Freigelände und begleitenden Laborexperimenten sowie Simulationen unter verschiedenen Voraussetzungen durchzuführen. Damit konnten zielgerichtet die passenden Rahmenbedingungen für die Ernte von solarer Abwärme im urbanen Raum ausgelotet werden, um den Ansatz später in ein größeres kooperatives Forschungsvorhaben einzubetten.

Die Ergebnisse zeigten, dass bei geologisch geeignetem Untergrund auch höhere Temperaturen, wie sie in urbanen Flächen auftreten, ohne negative thermische Auswirkungen in Erdsondenspeicher eingebracht werden können. Die Technologie der Gewinnung von solarer Überschusswärme in urbanen Gebieten und der thermischen Speicherung im Untergrund hat hohes Potenzial in Städten, die besonders vom Urban Heat Island-Effekt betroffen sind.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Gewinnung von solarer Überschusswärme in Städten kann wesentlich zur Vermeidung bzw. Verringerung des ‚Urban Heat Island‘-Effekts beitragen.
- Gleichzeitig führt das Konzept zu einer Effizienzsteigerung im Heizbetrieb und leistet somit einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Raumwärme.
- Die höhere Einspeisetemperatur (bis zu 40 °C statt der üblichen maximal 30 °C) führen zu einer deutlichen Erhöhung der Übertragungsleistung der Sonde, aber nicht zu exzessiver Erwärmung des Untergrunds.
- Der laterale Einflussradius ist bei geeigneter Geologie räumlich sehr begrenzt.

- Die entsprechende „geeignete Geologie“ ist ein Ton-Schluff-dominiertes System wie es zum Beispiel für das Wiener Stadtgebiet südlich der Donau typisch ist.
- Saisonale Wärmespeicherung in Erdsondenfeldern und generell im Untergrund ist gerade für dicht verbaute Städte interessant, da es eine platzsparende und unsichtbare Technologie ist.
- Eine genaue Kenntnis des Untergrunds (Aufbau, Grundwasser, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) ist wesentlich für eine korrekte Planung und einen effizienten Betrieb eines Erdsondenspeichers.
- Gewinnung von solarer Überschusswärme ist für (denkmalgeschützte) Bestandsgebäude auch für die Nachrüstung interessant.
- Die gefundenen Erkenntnisse gelten nicht nur für die Kombination Asphaltkollektor - Erdwärmesonde, sondern gelten für alle saisonalen Wärmequellen (auch für klassische Solarthermiekollektoren).
- Dimensionierung, Betrieb und Regelung der Anlage:
 - Durch die Beladung des Speichers steigt auf der einen Seite die JAZ der Wärmepumpe, dadurch sinkt der Stromverbrauch und die Wärmeentnahme steigt um etwa 20 %.
 - Auf der anderen Seite führt der Anstieg der Speichertemperatur zu einer verringerten Temperaturdifferenz zur Wärmequelle Asphaltkollektor: Folglich sinkt über die Jahre der Wärmeeintrag.
 - Zu Beginn muss der Wärmeeintrag deutlich größer sein als der Entzug, ist der Speicher vollgeladen entsteht ein selbstregulierendes System.
 - Bei entsprechender Dimensionierung ist daher keine aufwändige Regelungstechnik benötigt.

Die im Rahmen dieses Sondierungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse sollen in weitere Forschungsvorhaben einfließen und mittelfristig zur Durchführung eines Demonstrationsprojekts genutzt werden. Da es sich im derzeitigen Stadium um eine Sondierung handelte, wurden die erzielten Erkenntnisse vor allem in mehreren Publikationen und auf Veranstaltungen für das wissenschaftliche Forschungsumfeld präsentiert. Weiters wurden bereits während der Projektdurchführungsphase Stakeholder eingebunden, für die die Nutzung dieser neuartigen Technologie in ihrem Arbeitsumfeld von großem ökologischen wie auch ökonomischen Vorteil sein kann. Da zudem auch mehrere Bauträger bereits Interesse an der Anwendung angemeldet haben und eine Erprobung und Umsetzung in ihren Vorhaben in ernsthafte Erwägung ziehen, sieht das Konsortium ein erhebliches Marktpotenzial.

Folgende Zielgruppen können somit als relevant angesehen werden:

- Bauträger
- Gebäudebetreiber
- Kommunen
- Industrie- und Infrastrukturbetriebe mit großen Nutzungsflächen

2 Abstract

In order to avoid urban heat islands, greening measures as well as green and/or water surfaces are already being propagated and used in many places. However, the use of these solutions is not always sufficient, approvable or desirable, such as in old, historic or listed buildings. A simple, invisible and seasonal solution is the "harvesting" of solar urban excess heat from building surfaces, sidewalks, roads and squares through shallow absorber ducts, which are then used in borehole heat exchanger (BHE) fields for later use as heat source for the buildings. Due to the high temperature level of urban surfaces of up to 50 ° C, inlet temperatures into the BHE storage of up to 40 ° C can be expected.

Conventional calculation and simulation methods for the design of BHE fields are limited by the conditions that occur in strongly heated inner city areas, or simulations with higher temperatures are not easily possible. The underground temperatures of a city are already increased by building and use compared to the climatic conditions. The introduction of waste heat for seasonal storage and the integration of heat pumps is therefore very sensitive and must be based on reliable and accurate figures and calculations.

Therefore, some technical questions still need to be clarified before a planned pilot project can be realized. The aim of the project Heat Harvest was to carry out comprehensive investigations of the thermal behavior of the subsurface in the case of solar thermal waste heat in a large-scale test facility on an open-air site and accompanying laboratory experiments as well as simulations under different conditions. In this way, the appropriate framework conditions for the harvest of solar waste heat in urban areas can be explored purposefully in order to later embed the approach into a larger cooperative research and eventually a demonstration project.

The results showed that with a geologically suitable underground, higher surface temperatures which occur in urban areas, can be introduced into borehole heat exchanger fields without negative thermal effects. The technology of harvesting excess solar heat in urban areas and underground thermal storage has great potential in cities that are particularly affected by the Urban Heat Island-effect.

The most important findings from the project can be summarized as follows:

1. The harvesting of excess solar heat in cities can make a significant contribution to avoiding or reducing the 'Urban Heat Island' effect.
2. At the same time, the concept leads to an increase in efficiency in heating operation and thus makes a contribution to the decarbonisation of space heating.
3. The higher feed-in temperature (up to 40 ° C instead of the usual maximum of 30 °C) lead to a significant increase in the transmission capacity of the BHE, but not to excessive heating of the subsurface.
4. The lateral radius of influence is spatially very limited with suitable geology.
5. The corresponding "suitable geology" is a clay-silt-dominated system, as is typical for the Vienna urban area south of the Danube, for example.

6. Seasonal heat storage in geothermal BHE fields and generally the underground is particularly interesting for densely built cities, since it is a space-saving and invisible technology.
7. A precise knowledge of the subsurface (structure, groundwater, thermal conductivity, thermal capacity) is essential for correct planning and efficient operation of a geothermal storage.
8. The use of excess solar heat is also of interest for (listed) existing buildings for retrofitting.
9. The findings not only apply to the combination of asphalt collector and geothermal borehole heat exchangers, but also apply to all seasonal heat sources (also for classic solar thermal collectors).
10. Dimensioning, operation and control of the system:
 - As the storage tank is loaded, the COP of the heat pump increases on the one hand, which in turn reduces power consumption and heat extraction increases by around 20%.
 - On the other hand, the increase in the storage tank temperature leads to a reduced temperature difference to the heat source asphalt collector: As a result, the heat input decreases over the years.
 - At the beginning, the heat input must be significantly greater than the withdrawal, if the storage tank is fully charged, a self-regulating system is created.
 - With the appropriate dimensioning, no complex control technology is required. The knowledge gained as part of this exploratory project is to be incorporated into further research projects and used in the medium term to carry out a demonstration project. Since it was a question of exploration at the current stage, the findings obtained were mainly presented in several publications and at events for the scientific research community.

In addition, stakeholders were already involved during the project implementation phase, for whom the use of this new type of technology in their work environment can be of great ecological as well as economic advantage. Since several property developers have already expressed interest in the application and are seriously considering testing and implementing it in their projects, the consortium sees considerable market potential.

The following target groups can therefore be considered relevant:

- Developers
- Building operators
- Municipalities
- Industrial and infrastructure companies with large usable areas

3 Ausgangslage

3.1. Stand der Technik

- **Urban Heat Islands und Einschränkungen von bisher vorgeschlagenen Lösungen der Begrünung und Wasserflächen**

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels sind besonders in Städten stark zu spüren und zu beobachten. Gab es zwischen 1960 und 1990 in Wien im Schnitt neun Hitzetage pro Saison, so waren es ab 1990 im Schnitt 18 pro Saison. Im Jahr 2015 wurden sogar 42 Hitzetage gezählt. 2018 war in Wien in zweierlei Hinsicht ein Rekordsommer. Es gab die längste Hitzewelle seit Beginn der Wetteraufzeichnungen und auch einen Rekord an Tropennächten in Folge.

Das ist zum einen dem globalen Klimawandel und zum anderen dem Urban Heat Island Effekt als lokales Phänomen zuzuschreiben. Die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen schlägt sich in den ohnehin durch die Bebauung erhöhten Temperaturen in Städten als sogenannte „städtische Wärmeinseln“ oder „Urban Heat Islands“ (UHI) nieder. Im Verlauf der letzten Jahrzehnte ist die Zahl der jährlichen Hitzetage mit Temperaturen über 30 °C erheblich angestiegen (Climathon, 2018). Vor allem im dicht bebauten innerstädtischen Bereich von Städten mit wenig Grün, hoher solarer Abwärme und geringer Luftzirkulation liegt die gefühlte Temperatur noch höher als die ohnehin schon erhöhte Temperatur. Der tagsüber durch aufgeheizte Gebäude und Infrastrukturflächen (Straßen, Gehwege, Plätze) generierte Wärmeüberschuss in Kombination mit der verringerten Luftzirkulation und der verstärkten Luftverschmutzung erhöht das Gesundheitsrisiko der städtischen Bevölkerung. Die Vermeidung oder Verringerung des UHI-Effekts ist also in vielen Städten Teil der Klimastrategie (Brandenburg et al., 2016).

Eine Maßnahme zur Reduktion oder gänzlichen Ausschaltung dieser urbanen Hitzeinseln sind Begrünungsmaßnahmen sowie Grün- und/oder Wasserflächen, wie vielfach propagiert oder sogar eingesetzt. Der Einsatz dieser Lösungen ist allerdings nicht immer ausreichend bzw. genehmigungsfähig oder erwünscht, wie z.B. bei Altbauten, historischen oder denkmalgeschützten Gebäuden.

- **Gewinnung solarer Abwärme aus urbanen Oberflächen**

Die Idee der Verringerung solarer Überwärmung von urbanen Oberflächen hat sich vor allem in den letzten Jahren im Zuge der gesamten Diskussion um den UHI-Effekt immer mehr verbreitet. Zur Senkung der Wärmeströmung von überhitzten urbanen Flächen gibt es mehrere Strategien (Santamouris, 2013):

- a) Verwendung von Materialien mit reduzierter Albedo, wie z.B. Beimengungen von Schlackenzement oder Flugasche sowie Verwendung weißer Beschichtungen oder von Materialien, die durch Beimengungen von Infrarot-reflektiven Materialien eine niedrige Albedo haben („Cool Pavement“)
- b) Erhöhung der Permeabilität der Materialien durch Poren, um Evaporation zu erhöhen

- c) Beimengung von Materialien mit hoher Wärmespeicherkapazität
- d) Abfuhr der Abwärme über flach verlegte Absorber oder zirkulierendes Wasser unter der Asphaltdecke
- e) Verschattung von urbanen Oberflächen

Das Projekt Heat Harvest setzt beim oben erwähnten Unterpunkt d), also der Abfuhr von solarer Überschusswärme über flach verlegte Kollektoren unter der Asphalt- oder Pflasterdecke, an, wobei die genaue Art der Gewinnung (Typ Kollektor, Verlegetiefe und -art etc.) noch nicht Gegenstand dieses Projekts war. Die Aspekte der Gewinnung sollen dann im angestrebten Nachfolge-Pilotprojekt betrachtet werden.

International werden vor allem im US-amerikanischen Raum, in Europa v.a. in südeuropäischen Ländern wie Griechenland sowie im asiatischen Raum, „Cool Pavements“ eingesetzt. Diese haben durch IR-reflektive Materialien eine niedrigere Albedo (Santamouris, 2013).

In den Niederlanden gibt es einen Anbieter von sogenannten „Road Energy Systems®(2007)“ – die Firma Ooms Civiel -, wo beim Neubau von Straßen sofort bei Asphaltierung flach verlegte Kollektoren verlegt werden. Für diese Systeme gibt es bisher einige wenige umgesetzte Beispiele, wie z.B. in Avenhorn in einer Wohnsiedlung für Senioren.

In der Projektpräsentation des Projekts „ecoRegeneration“ am 03.12.2018 beim Koordinator e7 hat der Geschäftsführer von Ooms Civiel Arian de Bondt einen Vortrag über Asphaltkollektoren gehalten. Auch wenn die genaue Gewinnungstechnologie im Rahmen dieser Sondierung noch nicht betrachtet wird, sind die Systeme für Asphaltkollektoren in einer späteren Umsetzung sicherlich interessant und werden dann als mögliche Gewinnungstechnologie im Projekt betrachtet.



Abbildung 1 (links und rechts): Beispiele für Asphaltkollektoren (Road Energy Systems®, 2007)

Im Rahmen des EU Interreg – Alpine Space Projekts „GRETA“, an dem die Geologische Bundesanstalt beteiligt war, wurde auch der Einsatz von Asphaltkollektoren in Verbindung mit Erdwärmesonden zur Eisfreihaltung von Transportinfrastruktur wie Brücken, Bahnsteigen oder Verkehrsflächen als ein

innovativer Aspekt der Oberflächennahen Geothermie beleuchtet. Neben der Eisfreihaltung wird die sommerliche Wärme dazu genutzt, um die Erdwärmesonden zu regenerieren. Die erbrachten solaren Erträge wurden anhand von einigen Musterprojekten erhoben und unter den „GRETA Best Practices“ gesammelt (CESBA, 2018). Aus den Ergebnissen und gesammelten Daten können Kennlinien für zu erwartende Erträge abgeleitet werden.

- **Geothermische Wärmespeicherung**

Die Anwendung von Wärmepumpen zur Nutzung von Umweltwärme weist in Österreich nach einer Phase der Stagnation ein kontinuierliches Wachstum des Gesamtbestands seit 2007 auf. Im Jahr 2014 betrug dieser ca. 223.000 Stück bei einer jährlichen Verkaufszahl von ca. 19.000 Stück (Biermayr et al., 2015). Neben der kontinuierlichen Verschiebung der Wärmepumpenanwendung von der Brauchwasseraufbereitung zur Heizung kann auch ein Trend der Erdwärmeanwendungen von der individuellen Anwendung in ländlichen Gebieten (Eigenheimbeheizung) hin zu Nutzungen in städtischen Neubaugebieten sowie in der Anwendung in großvolumigen Bauprojekten beobachtet werden.

Die Geologische Bundesanstalt (P2) führt seit dem Jahr 2013 vertiefende Studien im Auftrag der Magistratsabteilung MA20 der Stadt Wien zur Integration von Methoden der Oberflächennahen Geothermie in Wiener Stadterweiterungsgebieten durch (*Bund- Bundesländer Kooperationsprojekt / BBK WC-31, WC-33 und WC-35*). Die hierbei betrachteten Anwendungsmethoden konzentrieren sich auf die thermische Nutzung des obersten Grundwasserkörpers (Wasser-Wasser-Wärmepumpen) sowie auf die Nutzung geschlossener Bohrlochwärmetauscher (Erdwärmesonden) mit Zieltiefen von 100 bis maximal 300 Meter. Im Neubausegment hat sich in den letzten Jahren aufgrund der modernen Gebäudehüllen aber der Trend von der reinen Heizanwendung hin zur bidirektionalen Nutzung mit saisonaler Speicherung verschoben. Die Nutzung eines Erdwärmesondenfelds sowohl für Raumheizung als auch für -klimatisierung ist daher im Neubausegment als Stand der Technik zu betrachten.

Der dezidierte Einsatz eines Sondenfelds als Wärmespeicher befindet sich jedoch noch im experimentellen Stadium. Im Rahmen des Projekts DEAGENT-NET (FFG) wurde eine ausgiebige Recherche zu diesem Thema angestellt und Betriebserfahrungen der einzelnen bekannten Speicherprojekte gesammelt. Auf diesem Kenntnisstand kann weiter aufgebaut werden.

- **Modellierung des thermischen Verhaltens in Erdwärmesonden und im Untergrund**

Die thermischen Vorgänge im Inneren einer Erdwärmesonde sind sehr komplex und rechnerisch schwer abzubilden. Daher kommen in der Praxis meist analytische Näherungslösungen zum Einsatz, welche unter normalen Bedingungen hinreichend getestet sind und in der Regel gute Ergebnisse liefern. Unter normalen Bedingungen sind in diesem Zusammenhang vor allem längere Betriebszeiten und relativ geringe Temperaturen gemeint. Für das geplante Vorhaben, Wärme aus Asphaltkollektoren einzuspeichern, muss allerdings mit raschen Laständerungen und hohen Einspeisetemperaturen gerechnet werden. Analytische Lösungen liefern hier keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da die mit raschen Lastschwankungen einhergehenden Speichereffekte nicht berücksichtigt werden. Die allgemein gebräuchlichen und von Regelblättern empfohlenen, auf analytischen Lösungen beruhenden, Planungsmethoden sind aufgrund der hohen zu erwartenden Dynamik und relativ hohen

Temperaturen im Sondenvorlauf bisher nicht ausreichend (ÖWAV-RB 207, 2009). Daher wird zunehmend auf Planungstools auf Grundlage numerischer 2D und 3D Rechenmethoden zurückgegriffen. Diese besitzen den Vorteil, instationäre Lösungen zuzulassen, was wiederum für die Bemessung eines saisonalen Wechselbetriebs von grundlegender Bedeutung ist.

Im Projektkonsortium stehen verschiedene numerische Methoden zur Verfügung, an der GBA wird für die Berechnung von Erdwärmesonden mit dem Finite-Elemente- Modellierungsprogramm FEFLOW gearbeitet. Es sind in FEFLOW zwei Methoden für die Erdwärmesondenberechnung implementiert, eine numerische Methode nach Al-Khoury (2010) und eine analytische Lösung nach Eskilson und Claesson (2010). Diersch (2010), zeigt in einem Vergleich der beiden Methoden, dass für die Berechnung der Speicherleistung einer Sonde für kurze Schaltzyklen nur die numerische Lösung ausreichend gute Ergebnisse erzielt. Für die saisonale Modellierung ganzer Sondenfelder ist diese Lösung jedoch viel zu rechenaufwändig, im Rahmen von Heat Harvest wird aufgezeigt, welche Approximationen notwendig sind um das Speicherverhalten auch mit analytischen Näherungslösungen ausreichend gut beschreiben zu können.

- **Thermal Response Tests**

Die Konzeption der geplanten Experimente ist eine ähnliche wie bei Thermal Response Tests, deshalb wird hier auch auf den Stand der Technik eingegangen:

Bei einem Thermal Response Test (TRT) wird eine Erdwärmesonde mit einer möglichst konstanten und genau bestimmten Heizleistung beaufschlagt. Dazu ist eine präzise Messung der Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Durchflussmenge nötig. Obwohl sich der TRT als Standard – Untersuchungsverfahren für die Auslegung von Erdwärmesondenfeldern etabliert hat, gibt es bisher wenig Studien zur Vergleichbarkeit von TRTs. Ein im Rahmen des Projekts GeoPLASMA-CE angestellter Vergleich verschiedener TRT Geräte hat teilweise doch markante Unterschiede in der Aussagekraft der Ergebnisse gezeigt. Diese liegen in erster Linie in mangelhafter Kalibrierung sowohl der verwendeten Thermometer als auch der Durchflusszähler begründet. Die im Rahmen von Heat Harvest durchzuführenden Experimente unterscheiden sich von herkömmlichen TRTs in erster Linie dadurch, dass bei einem TRT mit möglichst konstanter Leistung beaufschlagt wird, während für Heat Harvest versucht wird, einen realen Tagesgang zu simulieren.

- **Wärmepumpen im Gebäudebereich**

Wärmepumpen sind für die Heizung und Warmwasserbereitstellung im Gebäudebereich heute die am weitesten verbreitete erneuerbare Technologie. Erdwärmepumpen im Speziellen werden durch zugeführte elektrische Energie betrieben und bringen das, im Erdreich bereits „vorgewärmte“ Arbeitsmedium auf ein höheres, für Heizzwecke nutzbares Temperaturniveau. Dabei wird die Erdwärme mittels Sonden oder Erdkollektoren aufgenommen. Ein besonders effizienter Betrieb und somit auch ein maximales CO₂-Einsparungspotenzial gegenüber fossilen Energieträgern liegt dann vor, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Erdreich) und der Wärmeabgabe (Heizungssystem) möglichst klein ist. Bei Erdreichtemperaturen, die über das ganze Jahr konstant zwischen 7 und 12°C liegen, lässt sich die Jahreseffizienz (die sogenannte Jahresarbeitszahl engl. SCOP ist das Verhältnis von abgegebener Wärmemenge zu aufgenommener elektrischer Energie) je nach

Gebäudetyp auf Basis von vorgeschriebenen Prüfpunkten sehr genau vorausberechnen. Diese Vorgehensweise ist in den zugrundeliegenden Prüfnormen EN14511 und EN14528 beschrieben. Für erhöhte Quellentemperaturen >25 °C, z.B. durch solare Wärmeeinspeicherung, gibt es zur Zeit keine Berechnungsvorschrift für die Jahresarbeitszahl und somit weiterführend keine Möglichkeiten zur Berechnung des CO₂-Einsparungspotenzials.

- **Ergebnisse aus anderen Projekten**

Im Projekt Heat Harvest fließen einerseits Erkenntnisse oder Ideen aus Vorprojekten ein, andererseits werden auch Ansätze von anderen Projekten aufgegriffen. Die Projektergebnisse von Heat Harvest können auch in zwei bereits laufende Projekte eingebracht werden.

- SANBA - Development of a multi-level and interdisciplinary simulation algorithm for a low-temperature heating and cooling grid for the future Smart Energy Quarter Baden (SANBA)

Dieses im Rahmen der Vorzeigregion Energie "New Energy for Industry" geförderte Projekt beschäftigt sich mit der Konzipierung eines Niedertemperatur-Heiz- und Kühlnetzes für die ehemalige Martinek-Kaserne in Baden mit Hilfe von industrieller Abwärme der benachbarten NÖM sowie geothermischen Quellen.

Bei einer erfolgreichen Durchführung des Projektes Heat Harvest ist der Standort des SANBA-Projektes ein möglicher Standort für die Errichtung des Pilotprojekts oder zumindest einer Testfläche zur Testung der Effizienz von der Gewinnung von solarer Abwärme auf Infrastrukturflächen. Die Martinek-Kaserne muss vor einem neuen Nutzungskonzept in jedem Fall zum Teil saniert bzw. auf ein Niedertemperatur-System umgerüstet werden. Konzepte zur Nutzung solarer Abwärme wären ein wichtiger Input

- GeoPLASMA-CE – Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe

Das Projekt GeoPLASMA legt den Fokus auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie im urbanen Raum. Der insbesondere für das Projekt Heat Harvest relevante Aspekt von GeoPLASMA-CE: Es wurde der Stand der Technik von Thermal Response Tests erhoben und Vergleichsmessungen verschiedener Geräte ausgeführt. Darüber hinaus wurde ein Standard-Auswerteworkflow entwickelt, und die Sensitivitäten der einzelnen Messgrößen (Temperatur und Durchfluss) ermittelt. Erst diese Ergebnisse erlauben eine Abschätzung der Aussagekraft von thermischen Experimenten an Erdwärmesonden.

- GRETA – Near-surface Geothermal Resources in the Territory of the Alpine Space

GRETA hat sich unter anderem zum Ziel gesetzt, die Anwendbarkeit und Vielfalt oberflächennaher Geothermie aufzuzeigen. Auch wenn die dezidierte Speicherung von Überschusswärme nicht Kernthema im Projekt GRETA war, so wurde dieser Themenkomplex doch im Kapitel „Innovative Systems“ behandelt. Es hat sich gezeigt, dass sich die Kopplung der Geothermie für den Winter mit Solarthermie für die Übergangszeit und die Brauchwasserbereitung im Sommer immer mehr zu einer Standardanwendung etabliert. Dabei sind auch einige Anlagen bekannt, die den solaren Überschussertrag verwenden um die Erdwärmesonden zu regenerieren. Somit ist qualitativ gezeigt, dass die Technologie in der Praxis prinzipiell funktioniert. Die Planbarkeit solcher Anlagen ist aber bisher nicht gewährleistet.

Ein weiterer Aspekt, der im Projekt GRETA beleuchtet wurde, ist die Abhängigkeit der Wärmepumpeneffizienz von der Untergrundtemperatur. Diese Abhängigkeit wurde hier aber nur saisonal über die Jahresarbeitszahl betrachtet. Es wurde keine Wärmepumpensimulation durchgeführt, wie es jedoch für Heat Harvest geplant ist, sondern auf bestehende Wärmepumpenkennlinien zurückgegriffen.

- ecoRegeneration - Entwicklung einer „Merit-Order“ bei Regenerationswärme für Erdsondenfelder in urbanen Wohngebieten:

Das Projekt ecoRegeneration, koordiniert von der e7 Energie Markt Analyse mit den Partnern Institute of Building Research & Innovation ZT-GmbH, Urban Innovation Vienna und Vasko+Partner (Stadt der Zukunft, 3. Ausschreibung), beschäftigt sich mit dezentraler urbaner Wärmeversorgung und geht der Frage nach, wie Erdwärmesonden bei überwiegender Wärmenutzung in Stadtteilen bewirtschaftet werden müssen, um langfristig effizient nutzbar zu sein.

In der Projektpräsentation des Projekts am 03.12.2018 beim Koordinator wurde präsentiert, dass für eine ausgeglichene thermische Bilanzierung von Erdsondenfeldern im urbanen Raum noch immer ein erheblicher Teil an Regenerationswärme fehlt. Neben Wärmeeintrag über Solarkollektoren, Kühlung über Free Cooling und Bauteilaktivierung sowie der Nutzung von Abwärme aus z.B. Datacentern als Beispiele der Möglichkeit von Regeneration wurde auch die Möglichkeit der Nutzung von Asphaltkollektoren vom Geschäftsführer von Ooms Civiel Arian de Bondt präsentiert. Auch wenn die genaue Gewinnungstechnologie im Rahmen dieser Sondierung noch nicht betrachtet wird, sind die Systeme für Asphaltkollektoren in einer späteren Umsetzung sicherlich interessant und werden dann als mögliche Gewinnungstechnologie im Projekt betrachtet. Eine Vernetzung mit dem Konsortium des Projekts sowie mit Ooms Civiel wird spätestens bei Umsetzung eines Pilotprojekts angestrebt.

3.2. Motivation

Die Idee des vorgeschlagenen Sondierungsprojekts „Heat Harvest“ entstand aus der Beteiligung des Geschäftsführers der TERRA Umwelttechnik (P1) am „Climathon 2018“. Dies ist eine globale Bewegung, welche in Europa vom Climate KIC der EU getragen wird. In einer Challenge der Stadt Wien (MA 20) innerhalb des Climathon zum Thema „Urban Heat Islands“ wurde die Projektidee Heat Harvest präsentiert. Diese beschäftigte sich mit im Sommer stark erwärmten Flächen von Gebäuden, Gehwegen, Straßen und Plätzen, welche besonders im dicht verbauten urbanen Gebiet das Mikroklima der Stadt zusätzlich zum ohnehin schon vorhandenen Wärmeinseleffekt in Städten mit der geringeren Luftzirkulation und der höheren Luftverschmutzung belasten. Die beim Climathon skizzierte technologische Lösung der Nutzung der solaren Abwärme in Städten wurde anhand des Haupt-Innenhofs des Museumsquartiers in der Innenstadt von Wien präsentiert.

Umgeben von vielen kulturellen und gastronomischen Einrichtungen ist der Innenhof einerseits ein beliebter Treffpunkt, vor allem im Sommer, andererseits ist dieser Innenhof auch gleichzeitig ein Beispiel für die Einschränkungen der üblicherweise vorgeschlagenen Lösungen für die Verringerung des UHI-Effektes, der im Projekt Heat Harvest angesprochen werden soll. Zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln werden vielerorts schon Grün- und/oder Wasserflächen propagiert und eingesetzt, so auch

im Haupt-Innenhof des Museumsquartiers mit einer Wasserfläche und vereinzelt Bäumen am Rand des Haupthofes und Pflanztrögen. Trotz dieser Maßnahmen kann das Mikroklima im zentralen Bereich des Innenhofs an sehr heißen Tagen unangenehm sein, da der Kühleffekt durch Begrünung und Wasserfläche nicht ausreicht. Dazu kommt, dass an den teilweise denkmalgeschützten Gebäuden des Museumsquartiers eine Realisierung von Dach- oder Fassadenbegrünungen nicht möglich ist.

Die präsentierte Grundidee war, den Innenhof mittels im Pflaster verlegten Absorberleitungen geothermisch zu kühlen. Dieses Projekt fand bei der Jury und der MA 20 Anklang und in einer Reihe von Folgegesprächen zeigt sich die Gemeinde Wien hochinteressiert an einem Pilotprojekt (siehe beigelegten LOI). Da vor einem Full Scale-Pilotprojekt noch einige technische Fragen zu klären sind, entstand die Idee, die vorliegende vorgeschlagene Sondierung durchzuführen.

Von der Grundidee ausgehend wurde vom Konsortium festgestellt, dass der Einsatz von Begrünungen und/oder Wasserflächen allgemein vor allem bei Bestandsgebäuden oder auch bei historisch wertvollen und/oder denkmalgeschützten Gebäuden allerdings nicht immer möglich bzw. erwünscht und genehmigungsfähig ist, womit der Ansatzpunkt für das Forschungsvorhaben Heat Harvest identifiziert war. Darüber hinaus sind Begrünungen und Wasserflächen bei großen Flächen oft nicht ausreichend, um die sommerliche Hitze im stark verbauten Gebiet ausreichend zu vermindern. Der innerstädtisch dicht verbaute Raum mit vielen Bestands-, historischen und denkmalgeschützten Gebäuden ist vom Wärmeinseleffekt besonders betroffen und deshalb sensibel. Eine Abfuhr der solaren Überschusswärme und saisonale Speicherung im Untergrund zur späteren Verwendung als Wärmequelle zur Gebäudeheizung wäre ein wünschenswerter Beitrag zur nachhaltigen Klimatisierung von Städten, zur Verminderung des Wärmeinseleffekts und zur Verbesserung des Mikroklimas in Städten.

Eine einfache, unsichtbare und saisonal betriebene Lösung ist die „Ernte“ solarer urbaner Überschusswärme von Gebäudeoberflächen, Gehwegen, Straßen und Plätzen durch flach verlegte Absorberleitungen, welche danach in Erdsonden-speicher zur späteren Verwendung als Wärmequelle zur Gebäudeheizung eingebracht wird.

Die im Projekt Heat Harvest angesprochene Technologie bezieht sich auf die Planung und Auslegung von Erdsondenfeldern, die über Kollektoren gezielt für die Ernte von solarer Abwärme, konzipiert werden, da übliche Berechnungs- und Simulationsmethoden für die Auslegung von Erdsondenfeldern bei den Bedingungen, wie sie in stark aufgeheizten innerstädtischen Flächen auftreten, an ihre Grenzen stoßen. Beziehungsweise sind Simulationen mit höheren Temperaturen nicht ohne weiteres möglich. Der Untergrund einer Stadt ist durch Bebauung und Nutzung ohnehin schon gegenüber den klimatisch bedingten Temperaturen erhöht. Eine Einbringung von Abwärme zur saisonalen Speicherung ist daher sehr sensibel zu behandeln und muss sich unbedingt auf verlässliche und genaue Zahlen und Berechnungen stützen. In diesen Bereichen sollte man nicht mit ungenauen Zahlen, lediglich Erfahrungswerten oder per „Trial and Error“ komplexe thermische Nutzungen planen. Die Auslegung und Planung einer innerstädtischen Abwärmennutzung mit Hilfe des Untergrunds muss sich nach dem Energieangebot und dem Wärmebedarf der umliegenden Gebäude richten, gleichzeitig aber die verträglichste und nachhaltigste Lösung am Standort darstellen.

Daher war es Ziel des Projekts Heat Harvest, die technologische Basis für die Einbringung von Überschusswärme durch umfassende Untersuchungen des thermischen Verhaltens des Untergrunds

zu legen. Zu diesem Zweck wurde das 2019 völlig neu errichtete Testfeld am Gelände des Projektpartners 2, der Geologischen Bundesanstalt verwendet.

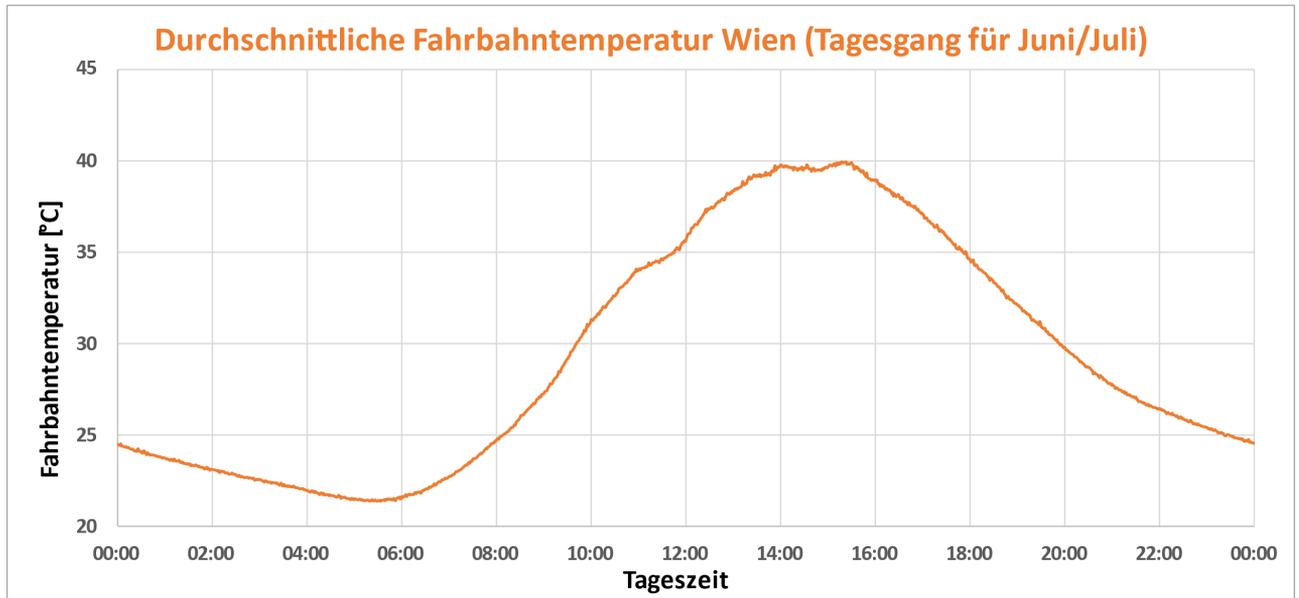


Abbildung 2: Repräsentativer Tagesgang der Fahrbahntemperatur im Raum Wien

3.3. Ziele

- Übergeordnete Ziele des Projekts

Die Messungen, Berechnungen und Simulationen in der Großversuchsanlage (Testfeld) über das thermische Verhalten des Untergrunds bei Einbringung von solarer Abwärme erweisen sich als dafür geeignet, ein genau dimensionierbares, an die jeweiligen Verhältnisse genau angepasstes Pilotprojekt in einer Nachfolgephase umzusetzen. Als übergeordnetes Ziel für das angestrebte nachfolgende Pilotprojekt steht die nachhaltige Kühlung von urbanen Oberflächen, inklusive saisonaler Speicherung mit innovativen Methoden der oberflächennahen Geothermie im Fokus. Die im Sondierungsprojekt Heat Harvest behandelten technologischen Fragestellungen sollen die Planbarkeit und genaue Auslegung von Gewinnungstechnologien von solarer urbaner Abwärme im Nachfolgeprojekt v.a. bei Bestandsgebäuden sowie historischen und/oder denkmalgeschützten Gebäuden ermöglichen, wie im nachfolgenden Bild veranschaulicht werden soll.

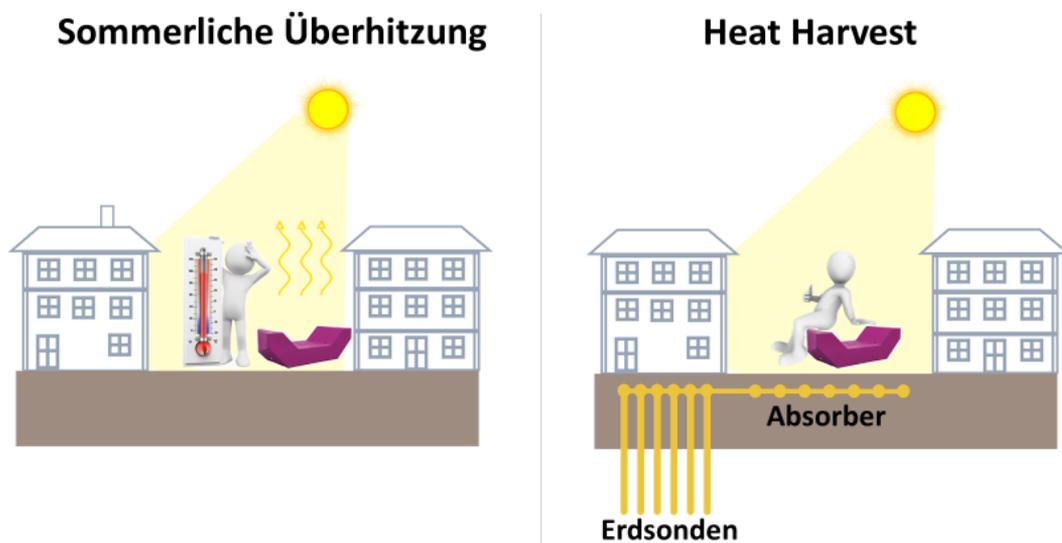


Abbildung 3: Vision des Heat-Harvest-Ansatzes, veranschaulicht mit einer Nachbildung der Museumsquartiers-Enzis

- **Technologisches Ziel 1 – Messungen der thermischen Veränderung im Untergrund bei Einbringung von Überschusswärme in das unterirdische Testfeld der Geologischen Bundesanstalt:**

Beschreibung des Testfelds:

Im Garten der Geologischen Bundesanstalt wurde im ersten Halbjahr 2019 ein Großtestfeld errichtet. Ein Teil des Testfelds ist eine Erdwärmesonde, deren Besonderheit in der Bohrtechnik liegt: die Bohrung wurde über die gesamte Länge im Kernbohrverfahren abgeteuft. Dadurch standen nach dem Abteufen die Bohrkerne für eine eingehende Untersuchung zur Verfügung. Die möglichst genaue Kenntnis der lithologischen und mineralogischen Zusammensetzung sowie der thermischen Eigenschaften des Untergrunds ist von großer Bedeutung für folgende wissenschaftliche Experimente.

Diese Sonde wurde mit einem Doppel-U Rohr bis 80 m Tiefe ausgebaut und mit faseroptischen Hybridmesskabeln zur Temperaturmessung entlang der Sondenrohre versehen. Durch die faseroptische Temperaturmessung konnte dann während der ausgeführten Experimente über die gesamte Bohrlochlänge die Temperatur hochauflösend und hochpräzise ermittelt werden. Darüber hinaus wurde in den Hybridkabeln neben den Glasfasersträngen auch ein Heizkabel verbaut. Über dieses Heizkabel kann der Untergrund für Experimente auch direkt geheizt werden, womit detailliertere Informationen über den Schichtaufbau und das thermische sowie hydrologische Verhalten des Untergrunds gewonnen werden können.

Diese Messdaten lieferten wichtige Informationen über die Wärmeflüsse, die im Inneren der Sonde stattfinden. Bei Thermal Response Tests, wie sie an üblichen Erdwärmesonden ausgeführt werden, können dagegen nur die Fluidtemperaturen des Vor- und Rücklaufs am Sondenkopf gemessen werden.

Es wurden darüber hinaus auch drei Beobachtungssonden um die Erdwärmesonde errichtet und ebenfalls mit faseroptischen Messkabeln versehen, um die Wärmeausbreitung bei Langzeitexperimenten untersuchen zu können. Beide Aspekte, sowohl die Wärmeflüsse im Sondeninneren als auch das Wärmeleit- und Wärmespeicherverhalten des Untergrunds waren für die gegenständliche Fragestellung von hoher Relevanz. Die Errichtung des Testfelds erfolgt nicht im Rahmen des Projekts Heat Harvest, daher entstanden dem Projekt keine Errichtungskosten dafür.

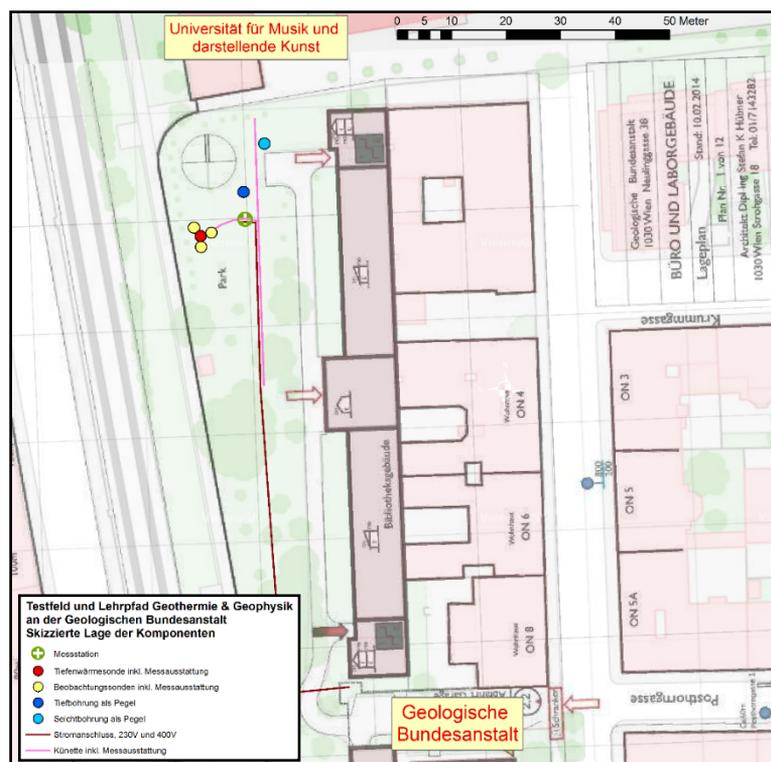


Abbildung 4: Lage der Testerdwärmesonde im Garten der GBA (P2). Neben der Erdwärmesonde entsteht noch ein Testfeld für verschiedene geophysikalische Methoden.

- **Technologisches Ziel 2 – Planung, Bau und Betrieb einer oberirdischen Anlage zum genau gesteuerten thermischen Eintrag in den Untergrund zur Simulation einer Einbringung von Überschusswärme in das unterirdische Testfeld der Geologischen Bundesanstalt:**

Ein weiteres Ziel war die Ermittlung der Auswirkung der Untergrundeinspeisung einer solchen Anlage. Der Eintrag der solaren Überschusswärme wird mittels elektrischer Aufheizung vorgesehen. Diese Heizung muss zum einen genügend Leistung vorhalten, um die volle Leistung eines solaren

Großkollektors zu simulieren und zum anderen in der Lage sein das Leistungs- und Temperaturprofil eines solchen Großkollektors exakt nachzubilden.

Weiters sind alle oberirdischen Anlagenteile zu planen, zu errichten und zu betreiben, die nötig sind, um die zur Verfügung gestellte Wärme in den Untergrund einzuspeichern sowie die dabei auftretenden Effekte und Auswirkungen zu messen und zu steuern.

Es wurden hierbei unterschiedliche Versuchsprogramme gefahren. Ein solcher solarer Großkollektor kann in verschiedenen Betriebsweisen gefahren werden. Es kann z.B. ein gleichbleibender Temperatureintrag bei variablem Soledurchfluss betrieben werden, jedoch auch ein konstanter Soledurchfluss mit variabler Temperatur. Es wird erwartet, dass unterschiedliche Betriebsweisen unterschiedliche Effekte bzw. unterschiedliche Auswirkungen derselben Effekte bedingen. Es wird daher umfassend Leistung und Temperatur des Dargebots gemessen sowie die im Untergrund eingespeicherte Energiemenge und deren Temperaturniveau verfolgt bzw. vorgegeben. Die Planung der genauen Versuchsprogramme unter Beiziehung solarer Messdaten des Sommers 2018 ist im Zuge der Projektplanung ab Juni 2019 vorgesehen. Ein weiterer Vorteil der Abkopplung zwischen solarer Produktion und Betrieb des Testfelds liegt neben der Kostenersparnis hauptsächlich in der dadurch erreichten temporalen Unabhängigkeit der Vorgänge, weshalb die Versuche auch im Herbst und Winter gefahren werden können.

Im Zuge der hier durchzuführenden Versuche waren alle Anlagenkomponenten hinsichtlich ihrer Eigenschaften und ihres optimalen Einsatzes zu untersuchen. Es war festzustellen, ob der derzeitige Stand der Technik sowohl hinsichtlich Anlagenkomponenten als auch hinsichtlich Steuerung des Betriebes ausreichend ist. Also ist die Frage zu beantworten, ob nur mittels der hier zu erforschenden Betriebsparameter eine hinreichende Steuerbarkeit gegeben ist oder ob wesentlicher Forschungsbedarf hinsichtlich Einzelkomponenten des Systems besteht.

- **Nicht-Ziele des Projekts sind Fragestellungen mit folgenden Schwerpunkten:**

1. Die genaue Technologie zur Abwärmegewinnung, wie z.B. Kollektortypen, Verlegearten etc. wurde in diesem Projektvorhaben noch nicht adressiert. Der Fokus lag auf dem thermischen Verhalten des Untergrunds.
2. Eine klassische Hochtemperaturspeicherung wird nicht berechnet. Der Fokus liegt auf in Städten auftretende Temperaturen in den infrastrukturellen Oberflächen.
3. Es werden keine Netzberechnungen (Netzdesign, Komponenteneinbindung) durchgeführt und es werden auch keine hydraulischen Schemata ausgearbeitet.

Die oben genannten Punkte sind wichtig für eine Gesamtplanung der Nutzung solarer Abwärme, werden aber erst im geplanten folgenden Forschungsvorhaben und/oder einer Pilotanlage adressiert. Dies geschah auch unter dem Gesichtspunkt, die vorgeschlagene Sondierung möglichst auf die Fragestellung fokussiert zu halten.

3.4. Innovationsgehalt

Das Projekt Heat Harvest liefert drei Hauptinnovationen zum Know-how auf dem Gebiet der Gewinnung von solarer Abwärme:

- a. Durchführung von kontrollierten Langzeitexperimenten an einem Testfeld zur Kalibration von numerischen Modellen
- b. Entwicklung von solaren Einspeiseszenarien für die Messungen im Testfeld und als Grundlage für die Simulation
- c. Betrachtung der Effizienz von Wärmepumpen bei höheren Quellentemperaturen durch den Solareintrag
- d. Betrachtung von Power to Heat-Aspekten für die Konzipierung des Folgeprojekts

- **ad a. Langzeitexperimente**

Die Simulation von Erdwärmesonden und Sondenfeldern sowie die Durchführung und Auswertung von Thermal Response Tests (TRT) gehört bei der Planung vor allem von größeren geothermischen Anlagen zum Stand der Technik. Allerdings betragen typische Laufzeiten von TRTs 48 – 100 Stunden, kontrollierte Langzeitexperimente über mehrere Wochen oder Monate, die zur Kalibration von numerischen Modellen herangezogen werden können, sind nicht bekannt. Durch die Durchführung der Speicherversuche an der Testerdwärmesonde konnten die grundlegenden Daten gewonnen werden, um einerseits numerische Modelle zu validieren und durch die faseroptische Messausstattung der Sonde auch die dynamischen Vorgänge während der thermischen Beladung abzubilden. Darüber hinaus ist die Testanlage der Geologischen Bundesanstalt zur Durchführung von Großversuchen im realen Maßstab einzigartig in Österreich.

- **ad b. Entwicklung von solaren Einspeiseszenarien**

Die Vorbereitung der Speicherversuche im Feldversuch umfasst auch die Konzeptionierung der nachzubildenden Lastkurven. Nach Milkovics (1984) und Blab et al. (2014) treten für eine Wärmeeinspeisung relevante Temperaturen etwa von Mitte Mai bis Mitte Oktober auf, wobei mit den höchsten Temperaturen (34 °C) im Zeitraum Mitte Juni bis September zu rechnen ist. Es ist zu beachten, dass es sich bei den Werten keinesfalls um Maximal-, sondern um Bemessungstemperaturen handelt. Laut Hornyk (2014) ist zu etwa 50 % der Zeit über das Jahr mit Temperaturen größer oder gleich 20 °C zu rechnen. Für Heat Harvest wurden auf der Grundlage von Literaturrecherchen und realen Messwerten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik verschiedene Einspeiseszenarien entwickelt.

- **ad c. Effizienzsteigerung von Wärmepumpen**

Da Geothermie in Österreich zumeist zum Heizen eingesetzt wird, ergeben sich aus der in diesem Projekt geplanten Wärmespeicherung bei höheren Temperaturen mehrere Effekte, die sich auf den nachfolgenden Betrieb von Wärmepumpen positiv auswirken. Durch die Einspeicherung von solarer Überschusswärme erhöht sich die „übliche“ Untergrundtemperatur um etwa 10 K. Im Vergleich zur üblichen Untergrundtemperatur bei Erdwärmepumpen ist eine deutliche Verbesserung der Jahresarbeitszahl – und damit Verringerung der CO₂-Emissionen – zu erwarten. Die Verbesserung liegt im Bereich zwischen 1,5 und 4 % pro Kelvin (Braungard et al., 2013). Auch die Heiz- und Kälteleistung

einer – bei konstanter Drehzahl-Wärmepumpe zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit und steigt mit höherer Quellentemperatur. Dadurch kann die Arbeitszahl von Wärmepumpen gesteigert werden.

- **ad d. Zusatzaspekt: Power to Heat**

Ein weiterer Aspekt der geothermischen Wärmespeicherung umfasst Power to Heat mit kurzfristiger bis saisonaler Speicherung. Durch den steigenden Anteil Erneuerbarer am Strommarkt unterliegt dieser einer hohen Volatilität. Strompreisgeführte Wärmepumpen sind bereits am Markt, eine mögliche Innovation auf diesem Gebiet wäre noch die Kopplung von strompreisgeführten Wärmepumpen mit Power to Heat. Der Vorteil dieser Kopplung ist darin begründet, dass Zeiten mit negativem Strompreis oder stark steigender Prognose des EPEX Spot Marktpreises zusätzlich dazu genutzt werden können die Erdwärmesonde zu regenerieren. Durch die Regeneration kann kurz- bis mittelfristig (Stunden bis Tage) die Sondenrücklauftemperatur und damit die Effizienz der Wärmepumpe gesteigert werden. Power to Heat war kein unmittelbarer Untersuchungsgegenstand des Projekts, aber die Ergebnisse sowohl der Sonden- als auch der Wärmepumpensimulationen lieferten wichtige Grundlagen für die Konzeptionierung von Power-to-Heat-Lösungen im Bereich Raumwärme für das mögliche Nachfolge-Pilotprojekt.

4 Projektinhalt



Abbildung 5: Kick-Off-Meeting am 12.07.2019 mit dem Konsortium und Vertretern der Stadt Wien. Zu sehen ist das Bohrgerät, mit dem die Kernbohrung für die Versuchs-Erdwärmesonde durchgeführt wurde.

4.1. Oberirdische Testanlage für die Nachbildung der Einspeisung solarer Überschusswärme in die Test-Erdwärmesonde

4.1.1. Konzeptionierung der Anlage

Das Heat Harvest Konzept verfolgt den technologischen Ansatz, solare Überschussenergie im Sommer zu sammeln und in unterirdischen Erdsondenfeldern einzuspeichern, um diese Energie - saisonal verschoben - im Winter wieder als Wärmeenergie nutzbar zu machen. Das vorliegende Projekt will die Einspeicherung der solaren Überschussenergie im Sommerhalbjahr und seine Auswirkungen im Untergrund überprüfen. Das Gedankenmodell hierzu ist ein solar aktivierter Asphaltkollektor. Durch den Energieentzug aus versiegelten urbanen Flächen kann auch ein Beitrag zur Bekämpfung des Urban Heat Island-Effekts geleistet werden. Zur Abschätzung des von einem solchen Kollektor lieferbare Temperaturniveau konnte auf von der ASFINAG freundlicherweise zur Verfügung gestellten Fahrbahntemperaturen aus dem Raum Wien zurückgegriffen werden. Aus diesen Daten konnte ein repräsentativer Verlauf für die Asphalttemperatur eines mittleren Sommertages abgeleitet werden (Abbildung 2). Die Versuchsanlage sollte durch eine regelbare, elektrische Durchflusshheizung einen solchen Tagesgang simulieren.

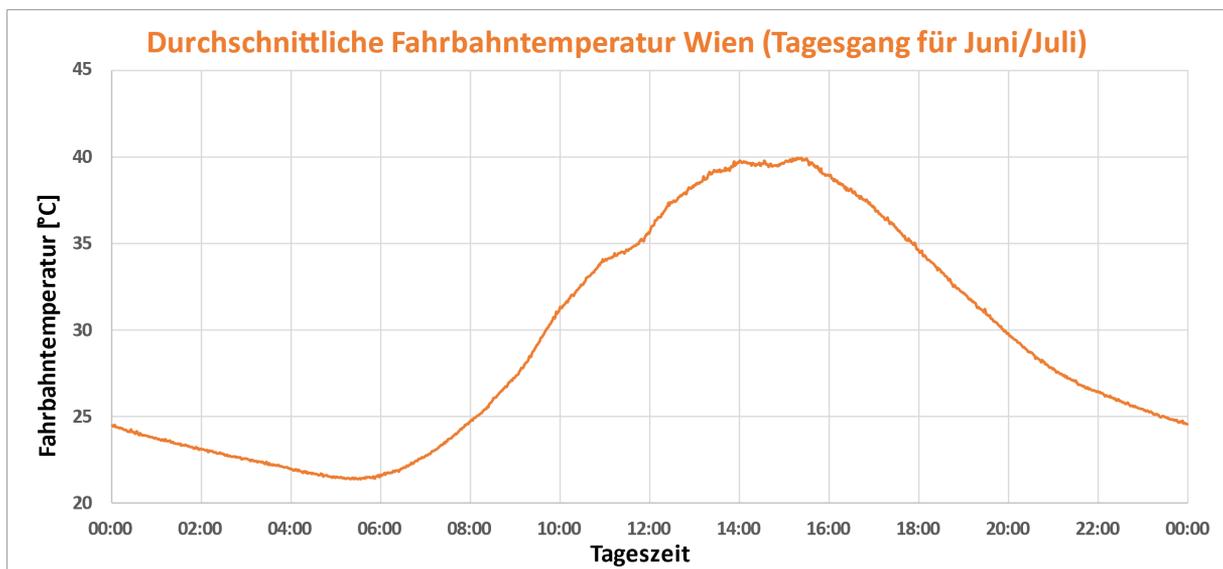


Abbildung 6: Repräsentativer Tagesgang der Fahrbahntemperatur für einen Sommertag im Raum Wien

Um in die für den Versuch vorgesehene 80 m tiefe Erdwärmesonde einzuspeisen, wurde daher folgende Anlagenkonfiguration gewählt:

- Kreislumpumpe Grundfos CM5-3; bis ca. 3 bar und bis ca. 6 m³/h
- 2 Dafu Durchlauferhitzer als Heizelemente (7,5kW regelbar, 11kW fix)

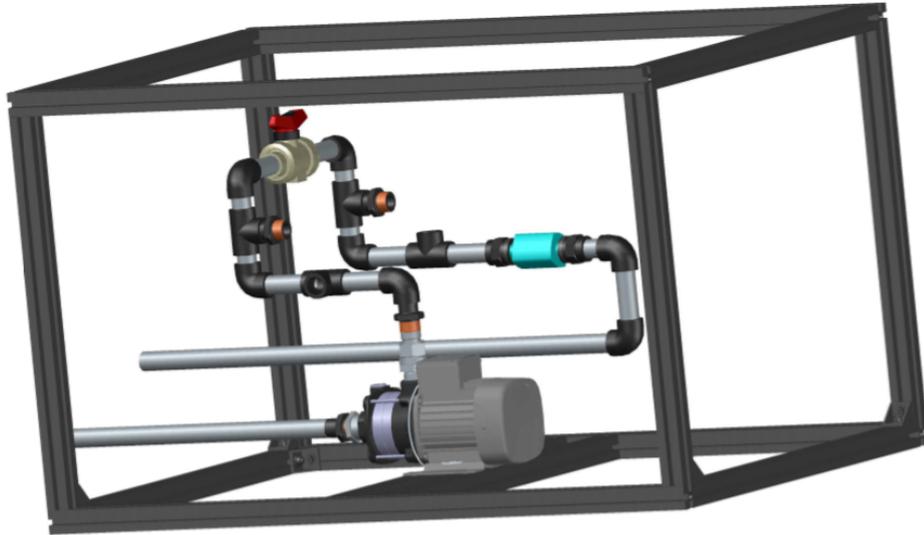


Abbildung 7: Planungsschema (oben) und 3D-Visualisierung der Versuchsanlage (unten)

4.1.2. Aufbau und Betrieb der Anlage:

Nach Fertigstellung und umfangreichen Tests der Anlage wurde sie Anfang Februar 2020 aufgebaut und in Testbetrieb genommen.

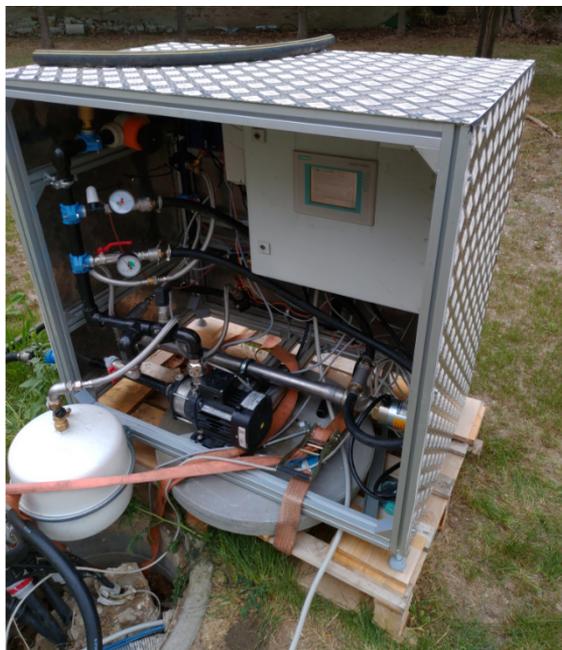


Abbildung 8: Fertiggestellte Anlage

Das Fluid wird bis zum Erreichen der ungestörten Untergrundtemperatur im Kreis gepumpt (15 min). Danach wird das Heizelement in mehrere Stufen geregelt, um das Wasser zu erwärmen und eine Tageskurve zu simulieren.

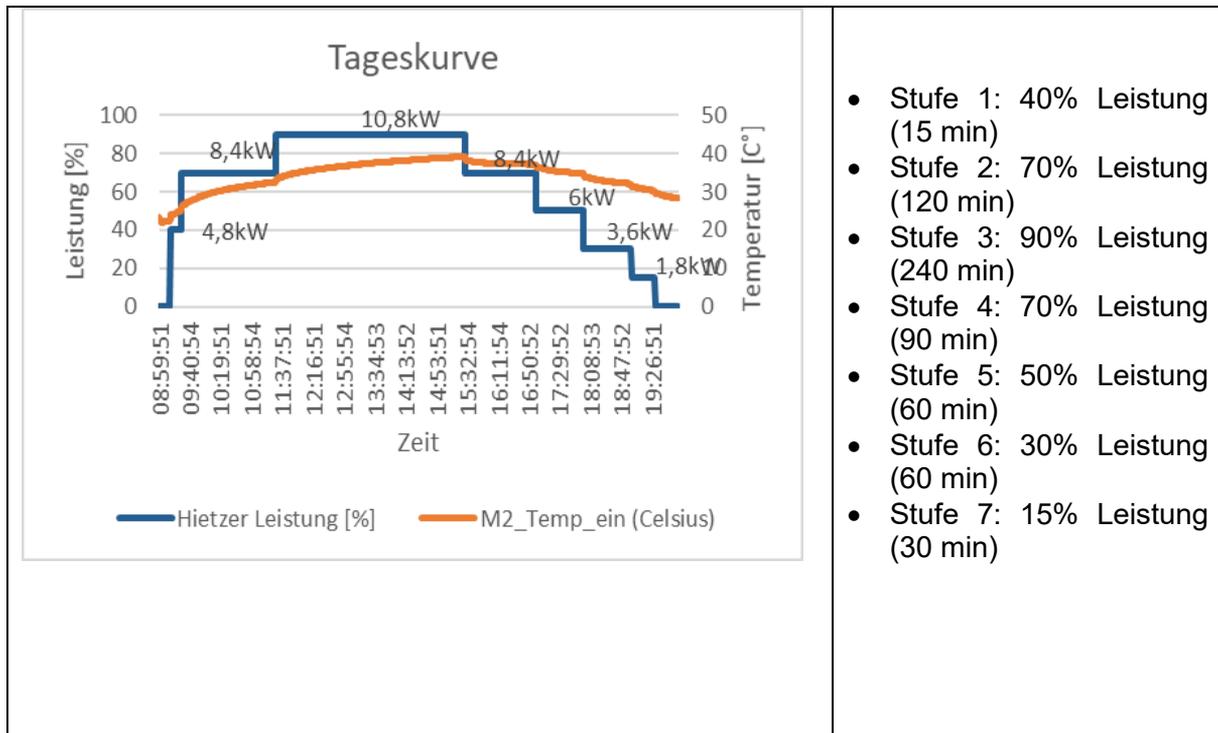


Abbildung 9: Tagesgang der Heizleistung, um möglichst den Tagesgang der Oberflächentemperaturen einer Straße nachzubilden

4.2. Thermal Response Tests

Der Thermal Response Test (TRT) hat sich zum Standardverfahren zur Untersuchung von Erdwärmesonden entwickelt. Dabei wird die zu untersuchende Erdwärmesonde mit einer möglichst konstanten Heizleistung und Durchfluss beaufschlagt. Nach einem Mindestzeitkriterium (ca. 8 h) stellt sich ein quasistationärer Wärmestrom ein, die gemessenen Fluidtemperaturen am Sondenkopf (Vor- und Rücklauftemperatur) wird zur Auswertung nach der Linienquellentheorie benutzt. Dabei geht der logarithmische Anstieg der Temperatur in die Berechnung ein. Der weniger weit verbreitete enhanced TRT (e-TRT) verwendet ein Glasfaser-Kupfer-Hybridkabel zur Temperaturüberwachung und elektrischen Beheizung des Bohrlochs. Diese Technik ermöglicht eine schichtspezifische Auswertung der Wärmeleitfähigkeit. Für das Projekt Heat Harvest wurde ein Mittelweg gewählt und der klassische TRT mit DTS Messungen ergänzt. Auch damit ist eine schichtspezifische Auswertung möglich.

Es wurden mehrstufige Thermal Response Tests an der Erdwärmesonde durchgeführt. Durch die Kombination verschiedener Durchflussraten und Heizleistungen kann die Abhängigkeit der Ergebnisse von unterschiedlichen Testlayouts ermittelt werden. Ausgewertet wurde mit der Equivalent Time Method, die für unterbrochene bzw. mehrstufig ausgeführte TRTs Anwendung findet (Beier, 2008). Die TRT Stufen wurden darüber hinaus mittels Distributed Temperature Sensing überwacht, dadurch

kann eine schichtspezifische Auswertung der Messung erzielt werden. Ein weiterer Vorteil der Temperaturmessung durch DTS ist die kontinuierliche Aufzeichnung der Temperaturen im Bohrloch, auch während der Abkühlung nach bzw. zwischen den TRT Messungen. Diese Phasen können auch in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds ausgewertet werden, darüber hinaus bieten diese Daten eine gute Grundlage für die Kalibrierung des numerischen Modells. Bei konventionellen TRTs stehen für die Modellkalibrierung nur die Vor- und Rücklauftemperatur des Sondenfluids für die Kalibrierung zur Verfügung, diese sind aber sehr stark von den Wärmeübergangsparametern der Erdwärmesonde abhängig. Diese Parameter wiederum sind in erster Linie von der Sondengeometrie (der Lage der Fluidleitungen in der Sonde) beeinflusst. Diese muss für die Simulation angenommen werden, ist aber in der Praxis unbekannt (Abbildung 10). Für die Modellkalibrierung bestehen also zwei Kalibrierziele, die auf unterschiedliche Parameter abzielen: Die DTS Temperaturen der Abkühlphasen zielen auf die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds ab, mit den Vor- und Rücklauftemperaturen der TRT Messungen können die Wärmeübergangskoeffizienten der Sonde bestimmt werden.

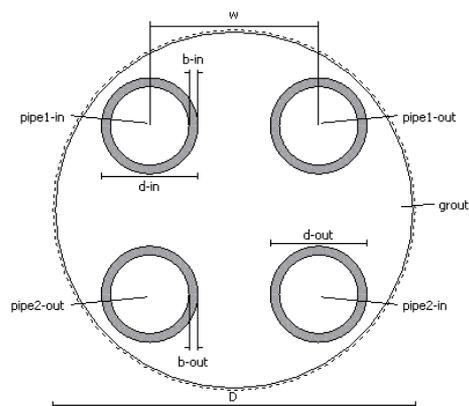


Abbildung 10: Schematischer Schnitt durch eine Doppel-U Erdwärmesonde

4.3. Sonstige erhobene Daten

- **Temperaturprofilmessungen**

Ein Temperaturprofil ist eine tiefenaufgelöste Temperaturmessung. Temperaturprofile wurden zu drei Zeitpunkten mittels direkter Messung mit Kabelot erfasst: Vor Beginn der Thermal Response Tests, vor Errichtung der Testanlage und zu Projektende. Weitere Temperaturprofile wurden durch DTS Messungen und Zirkulationsmessung ermittelt. Bei der Zirkulationsmessung wird das Sondenfluid ohne Heizung zirkuliert und durch den Temperatursensor an der Testanlage das Temperaturprofil bestimmt. Wesentlich für die Qualität der Profilmessung durch Zirkulation ist ein ausreichend hoher Mengendurchsatz um eine turbulente Rohrströmung zu gewährleisten, ein kurzes Samplingintervall, schnell ansprechende Temperatursensoren sowie eine genaue Durchflussmessung. Weiters sollte die gesamte Wassersäule einmal umgewälzt werden, um den tiefsten Punkt der Erdwärmesonde durch die Symmetrie der Messreihe sicher bestimmen zu können. Zirkulationsmessungen wurden nach Ende der Wärmespeicherexperimente einmal täglich automatisiert durchgeführt. Die so ermittelten Temperaturdaten müssen von Zeit in Tiefe konvertiert werden um aus einer Zeitreihe ein

Temperaturprofil zu erhalten. Aus den so ermittelten Temperaturprofilen können dann einige Tiefen herausgenommen werden um das Speicherverhalten des Untergrunds zu überwachen.

- **DTS Messungen**

DTS steht für Distributed Temperature Sensing und basiert auf dem Prinzip der Raman-Streuung. Dabei wird Laserlicht mit exakt definierter Wellenlänge durch ein Glasfaserkabel geleitet, das rückgestreute Licht erfährt eine temperaturabhängige Frequenzverschiebung. Das zurückgestreute Licht wird analysiert und daraus ein Temperaturprofil entlang des Glasfaserkabels erstellt. Entsprechende Kabel wurden beim Einbau der Erdwärmesonde mit den Sondenrohren in den Ringraum eingebracht und in Zement verankert. Damit können auch während des Betriebs der Erdwärmesonde Temperaturprofile gemessen werden.

Die Daten der DTS Messungen werden extern in einem eigenen DTS Controller aufgezeichnet und direkt im Controller in Temperaturprofile invertiert. Der Datenexport erfolgt manuell und muss in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen durchgeführt werden. Die anfallenden Datenmengen sind relativ groß und daher mit erheblichem Bearbeitungsaufwand verbunden. Daher wurde die DTS Technik eher sparsam zu Beginn und Ende des Speicherversuchs eingesetzt. Besonderer Fokus des Temperaturmonitorings liegt in der Beobachtung des Speicherverhaltens nach Ende der Einspeicherung, daher wurde dieser Zeitbereich doppelt (DTS und Zirkulationsmessung) abgedeckt.

4.4. Datenaufbereitung für die folgende Modellierung

- **Testanlage**

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte wie bereits beschrieben am 11.02.2020, der Anlagenabbau am 14.12.2020. Die gemessenen Daten der Testanlage wurden vom Datenlogger einmal täglich automatisch per e-mail als *.csv Datei übertragen. Die Daten wurden laufend gesichert, homogenisiert und einer Qualitätskontrolle unterzogen. Es hat sich im Betrieb der Anlage herausgestellt, dass die verwendeten Heizelemente wohl entweder dem Anlagendruck nicht standgehalten haben, oder nicht für das eingesetzte Frostschutzmittel geeignet waren. Daher kam es zu mehreren Betriebsunterbrechungen, es konnten dennoch ausreichend Daten gesammelt werden. Die gesamten Datenreihen müssen für die folgende Modellierung homogenisiert und auf ein sinnvolles Maß reduziert werden. Eingangsdaten für die Modellierung sind Heizleistung und Mengendurchfluss. Die Heizleistung muss aus der Temperaturdifferenz und der spezifischen Wärmespeicherkapazität des Wärmeträgerfluids berechnet werden. Die gemessenen Temperaturen selbst werden nur zur Validierung des numerischen Modells eingesetzt.

4.5. Messung von thermophysikalischen Parametern am Bohrkern der Test-Erdwärmesonde

Die thermophysikalischen Parameter Wärmeleitfähigkeit und Wärmehaltigkeit sind von zentraler Bedeutung, wenn man die thermischen Eigenschaften des Untergrunds bestimmen will. Die Kenntnis dieser Parameter sind für korrekte Planung, Auslegung und Betriebs eines thermischen Erdsondenspeichers essenziell. Darum wurden diese Größen mit mehreren Methoden an der

Geologischen Bundesanstalt mit Handmessgeräten sowie mit Analysegeräten im Thermophysiklabor des AIT gemessen.

An der Geologischen Bundesanstalt wurden detaillierte Voruntersuchungen am von der Kernbohrung der Test-Erdwärmesonde gewonnenen Bohrkern durchgeführt, um eine gezielte Probennahme für die Messungen zu gewährleisten. Die Einzelstücke der Kerne wurden hierfür direkt nach der Kernentnahme und zu einem späteren Zeitpunkt im Labor getestet. Hauptaugenmerk bei den Voruntersuchungen liegt auf der Bestimmung von thermophysikalischen Parametern und der Bestimmung der Bodenfeuchte. Weitere an den Bohrkernen durchgeführte Testungen (u.a. Bestimmung der Mineralogie, Elementverteilung, elektrische Leitfähigkeit oder Festigkeit) werden ebenfalls in die Beurteilung miteinbezogen.

- **Wärmeleitfähigkeit**

Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes in verschiedenen Teufen kann helfen, den tatsächlichen Wärmefluss zwischen der Erdwärmesonde und ihrer Umgebung zu bestimmen. Dieser wertvolle Input kann durch stationäre und dynamische Wärmeleitfähigkeitsmessmethoden geliefert werden. In dieser Arbeit wird ein stationäres Verfahren, auch bekannt als Wärmeflussmesser (HFM), beschrieben. Im vereinfachten Fall der eindimensionalen Wärmeleitung in einem Festkörper mit zwei parallelen Wandbereichen wird sie durch das Fourier'sche Gesetz beschrieben, wie in der folgenden Gleichung gezeigt.

$$\dot{q} = \frac{\phi}{A} = -\lambda \frac{\Delta T}{\delta}$$

Formel 1: Fourier'sche Gesetz

Weitere Information über die Theorie der Wärmeleitfähigkeit ist in dem Buch „Thermal Conductivity (T.M. Tritt, Springer US, 2004) zu finden. Eine ausführliche Zusammenfassung der verfügbaren stationären und dynamischen Wärmeleitfähigkeitsmessmethoden ist in der Dissertation „Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen. Untersuchungen zu Ursachen für unterschiedliche Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren“ (Rhena Wulf, Freiberg, 2009) dargestellt.

- **Spezifische Wärmekapazität**

Die Enthalpie eines Stoffes nimmt mit steigender Temperatur zu. Sie kann als eine Enthalpieänderung beschrieben werden, die durch das Produkt aus der Temperaturdifferenz und der Wärmekapazität des Materials bei konstantem Druck definiert ist, solange die Wärmekapazität über den interessierenden Temperaturbereich konstant ist. Die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck ist definiert als die auf die Masse bezogene Wärmekapazität. Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität gewinnt bei größeren Temperaturdifferenzen an Bedeutung.

$$\Delta H(T) = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$$

Formel 2: Beziehung zwischen Enthalpieänderung und spezifischer Wärmekapazität bei konstantem Druck

Die Wärmekapazität eines Materials wird durch den Stofftyp, die Masse und die Temperatur selbst bestimmt.

4.5.1. Messungen mit Handmessgeräten

(1) Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Die Messungen der thermophysikalischen Parameter erfolgten sobald als möglich nach der Kernentnahme im Gelände mit dem und zu einem späteren Zeitpunkt an den akklimatisierten Proben im Labor. Die Messungen der thermophysikalischen Parameter im Gelände wurden mit dem „ISOMET-Heat Transfer Analyzer - Model 2104“ (ABB) und dem Nachfolger ISOMET 2114 (ABB) durchgeführt. Dabei handelt es sich um tragbare Instrumente zur direkten Messung thermophysikalischer Eigenschaften. Beide Geräte verwenden die Methode der instationären Linienquelle. Dabei wird eine Heizquelle (Nadelprobe) mit einer Probe in Kontakt gebracht und mit konstanter Leistung beheizt. Gleichzeitig wird im Inneren der Heizquelle die Temperatur registriert.

Die Wärmeleitfähigkeit der Probe wird über den Temperaturanstieg in der Quelle berechnet. Generell gilt, je langsamer der Temperaturanstieg desto höher die Wärmeleitfähigkeit der Probe. Die ersten Messungen wurden mit dem ISOMET 2114 durchgeführt. Die Methode erwies sich allerdings schon nach den ersten Messungen als nicht geeignet, da die Aufheizung im Gerät durch die hohen Außentemperaturen am Bohrplatz gestört wurde. Daraufhin wurde die Messung der thermophysikalischen Parameter nur mehr in den Proben im Labor mit dem ISOMET 2104 durchgeführt. Neben der Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K] werden mit dem ISOMET 2104 und 2114 auch die Temperaturleitfähigkeit oder thermische Diffusivität a [m²/s] und die volumetrische Wärmekapazität c_p [J/m³·K] bestimmt. Der Messbereich liegt für die Wärmeleitfähigkeit bei 0,2 bis 2 W/m·K. Die Messdauer beträgt in etwa 20 Minuten. Die Bodenfeuchte wurde nur im Gelände bestimmt.

Bei der Durchführung der Messung wurden beide Sensoren, die ISOMET-Nadelsonde und der 5TM-Sensor, vorsichtig in das Sediment gestochen (ABB). Alle Messungen wurden in situ im Bohrkern ohne Anwendung von Wärmeleitpasten durchgeführt. Im Falle der Messungen im Gelände erfolgte die Bestimmung der Parameter horizontal zum Bohrfad (ABB). Im Labor wurde zusätzlich in Richtung der Bohrung und in die Gegenrichtung gemessen.

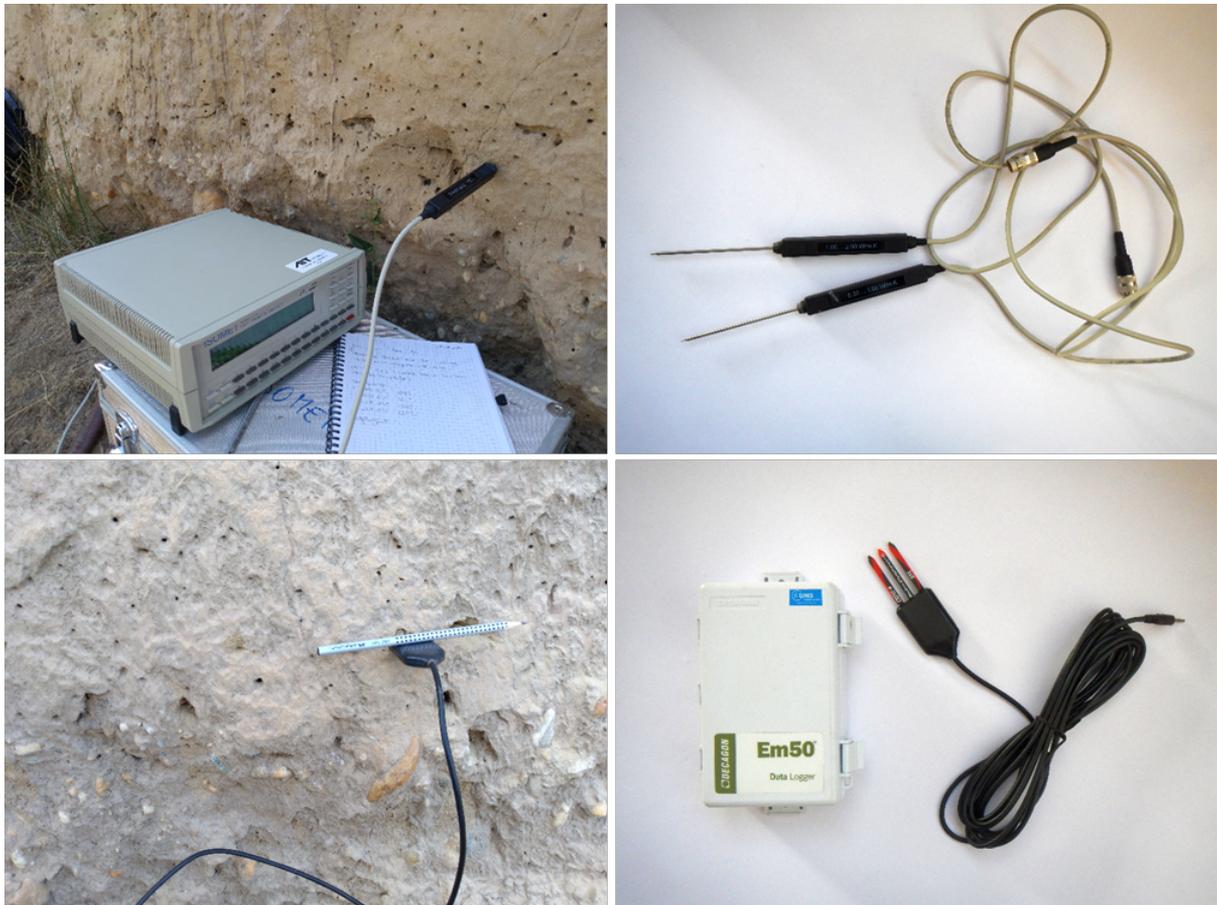


Abbildung 11: Oben: Isomet 2104 bei Messung im Gelände und verwendete Nadelsonden.
Unten: Feuchtemessung im Gelände und verwendetes Messinstrument mit Sensor

(2) Bodenfeuchte, Bodentemperatur, elektrische Leitfähigkeit

Bodenfeuchte [m^3/m^3], Bodentemperatur [$^{\circ}\text{C}$] und elektrische Leitfähigkeit [mS/cm] wurden aus Messungen mit einem Em50-Datenlogger in Kombination mit einem Bodenfeuchtigkeits- und Temperatursensor (5TM) aus dem ECH₂O-System von Decagon Devices (ABB) ermittelt. Der Sensor ermittelt den Wassergehalt durch Messung der Dielektrizitätskonstante des Materials. Die Methode dahinter ist die Kapazitäts-/Frequenzbereich-Technologie. Ein Thermistor misst die Temperatur. Die Messdauer liegt unter 1 Minute.



Abbildung 12: Bodenfeuchte-Messung an den Bohrkernen

Für die Probennahme wurde an signifikanten Abschnitten (Schichtwechsel, Unterschiede in der Fossilführung, Farbänderungen) jedoch mindestens alle 2,5 Meter eine Probe von 15 bis 50 cm Länge für die Laboruntersuchungen entnommen.

Zusätzlich wurden einige Proben aus ausgewählten Sedimentbetten für Laboruntersuchungen an der Rohstoffabteilung der GBA entnommen. Diese Untersuchungen umfassen mineralogische Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie, Korngrößenanalysen und Feuchtebestimmungen im Labor.

Weitere an den Bohrkernen direkt durchgeführte Untersuchungen umfassen die Bestimmung von:

- Elementverteilung mittels mobiler RFA
- einaxiale Druckfestigkeit mittels Taschenpenetrometer
- Magnetische Suszeptibilität
- Gammastrahlung
- Elektrische Leitfähigkeit mit 2 unterschiedlichen weiteren Methoden

Nach der Fertigstellung aller Messungen wurde aufgrund der Ergebnisse eine Probenauswahl für die weiterführenden Untersuchungen am AIT durchgeführt.

4.5.2. Messungen im Thermophysiklabor

(1) Wärmeleitfähigkeit mittels Heat Flow Meter - HFM

Die HFM-Technik ist ein stationäres Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von festen Materialien durch Anlegen einer definierten Temperaturdifferenz über die Probe und Messung des Wärmeflusses über einen definierten Bereich, was die Wärmestromdichte ergibt.

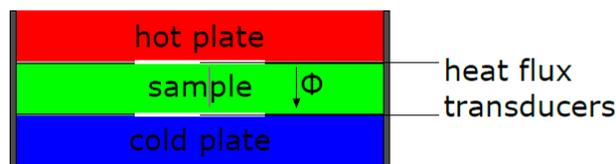


Abbildung 13: Skizze eines HFM mit symmetrischer Anordnung und einer Platte

Für genaue Ergebnisse des konstanten, einseitig gerichteten Wärmeflusses ist es notwendig, planparallele, homogene Proben zwischen den Platten zu haben. Für die Messung von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wird nach DIN EN 12664 empfohlen, dickere Proben vorzubereiten, um den thermischen Gesamt Widerstand zu erhöhen. Zusätzlich wird festgestellt, dass der Einfluss des thermischen Kontaktwiderstands zwischen den Platten und der Probe mit geringem thermischem Widerstand der Probe zunimmt.

Bei den untersuchten Bohrkernproben wurde das eingesetzte NETZSCH HFM 446 Lambda Medium Gerät mit einem speziellen Instrumentarium ausgestattet, das zur Erhöhung des thermischen Widerstands des Probenaufbaus eingesetzt wird. Der Gerätehersteller definiert einen Grenzwert von $> 0,5 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ für die Anwendung des Instrumentationskits, bestehend aus Interface-Pads aus kompressiblem Gummi und zusätzlichen Thermoelementen.

- **Probenvorbereitung (Wärmeleitfähigkeit, HFM)**

Abbildung 14 stellt die Probenvorbereitung für HFM-Proben dar, beginnend mit Teilen des verfügbaren Bohrkerns bis hin zum endgültigen Aufbau im HFM-Messgerät.



a)



b)



c)



d)

Abbildung 14: a) Bohrkern aus der Tiefe 79,15 bis 79,5 m; b) präparierte zylindrische Probe mit einem Durchmesser von $\varnothing \sim 158,25(2,39)$ mm und einer Dicke von $d = 56,22(0,105)$ mm; c) Probe in Polyethylenfolie verpackt; d) Probenaufbau im HFM mit Thermoelementen, die mit der oberen und unteren Fläche der Probe verbunden sind umgeben von einer Polystyrol-Isolierung

Aus verschiedenen Teilen des Bohrkerns wurden Scheiben mit einer Stärke von ca. 5 cm herausgeschnitten. Die kreisförmigen Flächen wurden mit einem Messer geschabt, um eine homogene Dicke über die gesamte Probe zu erhalten. Danach wurde die Probe in eine Polyethylenfolie verpackt, um ein weiteres Austrocknen der Bohrkernprobe während des Experiments zu vermeiden, und zusätzliche Thermoelemente (Typ K) wurden in der Mitte der beiden Kreisflächen aufgeklebt. Schließlich wird die Probe mit den beiden Thermoelementen in der HFM zwischen zwei Silikonmatten platziert, um bessere Kontaktbedingungen zwischen den Wärmeflussplatten und der Probe zu schaffen. Zusätzlich wird die Probe mit einer Polystyrol-Isolierung ummantelt, um die seitlichen Wärmeflüsse zu minimieren.

Nach den HFM-Messungen der feuchten Bohrkernproben wurden die Proben in einem Laborofen bei $T = 105$ °C getrocknet. Die Dauer des Trocknungsprozesses hing vom Feuchtigkeitsgehalt der Probe ab und wurde regelmäßig mit einer Laborwaage überprüft, bis keine Massenänderung mehr festgestellt wurde.



Abbildung 15: Trocknung der Bohrkernproben bei 105 °C in einem Laborofen

Nach dem Trocknungsprozess wurden die Proben ohne PE-Folie in das HFM-System eingebracht. Die Thermoelemente wurden in der Mitte der beiden kreisförmigen Flächen auf der Ober- und Unterseite der Probe aufgeklebt. Die Dicke der Proben wurde an mehreren Stellen mit einem Messschieber CD-15CPX von Mitutoyo gemessen, das Gewicht mit einer digitalen Präzisionslaborwaage TE6101 von Sartorius mit einer Auflösung von 0,1 g und einem Maximalgewicht von 6100 g.

- **Messmethode**

Die effektive Wärmeleitfähigkeit der Proben wurde bei drei mittleren Temperaturen bei 15 °C, 25 °C und 35 °C mit einem Temperaturgradienten von $\Delta T = 20$ °C bestimmt. Der Anfangsdruck des Stapels auf die Probe bei Raumtemperatur wurde mit $p = 5$ kPa definiert.

Das HFM-System wurde mit einem Standard-Referenzmaterial - SRM 1450d, einer Glasfaserplatte für Wärmeleitfähigkeitsmessungen zwischen 7 °C und 65 °C die vom National Institute of Standards and Technology - NIST bereitgestellt wurde, kalibriert, korrigiert und verifiziert. Das SRM 1450d ist ein Isoliermaterial mit $\lambda(293\text{ K}) = 0,032\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Die HFM-Messungen benötigen auch definierte Gleichgewichtskriterien, bei denen ein gemessener Wärmestrom für die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit genommen wird. Im Falle der Bohrkernmessungen wurden die Kriterien mit einer Aktualisierungsrate der Messdaten von 1 min und einer maximalen Abweichung von 0,1 % der gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeitsdaten nach 15 aufeinanderfolgenden Abfragen definiert.

- **Auswertung und Unsicherheit**

Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird als Mittelwert über alle gemessenen Proben für eine definierte Teufe ausgewertet. Die dargestellte erweiterte kombinierte Standardunsicherheit mit unkorrelierten Eingangsgrößen mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ (95 % Konfidenzintervall) enthält die empirische Standardabweichung der einzelnen Probenergebnisse sowie eine gerätespezifische Unsicherheit aus der Abweichung der gemessenen Wärmeleitfähigkeitsdaten vom SRM zu den

Literaturwerten (s. „Guide to the expression of uncertainty in measurement“, Bureau International des Poids et Mesures, 1st ed., International Organization for Standardization, Genève, 1993).

(2) Wärmekapazität mittels Differential Scanning Calorimetry – DSC

Der Hauptzweck eines Kalorimeters ist die Messung eines Wärmeaustauschs. In dieser Arbeit wurde zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität eine Wärmestrom-DSC der Firma NETZSCH mit der Bezeichnung DSC 204 F1 verwendet.

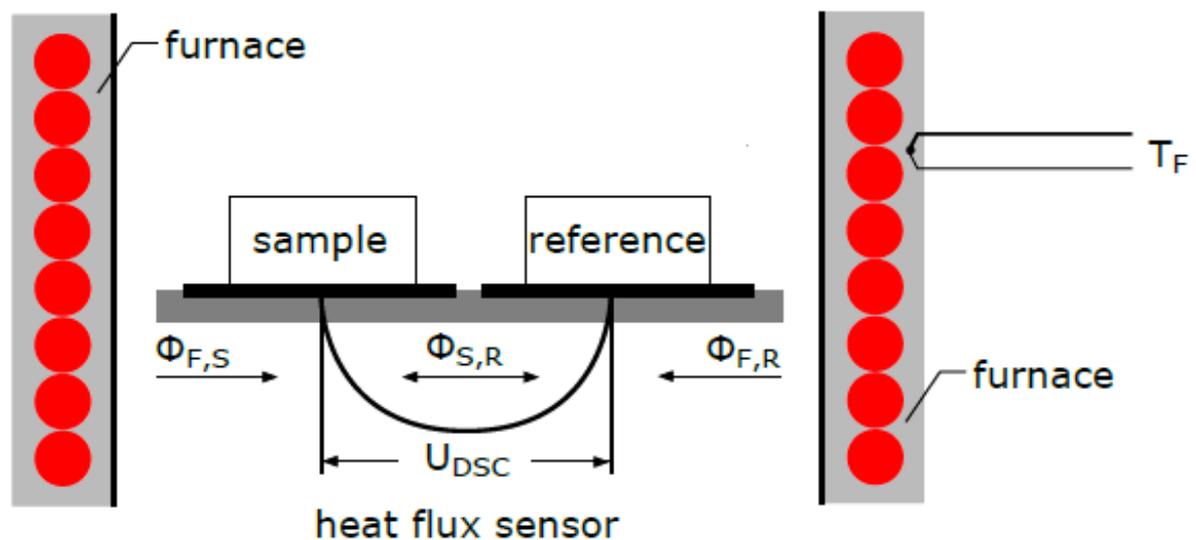


Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Wärmestrom-DSC mit einem Scheibensensor und illustrierten Wärmestrompfaden

Die spezifische Wärmekapazität ist die Wärmemenge, die erforderlich ist, um die Temperatur einer Substanz bei konstantem Druck ohne Phasenübergang erster Ordnung um 1 K zu erhöhen. Nach der Norm des Deutschen Instituts für Normung (DIN) 51007 sind mindestens drei Messläufe erforderlich, um die spezifische Wärmekapazität einer Substanz zu bewerten: eine Nulllinienmessung mit leeren Tiegeln, eine Standard-Referenzmessung (z.B. α -Al₂O₃-Saphirstandard) und eine Probenmessung.

Die folgende Gleichung beschreibt die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität einer Probe durch das Produkt aus der spezifischen Wärme des Referenzmaterials, dem Verhältnis der Referenz- und Probenmasse und dem Verhältnis der nulllinienkorrigiert gemessenen DSC-Spannung der Probe und der Referenz.

$$c_{p,S}(T) = c_{p,Ref}(T) \frac{m_{Ref}}{m_S} \frac{U_S(T) - U_0(T)}{U_{Ref}(T) - U_0(T)}$$

Formel 3: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität auf der Grundlage korrigierter Proben und Referenzmessungen in der DSC

- **Probenvorbereitung (Wärmekapazität, DSC)**

Die Proben für die DSC-Messungen wurden direkt aus den feuchten Bohrkernproben oder den getrockneten HFM-Proben (s. HFM Probenvorbereitung) vorbereitet. Mindestens drei Proben pro Tiefe wurden in der DSC gemessen. Für das Experiment wurden Aluminiumtiegel mit einem Volumen von 40 mm³ verwendet und mit der Probe gefüllt. Anschließend wurden die Tiegel verschlossen und mit einem Aluminiumdeckel kalt verschweißt.



Abbildung 17: links: Tiegel und Deckel aus Aluminium; rechts: Tiegel gefüllt mit Bohrkernprobe

Die verwendeten Probenmassen lagen zwischen $m = 20$ und 40 mg für die feuchten und trockenen Proben.

- **Messprozedur**

Alle DSC-Experimente wurden unter dynamischen He Gasbedingungen mit einem Gasfluss von 40 ml min⁻¹ durchgeführt. Das Temperaturprogramm des DSC-Ofens wurde wie folgt definiert:

1. Start bei 25 °C
2. Kühlsegment auf -30 °C mit 10 K min⁻¹
3. Isothermes Segment bei -30 °C für 5 Minuten
4. Heizsegment auf 60 °C mit 20 K min⁻¹

Vor jedem Probensatz, der aus drei Proben für jede Teufe bestand, wurden drei Nulllinienmessungen mit leeren Tiegeln durchgeführt. Danach wurden die drei Probenmessungen für die aktuelle Bohrkertiefe durchgeführt, gefolgt von drei Saphir-Referenz-Standardmessungen. Dieses Verfahren wurde 4-mal für die feuchten und 4-mal für die trockenen Proben wiederholt. Insgesamt wurden 72 DSC-Messungen zur Bewertung der spezifischen Wärmekapazität der Untergrundproben durchgeführt.

- **Auswertung und Messunsicherheit**

$$c_{p,S}(T) = c_{p,Ref}(T) \frac{m_{Ref}}{m_S} \frac{U_S(T) - U_0(T)}{U_{Ref}(T) - U_0(T)}$$

Wie bereits in

beschrieben, wird die spezifische Wärmekapazität durch das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität des Referenzmaterials, dem Verhältnis von Referenz- und Probenmasse und dem Verhältnis der nulllinienkorrigierten gemessenen DSC-Spannung von Probe und Referenz bewertet. Die in der Auswertung gezeigten Ergebnisse sind die Mittelwerte von drei Einzelmessungen.

Zusätzlich wird die dargestellte Unsicherheit gemäß dem "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (Bureau International des Poids et Mesures, Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1st ed., International Organization for Standardization, Genève, 1993) berechnet.

(3) Thermische Ausdehnung mittels Schubstangendilatometrie

Die meisten Substanzen vergrößern ihr Volumen, wenn sie bei konstantem Druck erhitzt werden. Einige Stoffe ziehen sich bei der Erwärmung auch zusammen, wie man bei Wasser unter 4 °C sehen kann. Diese thermische Ausdehnung kann negativ oder positiv und je nach der beobachteten Substanz auch anisotrop sein.

Die Schubstangendilatometrie ist eine spezielle Methode der Dilatometrie zur Bestimmung der linearen Wärmeausdehnung eines Festkörpers als Funktion der Temperatur.

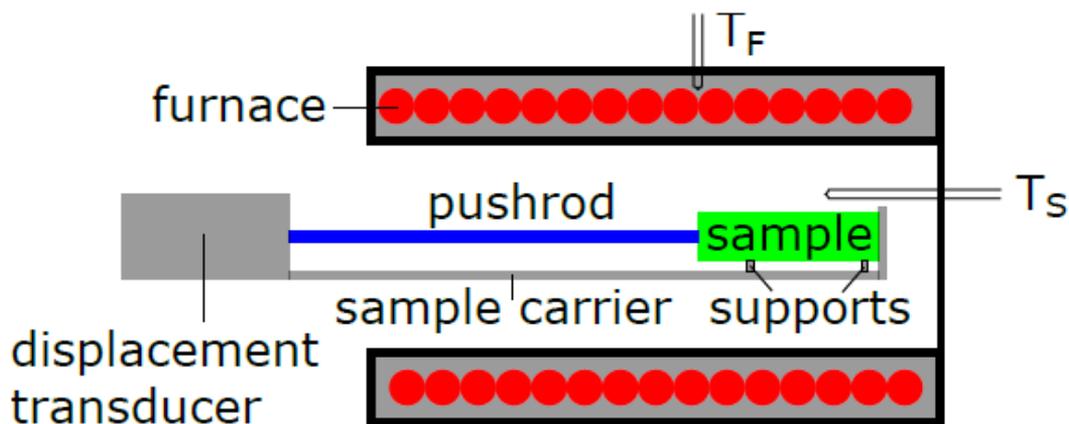


Abbildung 18: Skizze des Dilatometer-Funktionsprinzips

In dieser Arbeit wurde ein NETZSCH DIL 402 C mit einem SiC-Ofen und Aluminiumoxid-Probenhalter, Schubstange und Probenträger eingesetzt. Dieses System hat einen Messbereich von 5 mm und der auf elektromagnetischer Induktion basierende lineare Wegaufnehmer (LVDT) hat eine Auflösung von 1,25 nm pro Digit.

Wenn die Probe erwärmt wird, führt die thermische Ausdehnung der Probe zu einer Verschiebung der Schubstange, die vom Wegaufnehmer erfasst wird. Darüber hinaus wird die Temperatur an der Probe während des gesamten Messlaufs aufgezeichnet. Es ist zu beachten, dass sich alle eingebauten Komponenten (Probenträger, Schubstange, Stützen) während des Heizsegments des Ofens ausdehnen. Aus diesem Grund ist eine Korrekturfunktion notwendig, um beide Ausdehnungsverhalten zu trennen. Zusätzlich muss die Schubstange mit einer minimalen Kraft die Probe "schieben", um einen Kontakt zwischen Probe und Schubstange zu gewährleisten.

- **Probenvorbereitung (Dilatometer)**

Die Proben für die Wärmeausdehnungsmessungen wurden aus 4 verschiedenen Bohrkertiefen präpariert. Für jede Tiefe wurden mindestens drei Proben in axialer und drei Proben in radialer Richtung präpariert und im aktuellen feuchten Zustand gemessen.

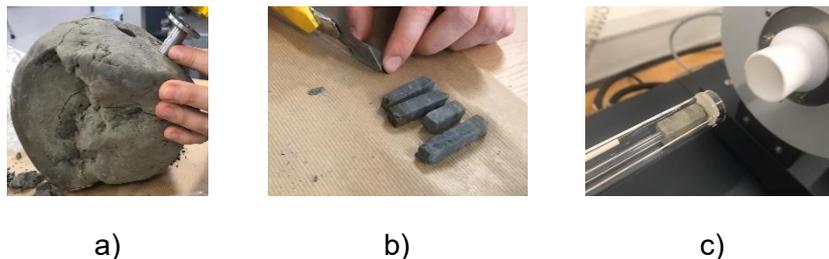


Abbildung 19: a) Vorbereitung der Bohrkernprobe b) Vorbereitung der Probe für die Quaderdilatometrie c) Bohrkernprobe im Probenhalter des Dilatometers

Im zweiten Messlauf wurden die Proben in einem Laborofen bei 105 °C getrocknet, bis keine Massenänderungen mehr festgestellt wurden. Die Probenlänge in Richtung der Dilatometermessung betrug ≈ 25 mm, während der quadratische Querschnitt eine Abmessung von ca. 8 x 8 mm hat. Die Probenichte im feuchten und trockenen Zustand entspricht, wie bereits erwähnt, den gemessenen Dichten der HFM-Proben.

- **Messverfahren**

Die lineare Wärmeausdehnungsmessung für die feuchten Proben wurde im Temperaturbereich von -10 °C bis 80 °C in zwei aufeinander folgenden Aufheiz- und Abkühlzyklen durchgeführt. Die Aufheiz- und Abkühlrate wurde mit 2,5 K min⁻¹ definiert, um thermische Gradienten in der Probe zu vermeiden, und während des gesamten Messlaufs wurde eine zusätzliche Durchflussrate des He-Gases aufgebracht, um die Entfernung der Feuchtigkeit aus der Probenkammer sicherzustellen. Die getrockneten Proben wurden bis auf den zweiten Heiz- und Kühlzyklus mit dem gleichen Temperaturprogramm gemessen. Vor der linearen Wärmeausdehnungsmessung der Proben wurde eine Korrekturmessung auf der Basis eines Saphir-Standardreferenzmaterials mit einer Ausgangslänge von 24.983 mm durchgeführt.

- **Auswertung**

Die gemessenen Daten werden für jede einzelne Probe dargestellt, wobei die Wärmeausdehnungskurven als relative Längenänderung zur Ausgangslänge in $[\Delta L L_0^{-1}] = 1$ und die Temperatur am Thermoelement in der Nähe der Probe in $[T] = ^\circ\text{C}$ gegen die Zeit $[t] = \text{min}$ dargestellt sind.

4.6. Numerische Modellierung aller Systemkomponenten unter Einbeziehung der Feld- und Laborversuche

4.6.1. Modellaufbau und Parametrisierung

Der Aufbau eines FEFLOW-Modells kann in zwei Phasen unterteilt werden. Im ersten Schritt wurde ein 2D „Supermesh“ erstellt und vernetzt, dieses Netz wird im zweiten Schritt in die Tiefe extrudiert. Daher müssen im Supermesh bereits alle benötigten geometrischen Elemente beinhaltet sein. Diese geometrischen Elemente sind im vorliegenden Fall:

- **Die Erdwärmesonde:** Diese muss als Punkt im Modell berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss der direkte Nahbereich der Sonde mit einer bestimmten Elementgröße diskretisiert werden um an der Sonde selbst sowohl Wärmestrom als auch Temperatur korrekt abzubilden (DHI-WASY GmbH, 2010).
- **Fernwärmeleitung:** Etwa 10 m neben der Sonde verläuft eine Fernwärmeleitung, das ungestörte Temperaturprofil lässt vermuten, dass diese Fernwärmeleitung einen Einfluss auf die Sonde hat und muss daher im Modell berücksichtigt werden.

Bei der Tiefendiskretisierung muss darauf geachtet werden, dass die bei der Bohrung identifizierten Schichtpakete auch im Modell abgebildet werden, das sind insbesondere die anthropogene Anschüttung, die Abfolge von Kiesen und Sanden und der Grundwasserspiegel und die Grundwasserstaueroberkante. In der Folge wurde das Modell mit einer Startparametrisierung entsprechend den Ergebnissen der TRT Messungen belegt.

4.6.2. Modellkalibrierung

Das Modell wurde einer mehrstufigen Kalibrierung mit jeweils anderen Eingangsdaten und Kalibrierzielen unterzogen: Die erste Stufe umfasst die Kalibrierung der Startwerte. Eingangsdaten hierfür sind die Messungen des ungestörten Temperaturprofils, Kalibrierziel ist die Anpassung der Randbedingungen (Oberflächentemperatur, Randbedingung Fernwärmeleitung, Grundwasserzustrom). Die weiteren Kalibrierschritte umfassen die Kalibrierung der TRT Messungen und der Abkühlkurven. Dabei werden die Fluidtemperaturen der TRT Messungen in erster Linie für die Ermittlung der Sondenübergangswiderstände (R_a und R_b) benutzt, während die Kalibrierung der Abkühlphasen auf die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds abzielt. Ist durch die Kalibrierung eine ausreichende Anpassung der Modellergebnisse an die Messdaten erreicht gilt die Kalibrierung als abgeschlossen. Zur weiteren Validierung der Ergebnisse wurde noch der gesamte

Speicherbetrieb modelliert. Das Hauptaugenmerk bei der Validierung wurde nicht auf die Vor- und Rücklauftemperaturen der Speicherzyklen gelegt, sondern wieder auf die Untergrundtemperatur während der Stillstandszeiten. Hier kann einerseits auf die DTS Messung zurückgegriffen werden, weiters stehen auch Zirkulationsmessungen zur Verfügung.

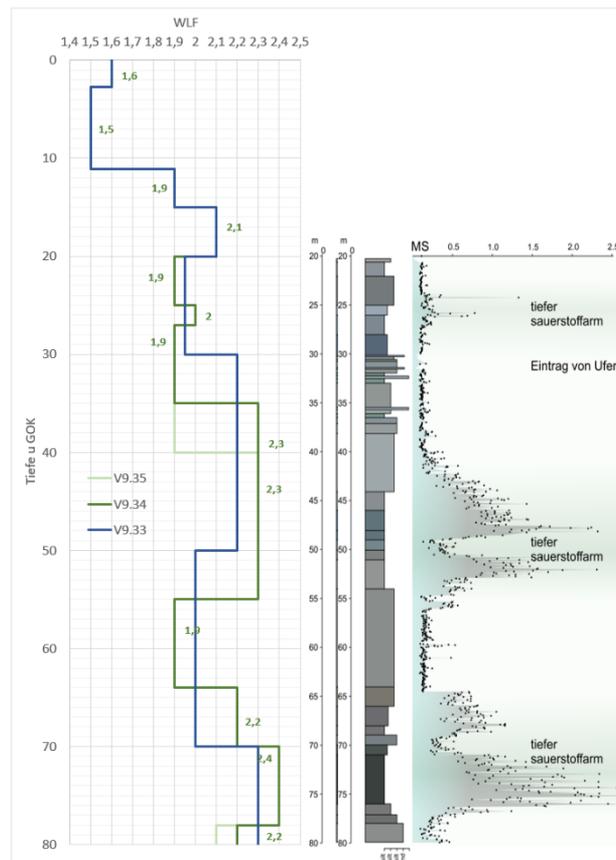


Abbildung 20: links: Wärmeleitfähigkeitsprofil als Ergebnis der Modellkalibrierung. Rechts: Interpretation der Bohrkernaufnahme von Matthias Harzhauser. Die Zonierung der Kalibrierung ist daran angelehnt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der FEFLOW-Modellierung. Die gemessenen Temperaturen können durch das kalibrierte Modell in hinreichender Genauigkeit wiedergegeben werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Messdaten belegen jedoch nur den Temperaturverlauf direkt an der Erdwärmesonde selbst, erst durch numerische Modellierung kann gezeigt werden, dass die thermische Beeinflussung des Untergrunds lokal sehr stark begrenzt ist (Abbildung 21).

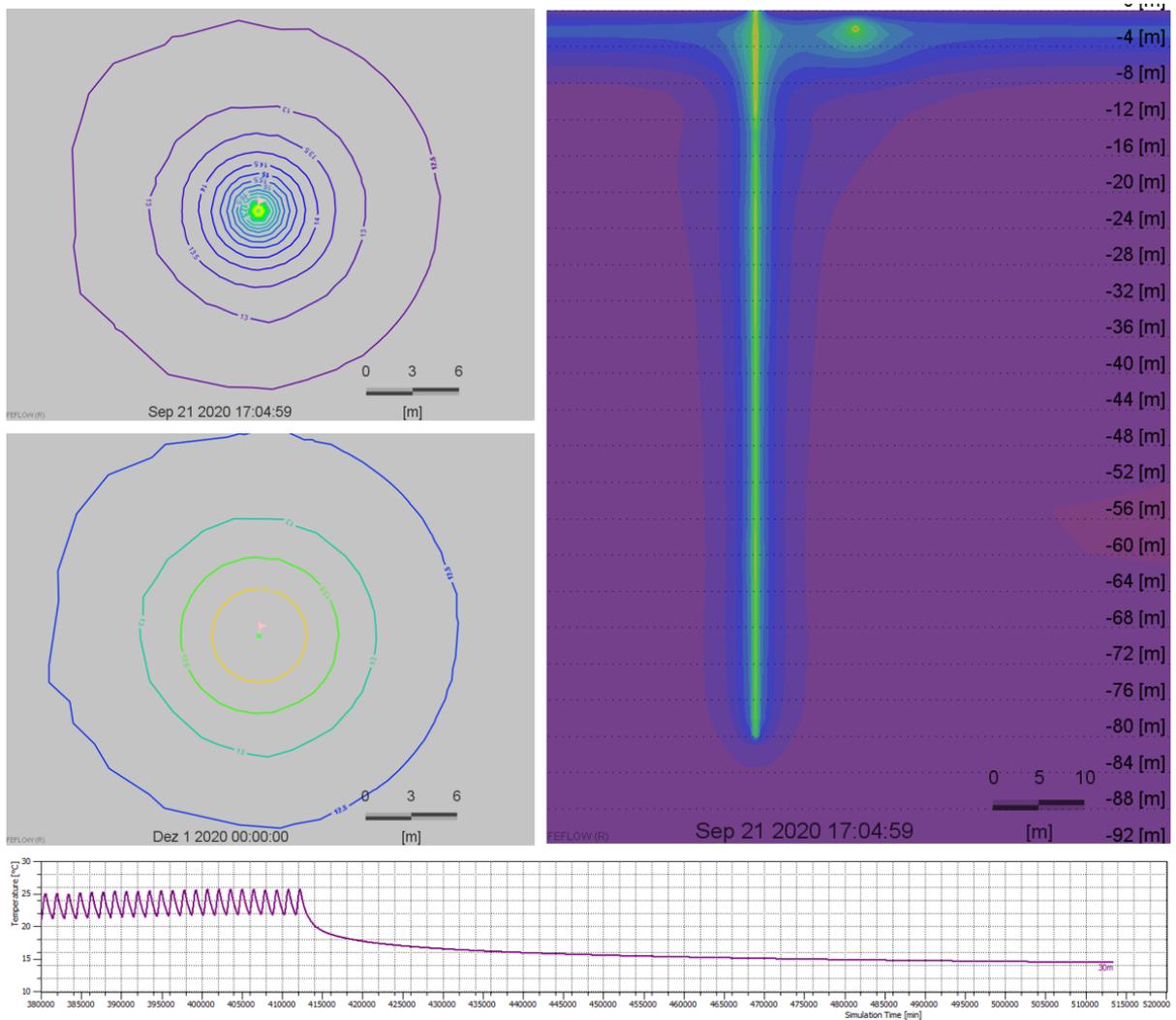


Abbildung 21: Vertikal- und zwei Horizontalschnitte durch das numerische Erdwärmesondenmodell. Im Vertikalschnitt ist auch die Fernwärmeleitung deutlich als Wärmequelle erkennbar (rechts). Die Horizontalschnitte sind zu zwei verschiedenen Zeitpunkten dargestellt: Am 21. September zum Ende des Speichervorgangs (oben) und am 1. Dezember (unten). Das Modell zeigt deutlich übereinstimmend mit den Messdaten, dass die der Bereich hoher Temperatur lokal sehr begrenzt ist.

Abbildung 22: Vergleich der modellierten und gemessenen Fluidtemperaturen. Oben im Gesamtzeitraum, unten sind exemplarisch 10 Tage im Juni herausgegriffen.

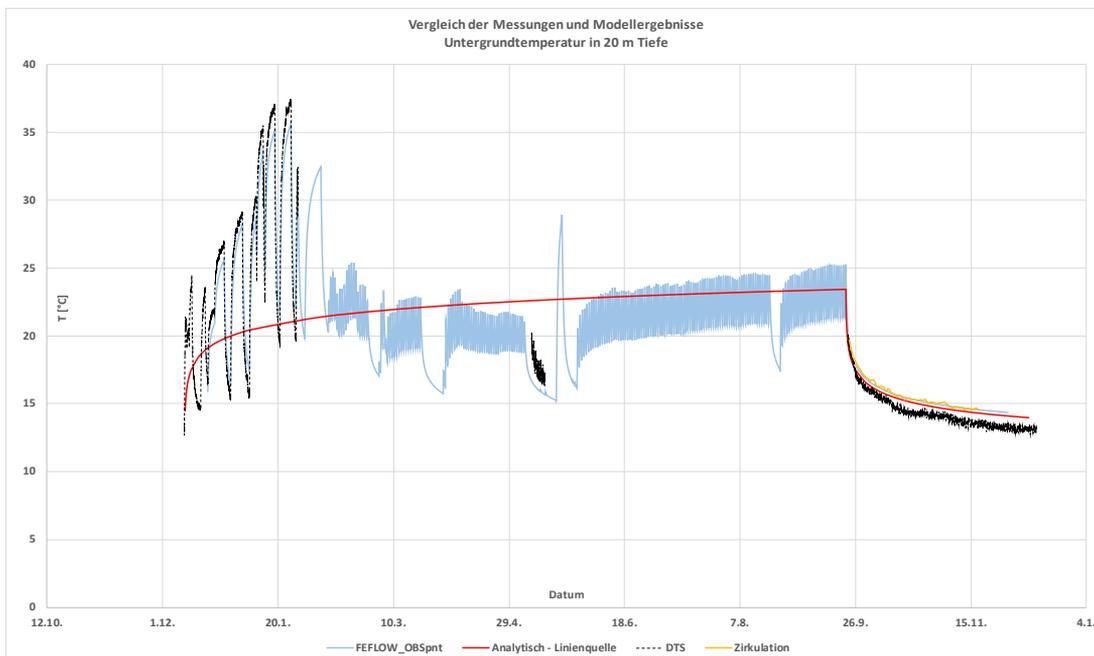


Abbildung 23: Zusammenstellung der gemessenen und durch das FEFLOW-Modell errechneten Temperaturverläufe.

4.7. Kennfelderstellung Wärmepumpe und Szenarienmodellierung

Im Rahmen des Feldversuchs wurde der Wärmeeintrag in den Erdsondenspeicher betrachtet. Die Wärmespeicherung und der Wärmeentzug werden durch numerische Modellierung in mehreren Szenarien betrachtet. Weiters wurde die Skalierbarkeit der erzielten Ergebnisse untersucht.

Bei Einzelsonden sind die Speicherverluste deutlich höher als bei Sondenfeldern, daher wird jede Umsetzung des betrachteten Konzepts durch Sondenfelder realisiert werden. Durch numerische Modellierung können die Betriebsfunktionen relativ einfach auf ein ganzes Sondenfeld skaliert werden. Die sukzessive Erhöhung der Untergrundtemperatur wirkt sich positiv auf die Jahresarbeitszahl (Seasonal Coefficient of Performance – SCOP) der Wärmepumpe aus, daher ist die Wärmepumpensimulation an dieser Stelle ein wichtiges Tool für die Beurteilung des Gesamtsystems. Untergrund- und Wärmepumpensimulation griffen iterativ ineinander. Das Sondenfeldmodell besteht aus 96 Sonden, in einem 4x4 m-Raster angeordnet (Abbildung 24).

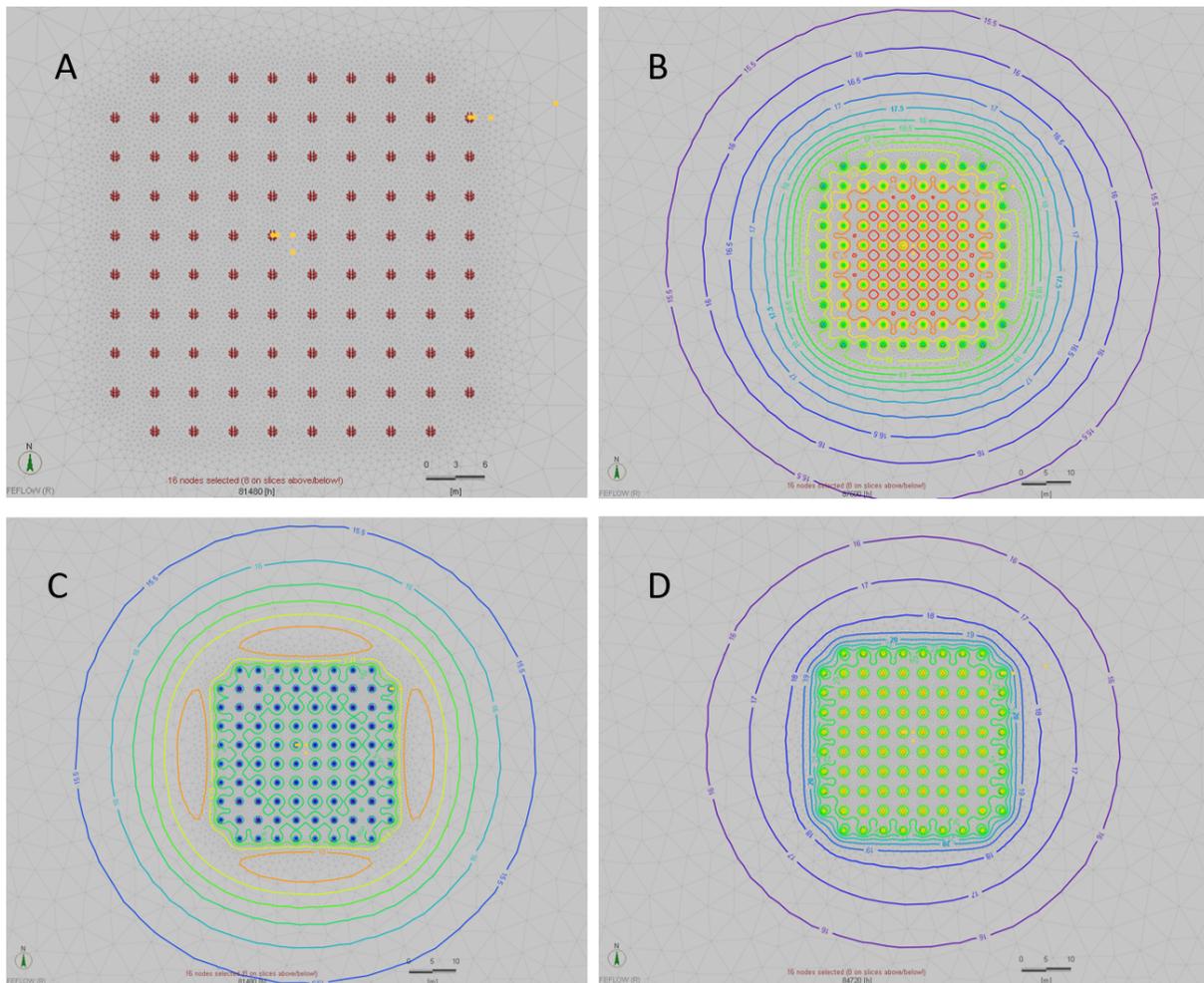
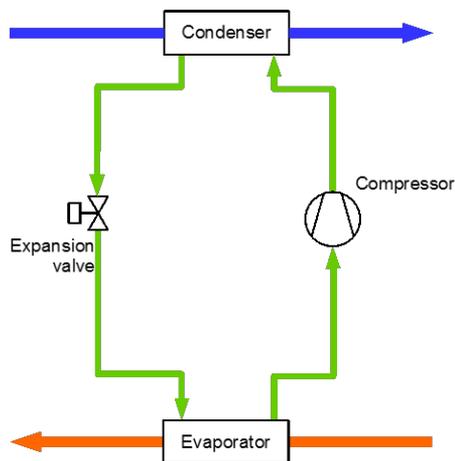


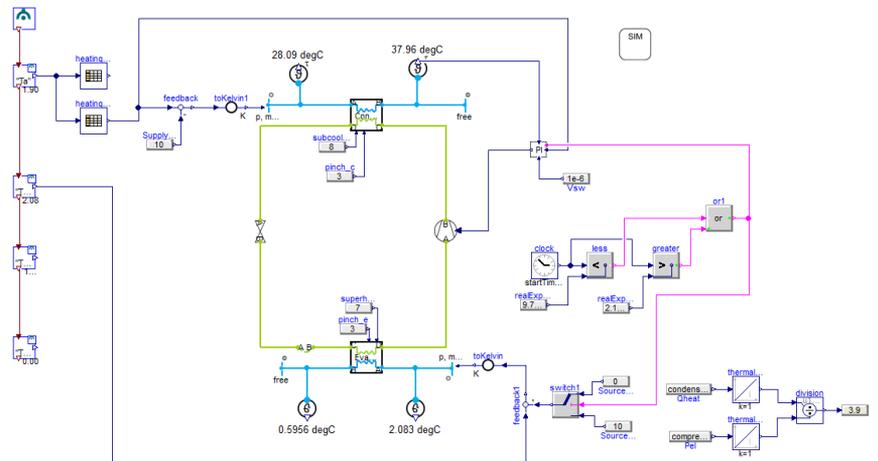
Abbildung 24: Schnitt durch das Sondenfeldmodell. A: Lage der Sonden und Beobachtungspunkte (gelb). B, C und D: Situation im 10. Betriebsjahr jeweils am 1.1. (Hochwinter), 15.4. (Ende Heizsaison) und 31.8. (Hochsommer)

Basierend auf den Anforderungen der Wärmepumpe für den Einsatz in Gebäuden wurde ein bestimmter Kältekreislauf sowie ein passendes Kältemittel für den Einsatz von Erdreichwärmepumpen modelliert. Die Kreislaufsimulationen wurden mit der Programmiersprache Modelica in der Simulationsumgebung Dymola durchgeführt. Modelica ist eine Programmiersprache zur fachgebietsübergreifenden Modellierung, mit dem das dynamische Verhalten von physikalischen Systemen in einer komfortablen und zweckdienlichen Art und Weise beschreiben werden kann. Die Modelle werden durch differentielle, algebraische und diskrete Gleichungen beschrieben, und der Anwender kann den Fokus auf die mathematische Beschreibung der einzelnen Komponenten legen.

Mit dem Simulationsmodell wird ein weiter Bereich von Betriebsbedingungen simuliert und die wesentlichen Parameter (z.B. Heizleistung, COP – Coefficient of performance) davon abgeleitet. Abbildung 25 zeigt die ausgewählte Wärmepumpenkonfiguration als Schema (links) und die Darstellung in der Simulationsumgebung (rechts).



Schema Standardkältekreis



Simulationsmodell in Dymola/Modelica

Abbildung 25: Wärmepumpenkonfiguration mit einstufiger Verdichtung; Schema (links), Modell (rechts).

Die Wärmepumpenkonfiguration ist ein geschlossener Kältemittelkreislauf und setzt sich aus den Hauptkomponenten Wärmeübertragern, Kompressor und Expansionsventil zusammen. Zuverlässige und experimentell validierte Modelle solcher Komponenten sind in kommerziellen Bibliotheken wie TIL von TLK-Thermo für die Simulationsumgebung Dymola verfügbar. Für eine schnelle Variation und Auslegung werden von AIT entwickelte Komponentenmodelle der Wärmeübertrager auf Basis der bekannten NTU-Methode implementiert und hier genutzt.

Der Haupteinflussfaktor für die Effizienz einer Wärmepumpe ist das Verhalten des Verdichters. Die Charakteristik ist dabei durch Abhängigkeit der volumetrischen Effizienz und der Isentropeneffizienz vom Druckverhältnis berücksichtigt. Auf Basis eines Kennfelds werden diese Daten in das Gesamtmodell implementiert.

Tabelle 1: Simulationsparameter für die Wärmepumpe.

Simulationsparameter für die Wärmepumpe	
Verdichter	Kennfeld
Kältemittel	Propan R290 (Low GWP)
Heizungsvorlauftemperatur	variabel
Unterkühlung	8K
Überhitzung	7K
Grädigkeit Kondensator	3K
Grädigkeit Verdampfer	3K
Spreizung Senke	10K
Spreizung Quelle	1K
Keine Wärme- und Druckverluste	

Um den Einfluss einer erhöhten Untergrundtemperatur quantifizieren zu können muss das Wärmepumpenmodell auf Kennfeldbasis mit dem Untergrundmodell interagieren. D.h. je nach Wärmebedarf des Gebäudes ändert sich die Vorlauftemperatur des Heizsystems und damit auch die Leistungszahl (der COP) der Wärmepumpe. Dies wiederum wirkt sich auf den Wärmeentzug des Erdreichs aus und somit auch auf das Temperaturniveau der Wärmequelle.

Der Wärmebedarf des Gebäudes sowie die Klimadaten werden generisch auf Grundlage der klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa berücksichtigt, siehe Abbildung 26.

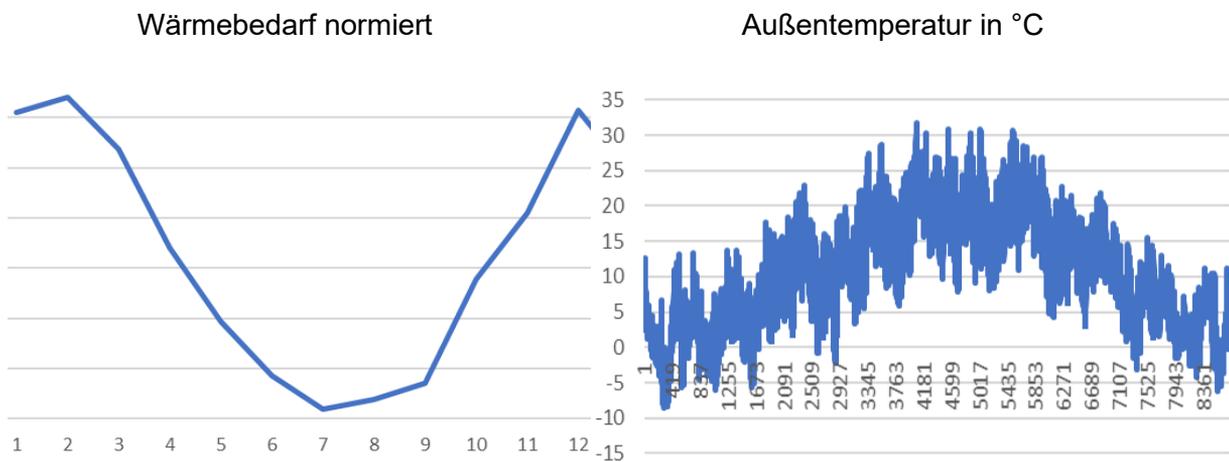


Abbildung 26: Jahresverlauf des Wärmebedarfs und der Umgebungstemperatur für das Testgebäude.

Auf Basis der Außentemperatur, des Dämmstandards sowie des Heizungsverteilsystems ergibt sich die notwendige Vorlauftemperatur, die in Kombination mit der Quelltemperatur, den COP der

Wärmepumpe vorgibt. Aufgrund ihrer geringeren Oberfläche im Vergleich zur FBH benötigen Radiatoren eine wesentlich höhere Vorlauftemperatur. An den kältesten Tagen des Jahres können das bis zu 15K mehr sein, siehe Abbildung 27: Vorlauftemperaturen für Radiatoren und FBH (Ruhnau et al., 2019)

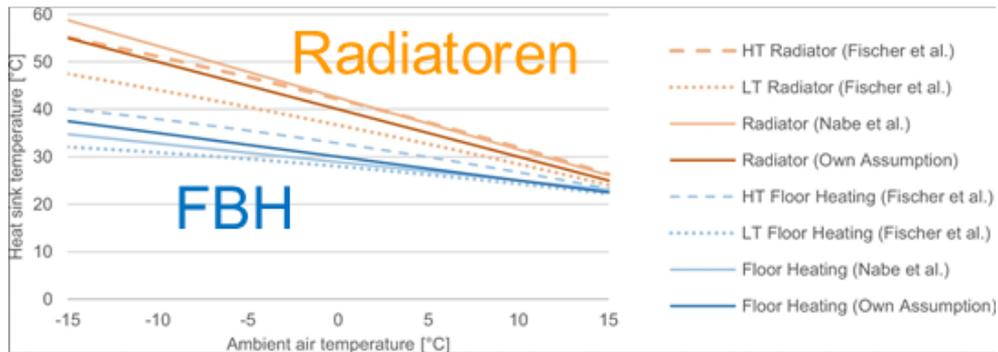


Abbildung 27: Vorlauftemperaturen für Radiatoren und FBH (Ruhnau et al., 2019)

Wie vorhin erwähnt, verwendet AIT für die Wärmepumpensimulationen Dymola/Modelica. GBA verwendet für die Untergrundsimulationen FEFLOW. Auf der einen Seite gibt es in Dymola/Modelica keine soliden Bibliotheken für eine akurate Untergrundsimulation. Auf der anderen Seite mangelt es an Wärmepumpenmodellen in FEFLOW. Hier wird der COP mit der Hand eingegeben bzw. abgeschätzt. Um diesem Mangel entgegenzuwirken verfolgen AIT und GBA einen iterativen Ansatz. D.h. zuerst wird der COP in der Untergrundsimulation abgeschätzt. Daraus ergeben sich Temperaturniveaus der Quelle. Mit diesen Werten wird dann die WP beaufschlagt und in Kombination mit der hinterlegten Gebäudeheizkurve wird dann ein neuer COP berechnet. Diese Iteration wird so lange durchgeführt, bis der Unterschied zwischen den neu berechneten COP-Werten und den vorigen Werten beliebig klein ist.

5 Ergebnisse

5.1. Daten aus der Versuchsanlage als Grundlage für die Modellierung

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Messdaten aus dem Anlagenbetrieb, die als Grundlage für die Modellierung herangezogen wurden.

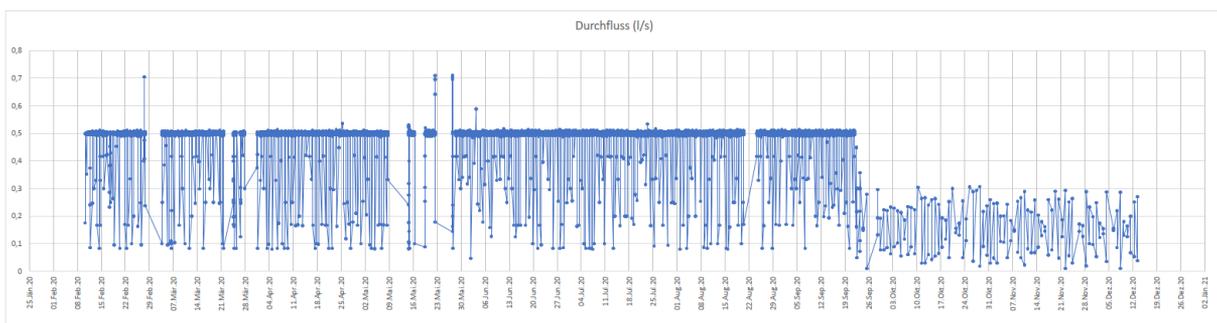


Abbildung 28: Durchfluss

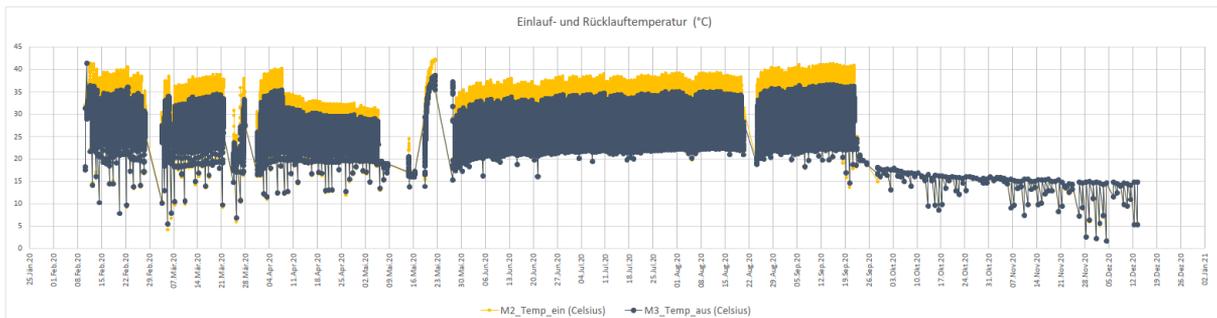


Abbildung 29: Vor- und Rücklauf Temperatur

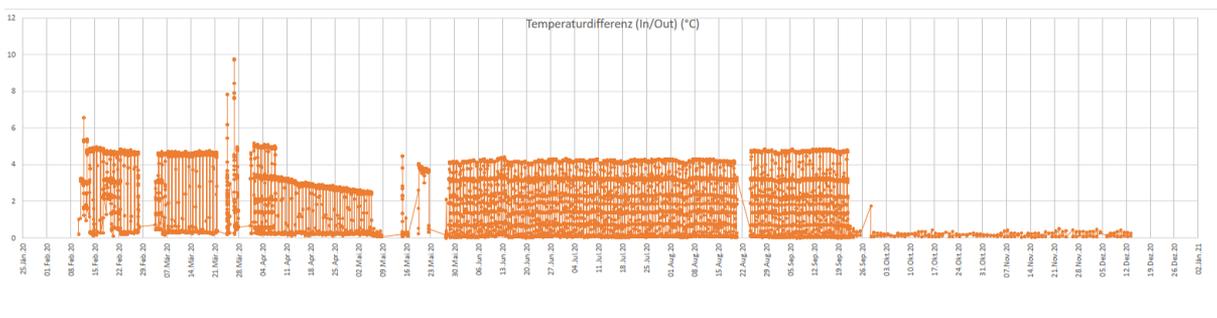


Abbildung 30: Temperaturdifferenz

Da im Zuge der Kontrollmessungen eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden verbauten Fühlern von 0,4°C festgestellt wurde, wurden die zugehörigen Rohdaten um diesen Wert korrigiert und danach

aus den korrigierten Temperaturdifferenzen und den Durchflussdaten folgender Leistungsgang ermittelt.

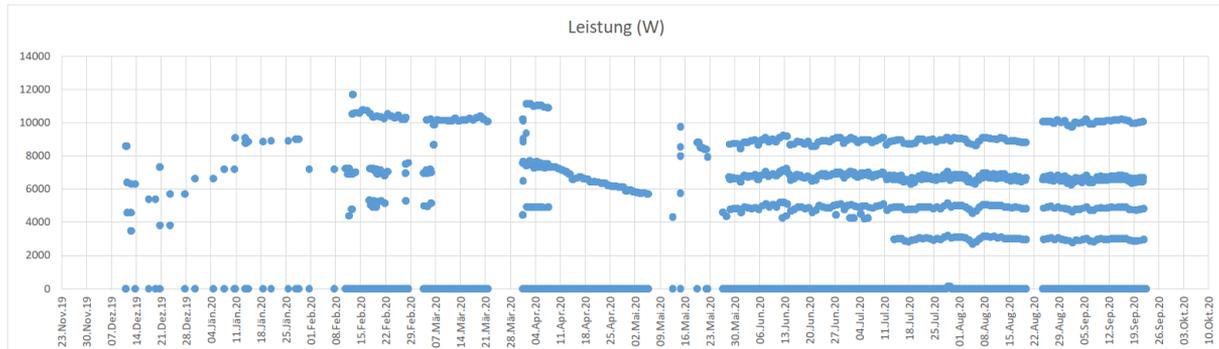


Abbildung 31: Heizleistung

In Abbildung 32 ist ein Zeitraum von 10 Tagen im Juni exemplarisch herausgegriffen, um den Tagesgang der Leistung zu illustrieren.

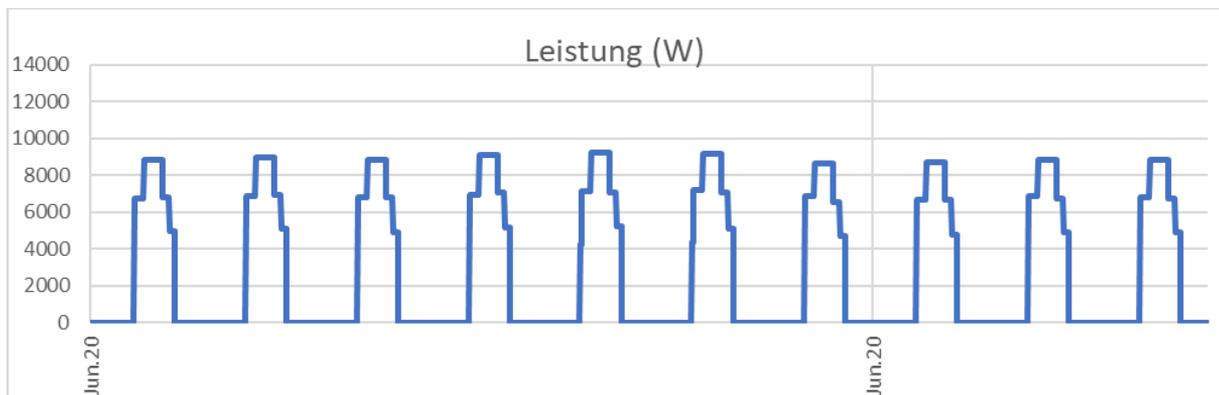


Abbildung 32: Exemplarischer Tagesgang der Leistung Mitte Juni

5.2. Thermal Response Tests

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten die Messdaten aus den TRT- und eTRT-Messungen.

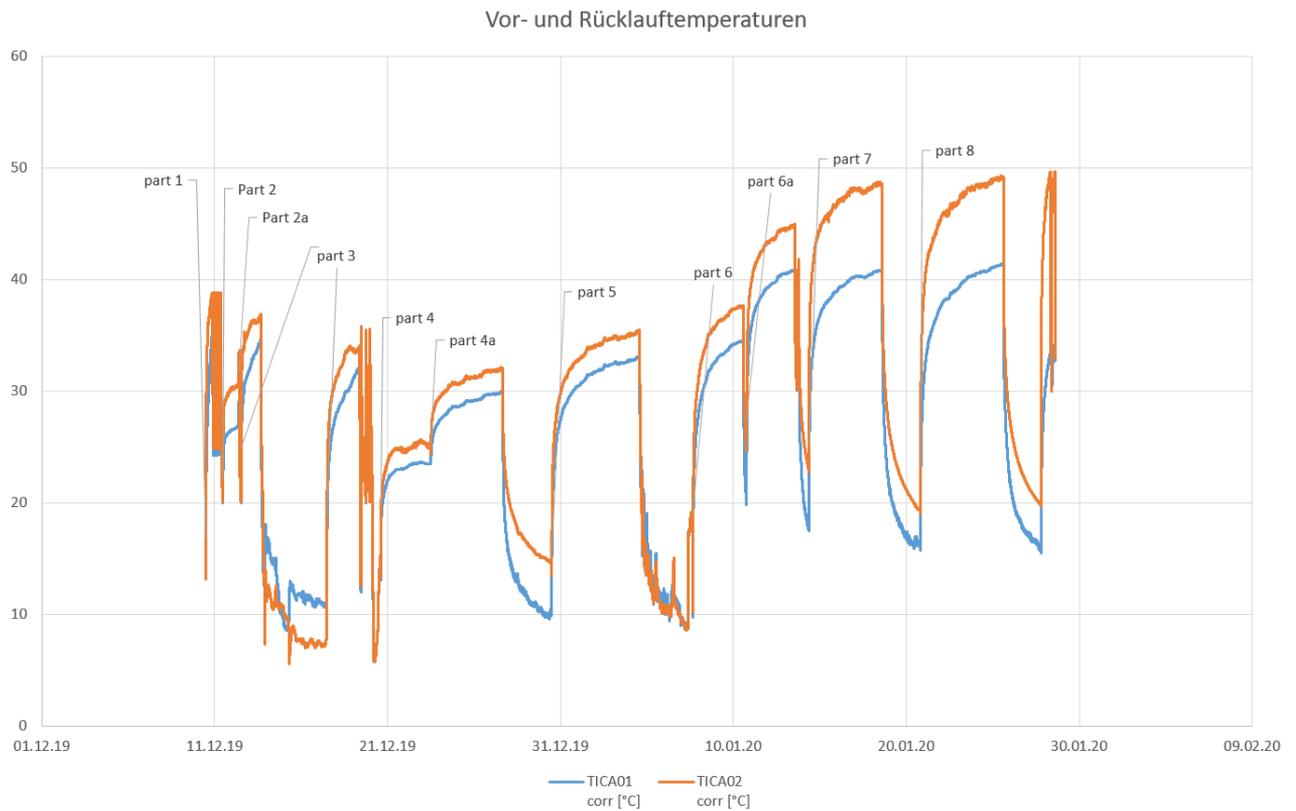


Abbildung 33: Verlauf der Fluidtemperatur des mehrphasigen TRT

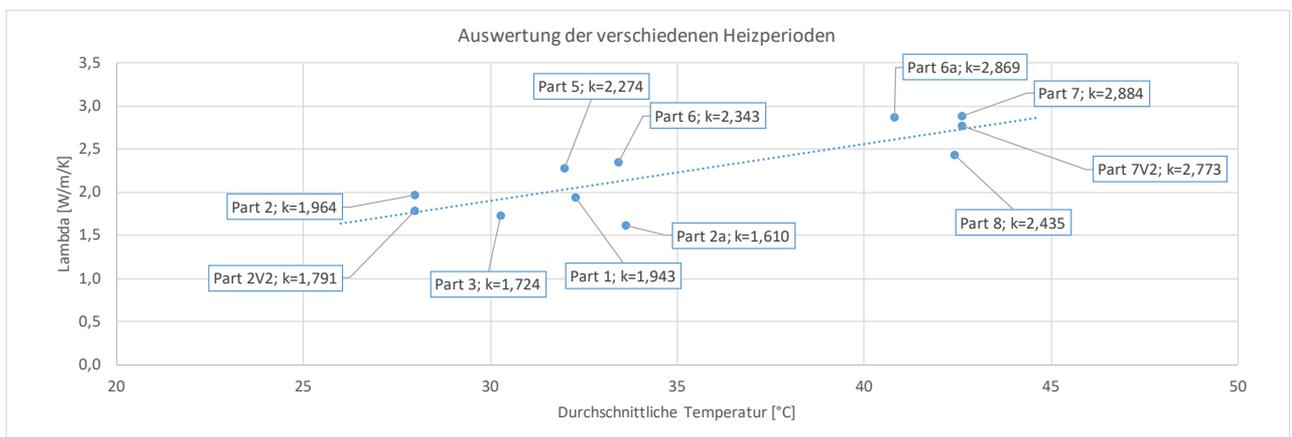


Abbildung 34: Auswertung aller TRT-Phasen. Auf der X-Achse aufgetragen ist die durchschnittliche Fluidtemperatur während der Heizphase. Der Trend ist nicht gänzlich geklärt, zwei mögliche Quellen wurde identifiziert: a) Viskositätseffekte und damit verbunden besserer Wärmeübergang bei höheren Temperaturen oder b) ein Effekt aus der Verwendung der Equivalent Time Methode. Somit gilt „Part 2“ als zuverlässigstes Ergebnis. Dieses Ergebnis passt auch gut zum Ergebnis der Modellkalibrierung (1.9 W/m/K im gewichteten Mittelwert über alle Schichten).

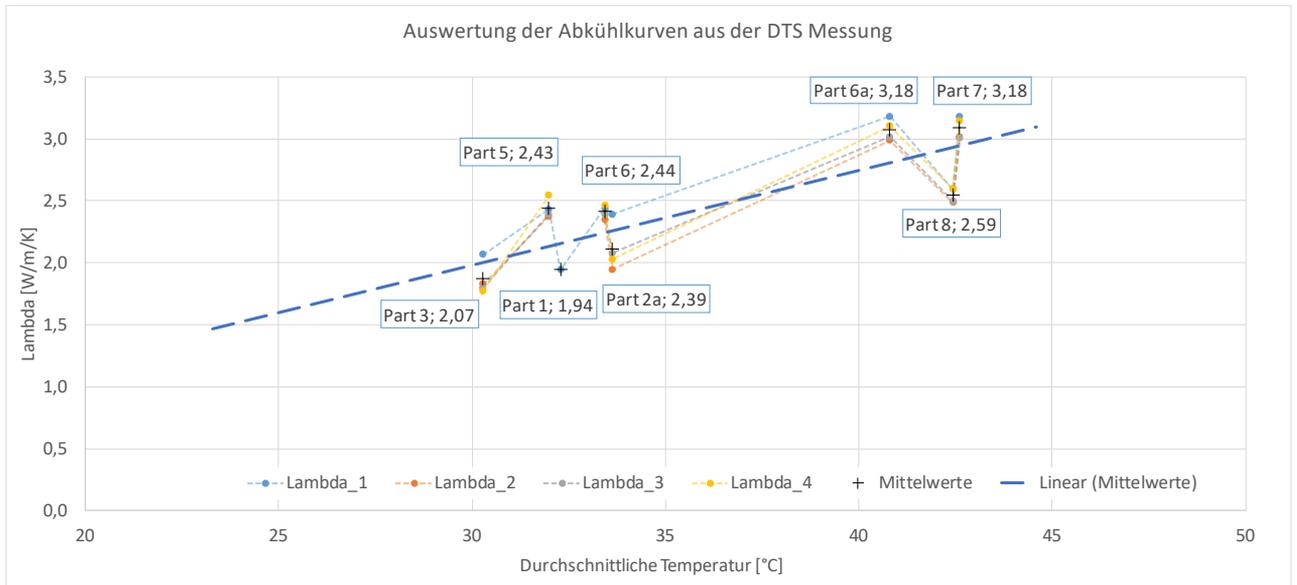


Abbildung 35: Auswertung der Abkühlkurven aus den DTS Messungen. Lambda_1 bis Lambda_4 entspricht unterschiedlichen Tiefenabschnitten. Aufgrund des geologisch relativ homogenen Untergrundaufbaus ist kein deutlicher Trend mit der Tiefe erkennbar.

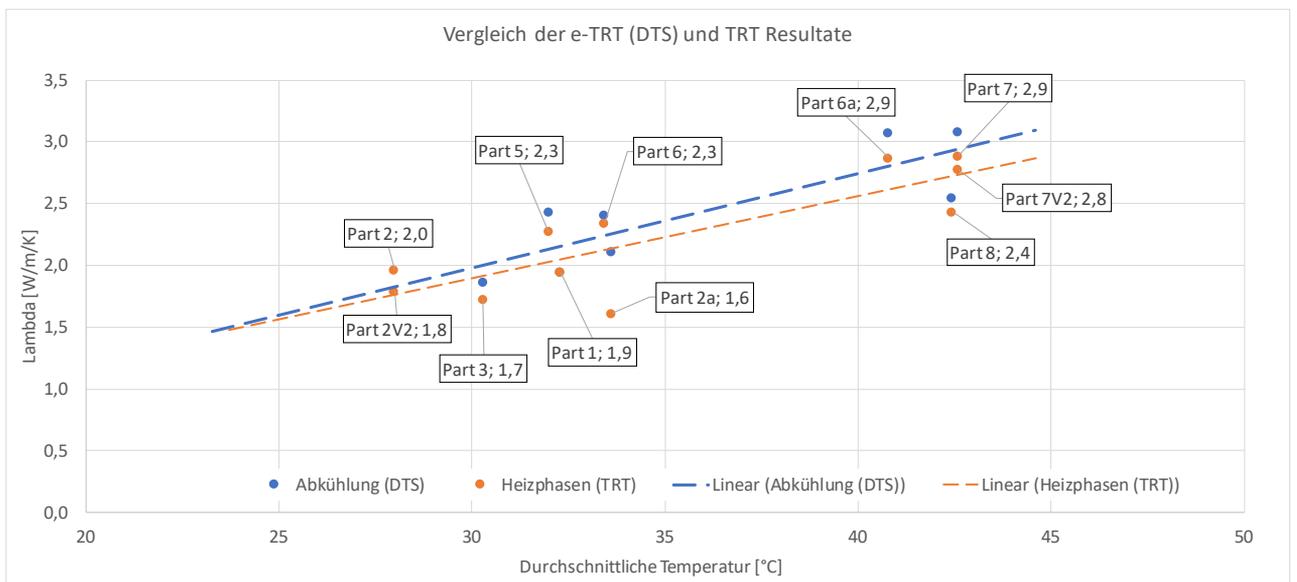


Abbildung 36: Vergleich der e-TRT Resultate mit der Standard-Linienquellenauswertung. Die Ergebnisse sind gut vergleichbar und zeigen denselben Trend.

5.3. Thermophysikalische Bestimmungen am Bohrkernmaterial

5.3.1. Stratigraphie des Bohrkerns

Der Untergrund am Untersuchungsstandort kann grob in fünf Abschnitte eingeteilt werden.

Tabelle 2: Kurzprofil der untersuchten Bohrung

Teufe [m]	Lithologie	Stratigraphie
0 – 2,75	Anschüttung	Anthropozän (Kies, Sand, Schluff mit Ziegelbruchstücken)
2,75 – 11,1	Kies-Sandgemisch	Quartär - Plattelschotter
11,1 – 11,9	Schluff/Sand	Quartär - Interkolluvium
11,9 – 14,7	Kies-Sandgemisch	Quartär - Donauschotter
14,7 – 20,25	Fein- bis Mittelsand	Pannonium
20,25 - 80	Schluff	Pannonium

Aufgrund der ersten optischen Beurteilung ergibt sich für die jeweiligen Abschnitte ein recht monotones Bild der Ablagerungen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch ein differenzierteres Bild der vorliegenden Sedimente. Besonders in der Fossilführung, dem Pyritvorkommen und der magnetischen Suszeptibilität der Tone zeigen sich Schwankungen der Lebensbedingungen im Ablagerungsraum (ABB). Auch die Elementkurven (v.a. Schwefel, Eisen und Kalzium) zeigen eine erhebliche Schwankung über das sedimentologische Profil. Dagegen zeigen die physikalischen Parameter und auch die Gesamtmineralogie und Tonmineralogie für die einzelnen Abschnitte nur geringfügige Änderungen.

5.3.2. Thermophysikalische Untersuchungen mit Handmessgeräten

Insgesamt wurden 35 Kernstücke für die Messung der thermophysikalischen Parameter im Labor entnommen. Bei den Kernstücken handelt es sich ausschließlich um Bereiche der tonigen Lagen. Zusätzlich wurde an 2 Stellen Sand entnommen und in künstlich kompakterter Form gemessen, um einen Eindruck über die Materialeigenschaften zu bekommen.

Die Daten zur Wärmeleitfähigkeit der Tone zeigen keine großen Abweichungen mit der Tiefe oder der unterschiedlichen Messrichtung. Im Durchschnitt liegt die Wärmeleitfähigkeit bei 1,4 W/mK (Standardabweichung 0,08). Die Messungen sind in Abbildung 37 zusammengefasst.

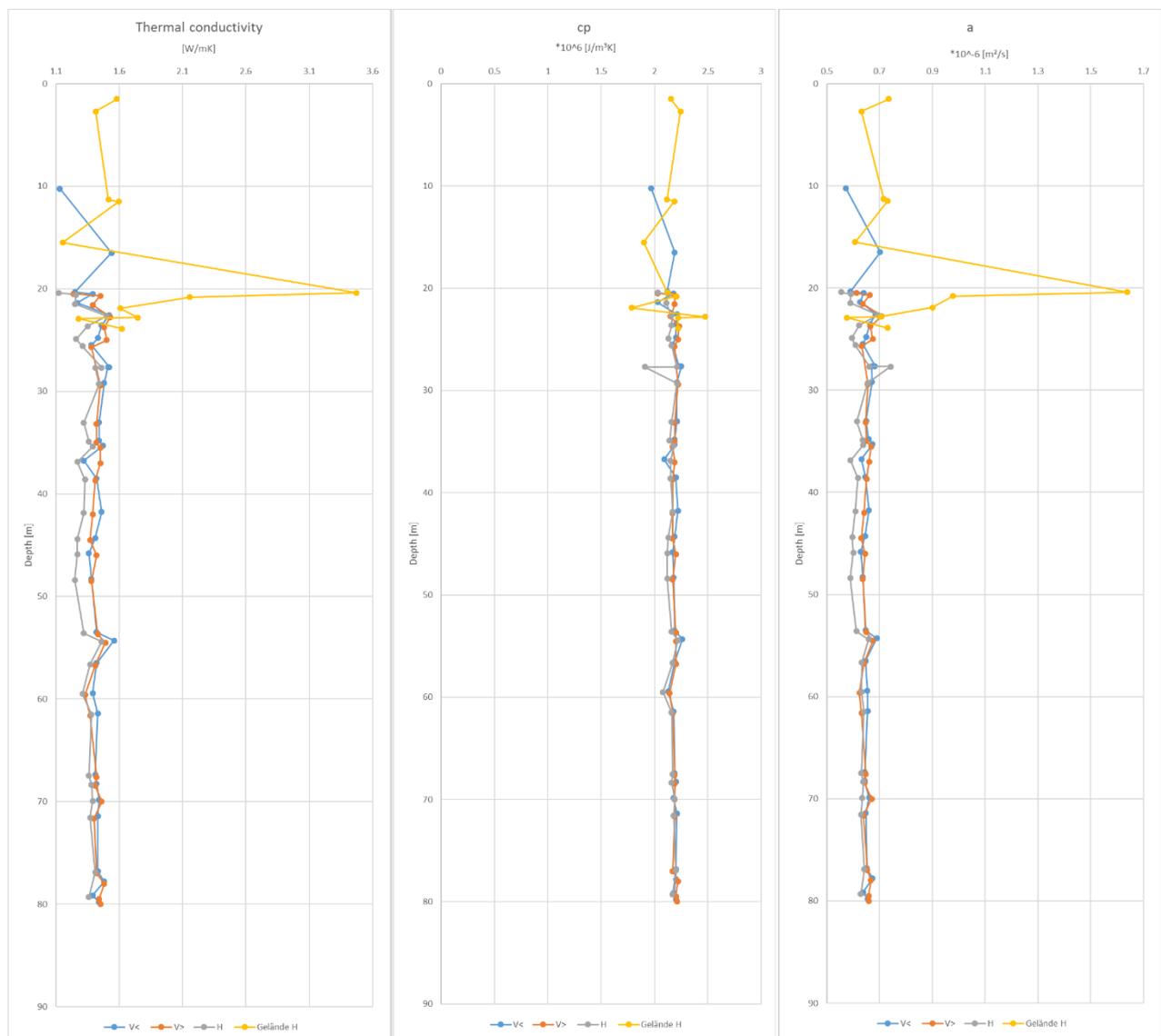


Abbildung 37: Graphische Darstellung der Messung der thermophysikalischen Parameter in 3 Messrichtungen an der GBA. Von links nach rechts: Wärmeleitfähigkeit, volumetrische Wärmekapazität und thermische Diffusivität. Die gelben Datenpunkte zeigen die Messungen direkt nach der Kernentnahme im Freien. Die Daten können aufgrund der Messungenauigkeit durch die Temperaturunterschiede, Außentemperatur und Messtemperatur nicht berücksichtigt werden.

- **Bodenfeuchte und elektrische Leitfähigkeit**

Die Bodenfeuchte und elektrische Leitfähigkeit wurden in Abständen von etwa 0,5 m über die gesamte Profillänge mit dem 5TM Sensor gemessen. Beide Messungen bilden deutlich die unterschiedlichen Lithologien im Bohrprofil ab. Messungen in den Kiesen waren hierzu generell nicht möglich, wenn wurden sandigere Abschnitte getestet. Diese zeigen für beide Parameter die niedrigsten Werte. In dem sandigen Abschnitt steigen die Werte. Die Schluffe zeigen Schwankungen in den Werten, welche mit dem Sand- und Tonanteil in den jeweiligen Abschnitten korrelieren Zur Bodenfeuchte liegen zusätzlich

die Daten aus der Wassergehaltsbestimmung im Labor durch die Rohstoffabteilung der GBA vor. Die Feuchtwerte beider Methoden sind für die ersten Abschnitte des Profils bis 20 m sehr gut vergleichbar. Im Bereich der Tone liegen die Werte der Bodenfeuchte je nach Methode bei durchschnittlich 20,7% (Laborbestimmung) und 29,9 % (direkte Messung am frischen Kern). Die Methoden können gut verglichen werden, auch wenn die Laborwerte tendenziell niedriger als jene der direkten Messung sind, zeigen sie dieselben Trends über das Bohrprofil. Der Feuchteunterschied der beiden Methoden kann durch die längere Lagerung der Proben bei der Laborbestimmung erklärt werden.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Feuchtebestimmungen der Schluffe an der GBA

Feuchtemessung %	Labor	Direkt
Durchschnitt	20.7	29.9
Max	35.1	33.2
Min	15.5	21.3

Gleichzeitig mit der Bodenfeuchte wurde die elektrische Leitfähigkeit bestimmt:

Tabelle 4: Zusammenfassung der Messung der elektrischen Leitfähigkeit mit dem 5TM Sensor an der GBA

Elektrische Leitfähigkeit	[mS/cm]
Durchschnitt Schluff	0.4
Max Schluff	0.6
Min Schluff	0.1

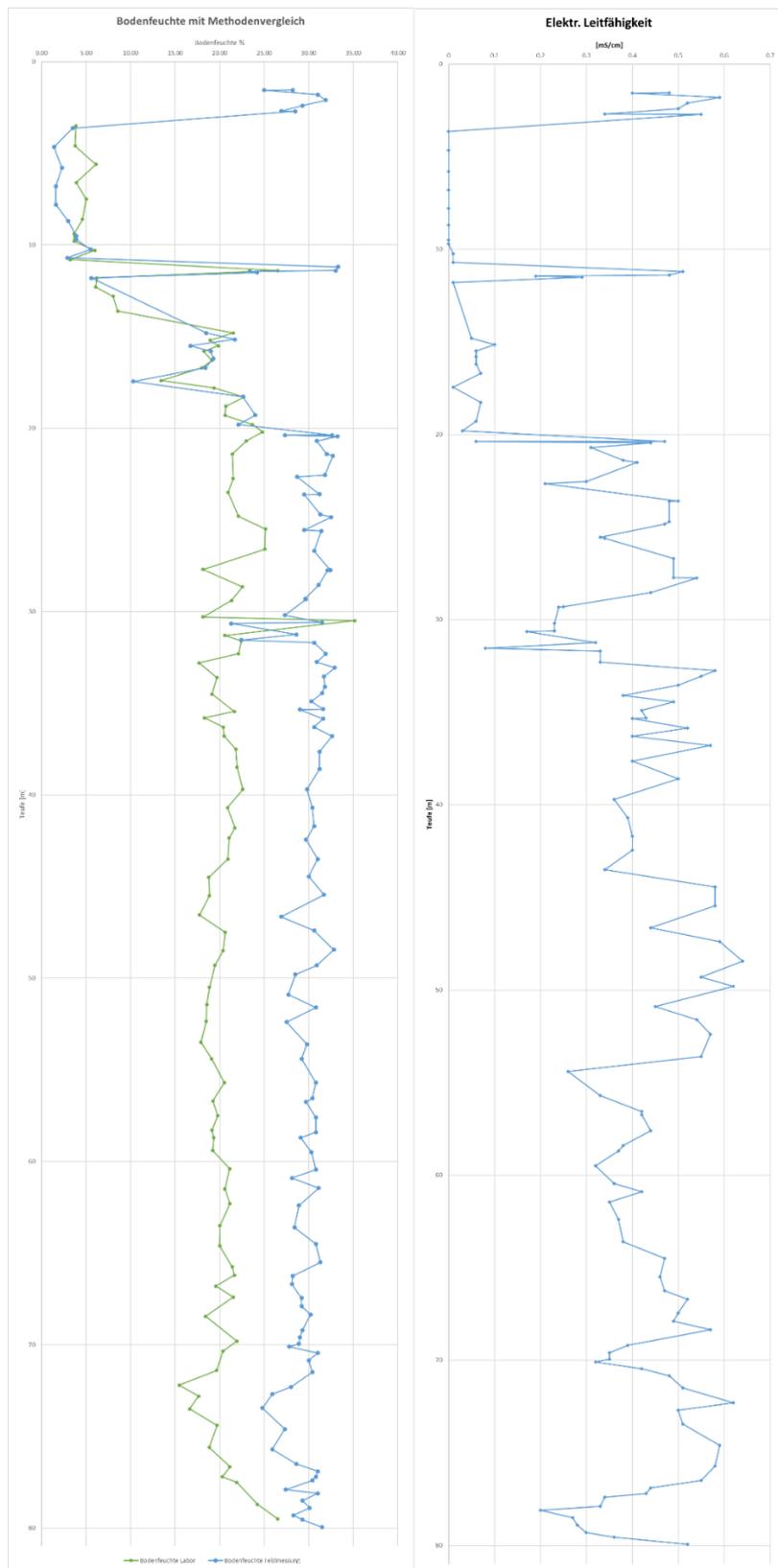


Abbildung 38: Graphische Darstellung der Feuchtebestimmung und der Messung der elektrischen Leitfähigkeit an der GBA.

5.3.3. Wärmeleitfähigkeitsmessungen mittels Heat Flow Meter

Insgesamt konnten acht Proben aus dem Bohrkern für die HFM-Messungen präpariert werden. Folgende Tabelle fasst die Proben mit ihren Dimensions- und Masseigenschaften zusammen:

Tabelle 5: Abmessungen und Masseigenschaften von HFM-Proben aus dem Bohrkern in verschiedenen Teufen

Sample name	Sample	H / mm	m _{pre} / g	Ø / mm	ρ / kg m ⁻³
79,15-79,50 (1)	1	45,519	1811,10	150,00	2251,55
79,15-79,50 (2)	2	56,223	2245,90	158,25	2030,95
79,15-79,50 (3)	3	57,253	2095,20	160,00	1820,12
59,42-59,60 (1)	1	52,819	1795,30	156,75	1761,35
59,42-59,60 (2)	2	49,996	1738,70	158,00	1773,74
41,75-42 (1)	1	51,361	1980,20	158,00	1966,38
41,75-42 (2)	2	46,017	1738,00	156,25	1969,70
20,33 - 20,5 (1)	1	52,651	2045,80	162,50	1873,52

Nach der Vorbereitung und Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der feuchten Proben wurde die anschließende Trocknung im Laborofen durchgeführt. Danach wurden die Abmessungen und die Masse erneut gemessen und die Dichte der trockenen Probe wurde wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt bestimmt.

Tabelle 6: Abmessungen und Masseigenschaften von getrockneten HFM-Proben aus dem Bohrkern in verschiedenen Tiefen

Sample name	Sample	H / mm	m _{pre} / g	Ø / mm	ρ / kg m ⁻³
79,15-79,50 (1), dried	1	45,427	1441,60	158,75	1603,29
79,15-79,50 (2), dried	2	56,043	1782,60	159,50	1591,93
79,15-79,50 (3), dried	3	56,584	1659,50	154,75	1559,30
59,42-59,60 (1), dried	1	52,482	1695,70	155,75	1695,86
59,42-59,60 (2), dried	2	49,970	1647,60	159,00	1660,57
41,75-42 (1), dried	1	50,821	1675,60	154,75	1752,98
41,75-42 (2), dried	2	45,864	1474,10	155,50	1692,41
20,33 - 20,5 (1), dried	1	51,002	1532,00	162,50	1448,35

In Tabelle 7 sind die gemittelten Dichten der feuchten und getrockneten Probe sowie die relative Massenänderung nach dem Trocknungsprozess dargestellt.

Tabelle 7: Gemittelte Dichten vor und nach dem Trocknen; relative Massenänderung

Sample	State	$\rho_{\text{avg}} / \text{kg m}^{-3}$	$m_{\text{dry}} m_{\text{moist}}^{-1} / \%$
79,15 m - 79,50 m	moist	2034	79,39%
79,15 m - 79,50 m	dried	1585	
59,42 m - 59,60 m	moist	1768	94,61%
59,42 m - 59,60 m	dried	1678	
41,75 m - 42,00 m	moist	1968	84,72%
41,75 m - 42,00 m	dried	1723	
20,33 m - 20,50 m	moist	1874	74,89%
20,33 m - 20,50 m	dried	1448	

5.3.4. Effektive Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

In Abbildung 39 ist eine Übersicht der ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit basierend auf HFM-Experimenten und der spezifischen Wärmekapazität basierend auf DSC-Experimenten dargestellt.

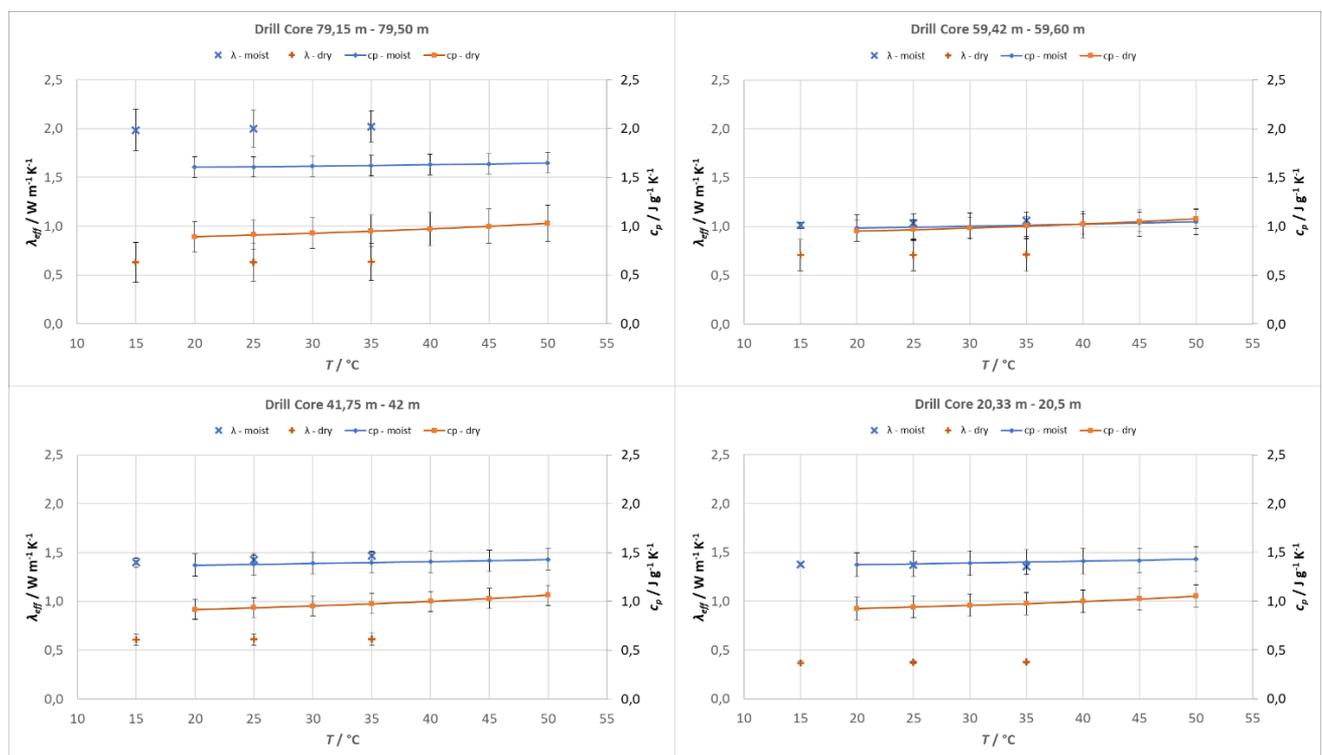


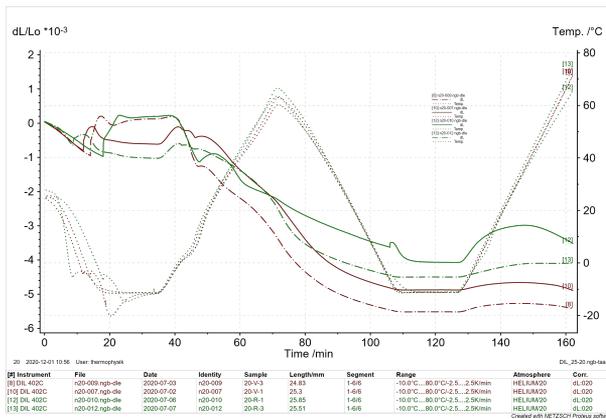
Abbildung 39: Zusammenfassung der Ergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität des Bohrkerns in 4 verschiedenen Tiefen im feuchten und trockenen Zustand

Ein Vergleich der Daten in 79,15 bis 79,5 m Teufe zeigt, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit der feuchten Probe $\lambda_{eff}(25\text{ °C}) = 2\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ beträgt, aber nur $\lambda_{eff}(25\text{ °C}) = 0,632\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ für die trockene Probe. Die λ_{eff} für die trockenen Proben in allen Tiefen variieren zwischen 0,36 und 0,71 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ während für die feuchte Probe diese Werte zwischen 1,01 und 2,02 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ variieren.

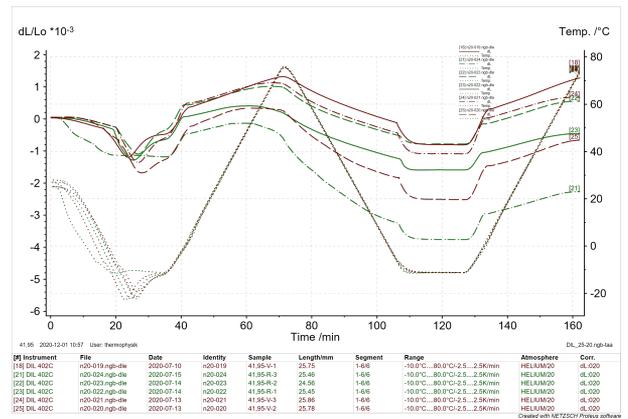
Messungen der spezifischen Wärmekapazität der trockenen Proben in allen Tiefen zeigen einen Wert von $c_p(T) = 0,89\text{ bis }1,08\text{ J g}^{-1}\text{K}^{-1}$ von 20 bis 50 °C. Für die feuchten Proben variieren diese Werte zw. $c_p(T) = 0,98\text{ bis }1,65\text{ J g}^{-1}\text{K}^{-1}$.

5.3.5. Thermische Ausdehnung

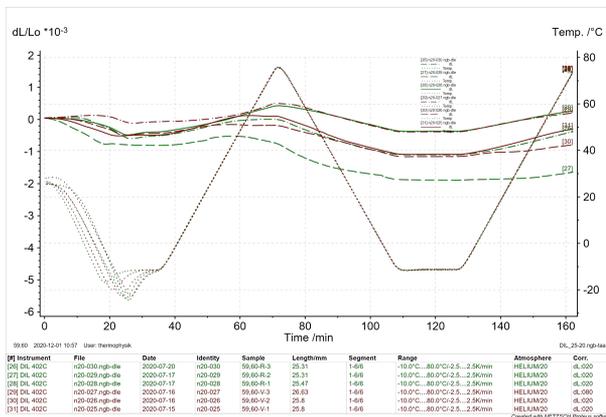
In den folgenden Abbildung 40 sind die Ergebnisse der Wärmeausdehnungsmessung der feuchten Bohrkernproben in 4 verschiedenen Tiefen dargestellt.



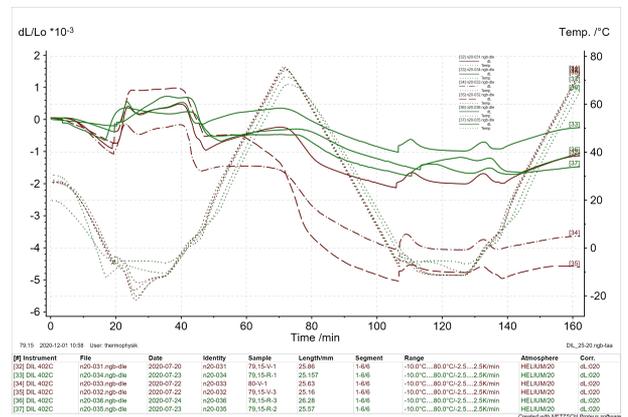
a)



b)



c)



d)

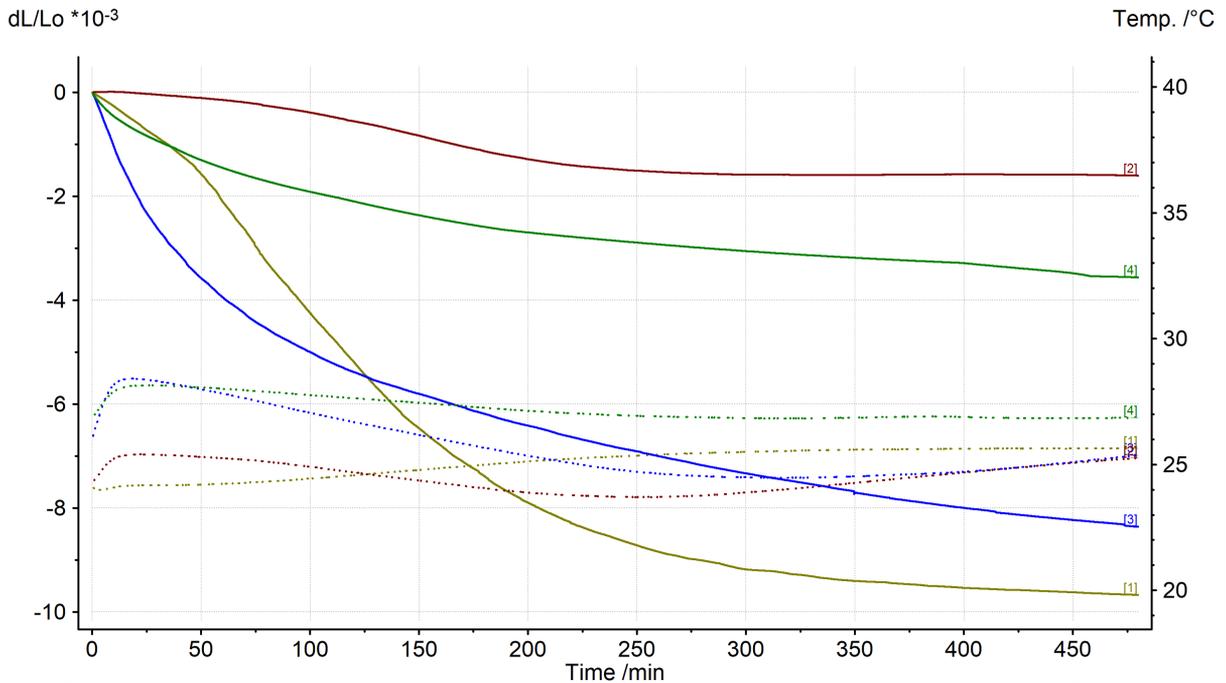
Abbildung 40: Zusammenfassung der Ergebnisse der linearen Wärmeausdehnung der feuchten Bohrkernproben in den Tiefen a) 20 m b) 42 m c) 60 m und d) 79 m

Die relative Längenänderung gegenüber der Ausgangslänge für axiale (rot) und radiale (grün) Proben zeigen keinen signifikanten Unterschied in allen 4 verschiedenen Teufen. Die Proben in 20 m und 79 m zeigen hauptsächlich eine Schrumpfung der gesamten Probenlänge, während die Proben aus 42 m und 60 m Teufe Ausdehnungen im Heizsegment und Schrumpfungen in den Kühlsegmenten des Messverfahrens zeigen.

Aufgrund dieser starken Abweichung des Ergebnisses wurden 4 weitere Proben aus 79 m Tiefe unter den gleichen Bedingungen wie die Dilatometer Messungen zuvor gemessen mit dem Unterschied, dass kein Temperaturprogramm angewendet und nur die relative Längenänderung bei Raumtemperatur aufgezeichnet wird. Die Absicht dieses zusätzlichen Experiments besteht darin, sich auf die Trocknung der Probe und den Einfluss auf die relative Längenänderung ohne zusätzliche Wärmequelle zu konzentrieren.

Tabelle 8: Probenmasse vor und nach dem Dilatometerexperiment bei Raumtemperatur von 4 feuchten Proben aus 79 m Tiefe des Bohrkerns

Sample name	Sample	m_{pre} / g	m_{post} / g	$m_{post} m_{pre}^{-1} / \%$
79,15-79,50 (1)	1	2458,37	2048,65	83,33%
79,15-79,50 (2)	2	2380,94	1963,42	82,46%
79,15-79,50 (3)	3	2315,26	1914,58	82,69%
79,15-79,50 (4)	4	2979,51	2645,10	88,78%



Main 2020-12-01 12:29 User: thermophysik

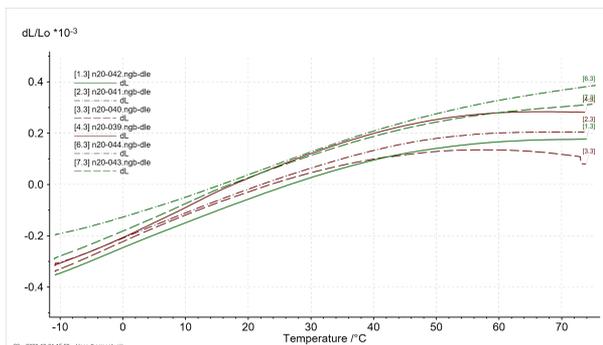
42-20_DIL_Trocknung.ngb-taa

#	Instrument	File	Date	Identity	Sample	Length/mm	Segment	Range	Atmosphere	Corr.
[1]	DIL 402SU	n20-092.ngb-sl9	2020-09-30	n20-092	Bohrkern 79,15-79,5 Teufe (1)	25.5100	1/1	22°C/08:00/22°C	He, 20.0ml/min	dL:0:1:0
[2]	DIL 402SU	n20-093.ngb-sl9	2020-10-01	n20-093	Bohrkern 79,15-79,5 Teufe (2)	23.4230	1/1	22°C/08:00/22°C	He, 20.0ml/min	dL:0:1:0
[3]	DIL 402SU	n20-094.ngb-sl9	2020-10-05	n20-094	Bohrkern 79,15-79,5 Teufe (3)	24.2050	1/1	22°C/08:00/22°C	He, 20.0ml/min	dL:0:1:0
[4]	DIL 402SU	n20-095.ngb-sl9	2020-10-06	n20-095	5247.43	25.4140	1/1	22°C/08:00/22°C	He, 20.0ml/min	dL:16:1:0

Created with NETZSCH Proteus software

Abbildung 41: Relative Längenänderung bei Raumtemperatur von 4 Dilatometerproben aus 79 m Tiefe des Bohrkerns im feuchten Zustand

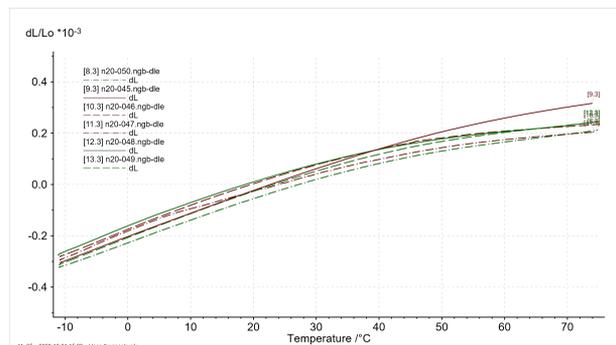
Die Ergebnisse der relativen Längenänderung sowie der Massenänderung bei Raumtemperatur stützen stark die Ansicht, dass inhomogene Feuchtegehalte und unterschiedliche Trocknungskinetiken zu unvergleichlichen Längenänderungsdaten der feuchten Proben führen.



20 2020-12-01 15:20 User: Thermophysik

#	Instrument	File	Date	Identity	Sample	Length/mm	Segment	Range	Atmosphere	Corr.
[1-3]	DIL 402C	n20-042.ngb-die	2020-07-31	n20-042	20-R-1	25.79	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[2-3]	DIL 402C	n20-041.ngb-die	2020-07-31	n20-041	20-V-3	24.89	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[3-3]	DIL 402C	n20-040.ngb-die	2020-07-31	n20-040	20-V-2	24.07	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[4-3]	DIL 402C	n20-039.ngb-die	2020-07-31	n20-039	20-V-1	25.12	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[5-3]	DIL 402C	n20-044.ngb-die	2020-08-03	n20-044	20-R-3	24.98	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[6-3]	DIL 402C	n20-043.ngb-die	2020-08-03	n20-043	20-R-2	24.951	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020

41-35 2020-12-01 15:20 User: Thermophysik

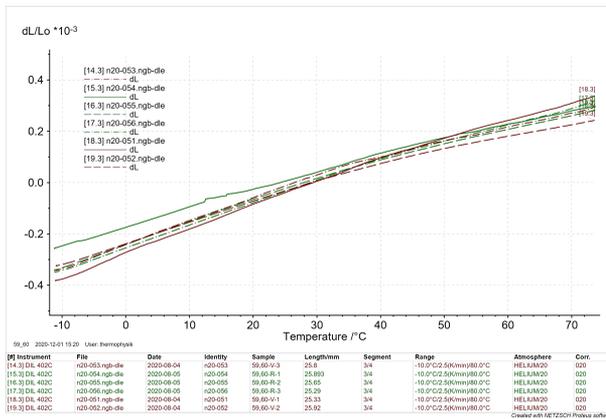


41-35 2020-12-01 15:20 User: Thermophysik

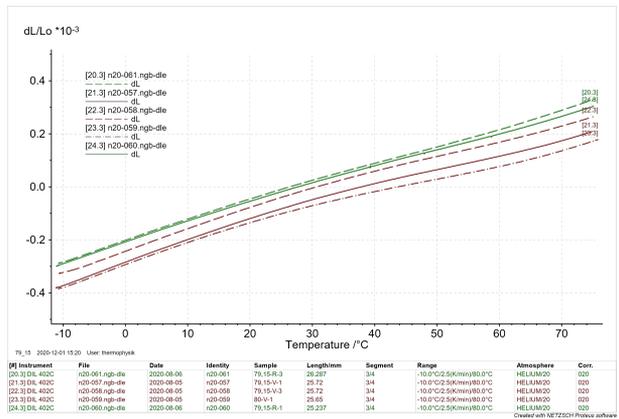
#	Instrument	File	Date	Identity	Sample	Length/mm	Segment	Range	Atmosphere	Corr.
[9-3]	DIL 402C	n20-050.ngb-die	2020-08-04	n20-050	41-95-R-3	25.37	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[8-3]	DIL 402C	n20-045.ngb-die	2020-08-03	n20-045	41-95-V-1	25.55	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[10-3]	DIL 402C	n20-046.ngb-die	2020-08-03	n20-046	41-95-V-2	25.85	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[11-3]	DIL 402C	n20-047.ngb-die	2020-08-03	n20-047	41-95-V-3	25.79	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[12-3]	DIL 402C	n20-048.ngb-die	2020-08-04	n20-048	41-95-R-1	25.464	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020
[13-3]	DIL 402C	n20-049.ngb-die	2020-08-04	n20-049	41-95-R-2	25.45	3/4	-10.0°C/2.50kmm/80.0°C	HELIUM20	020

a)

b)



c)



d)

Abbildung 42: Zusammenfassung der Ergebnisse der linearen Wärmeausdehnung der Trockenbohrkernproben in den Tiefen a) 20 m b) 42 m c) 60 m und d) 79 m

In Abbildung 40 ist die thermische Ausdehnung als relative Längenänderung gegenüber der Proben temperatur dargestellt. Die relative Längenänderung der trockenen Proben unterscheidet sich signifikant von den Ergebnissen der feuchten Proben. Abbildung 40 zeigt eine thermische Ausdehnung im Bereich von $\Delta L L_0^{-1} \approx 0,8$ in einem Bereich von $T_{min} = -10 \text{ °C}$ bis $T_{max} = 80 \text{ °C}$. Die feuchten Proben unterscheiden sich erheblich mit $\Delta L L_0^{-1} \approx 2$ bis 6.

5.3.6. Diskussion

Diese Arbeit hat gezeigt, wie thermophysikalische Messmethoden zur Analyse der thermischen Eigenschaften von Untergrundmaterial angewendet werden können. Unsere Ergebnisse unterstützen die Ansicht, dass der tatsächliche Feuchtigkeitsgehalt einer Untergrundprobe einen starken Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmekapazität hat. Wärmeausdehnungsmessungen haben den Einfluss des Trocknungsprozesses auf die Schrumpfung der Bohrkernproben und die geringe Wärmeausdehnung des trockenen Untergrundes selbst gezeigt.

Zusätzliche Forschung wäre notwendig, um den Einfluss des tatsächlichen Feuchtigkeitsgehalts in den verschiedenen Tiefen des Untergrunds auf die thermischen Eigenschaften und den geothermischen Bohrlochwärmetauscher vollständig zu verstehen. Schließlich müssen eine verbesserte Methode der Probenpräparation sowie Messverfahren entwickelt werden, um den Feuchtigkeitsgehalt der Proben während des gesamten thermophysikalischen Charakterisierungsverfahrens aufrechtzuerhalten.

5.4. Kennfelderstellung Wärmepumpe und Szenarienmodellierung

Mit Hilfe der im Kapitel 4.9 beschriebenen Methodik wurde der Einfluss der Untergrundregeneration auf die Jahresarbeitszahl der WP bei FBH und Radiatoren quantifiziert, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Einfluss der Untergrundregeneration auf die Jahresarbeitszahl der WP

Untergrundregeneration	JAZ	
	FBH	Radiatoren
Ohne	4,58	3,94
Sanft (Wärmeeintrag = Entzug)	6,25	5,02
Voll (Wärmeeintrag = Entzug +20%)	6,59	5,22

Sowohl bei FBH als auch bei Radiatoren ist der Sprung von ohne zur sanften Regeneration signifikant. In beiden Fällen liegt die Steigerung der JAZ im Bereich von 30%. Bei voller Regeneration sind es bis zu 40% bezogen auf ohne Regeneration. Diese Steigerung ist auf die erhöhte Soletemperatur zurückzuführen. Ohne Regeneration liegt sie im Bereich von 0 bis 15°C im Heizbetrieb. Bei sanfter Regeneration sind es 8 bis 16°C und bei voller Regeneration sogar 10 bis 18°C. Die höchsten Werte werden unmittelbar zu Beginn der Heizperiode erreicht, nachdem das Erdreich mit der Überschusswärme regeneriert worden ist, siehe Abbildung 43.

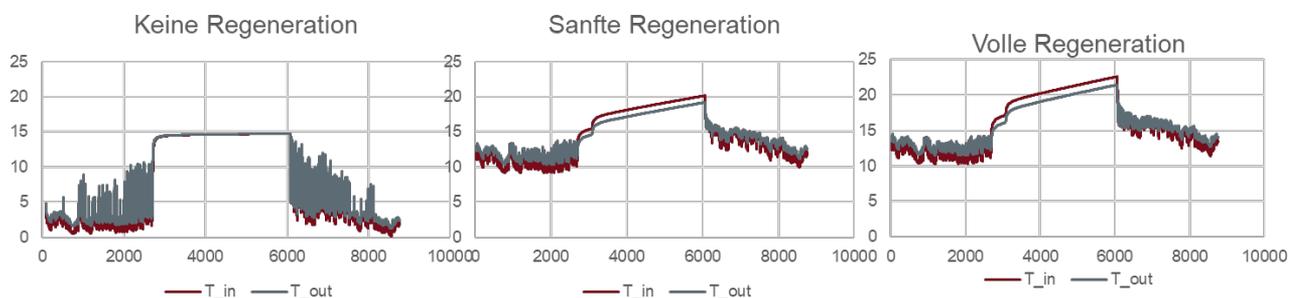


Abbildung 43: Ein- und Austrittstemperaturen der Wärmequelle bei unterschiedlichen Regenerationsszenarien

Abbildung 44 bis Abbildung 49 zeigen die Jahresverläufe der Außentemperatur, der Vorlauf VL und Rücklauf RL – Temperaturen des Heizsystems und der Quelle, sowie des resultierenden COPs der betrachteten Fälle.

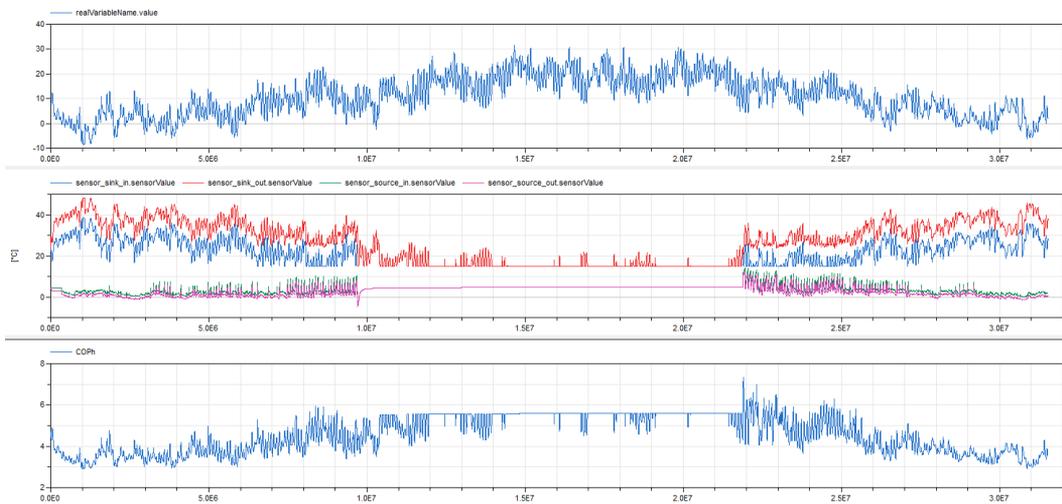


Abbildung 44: Radiatoren, ohne Regeneration. Außentemperatur (oben), VL/RL Heizung und VL/RL Quelle (Mitte) und COP (unten)

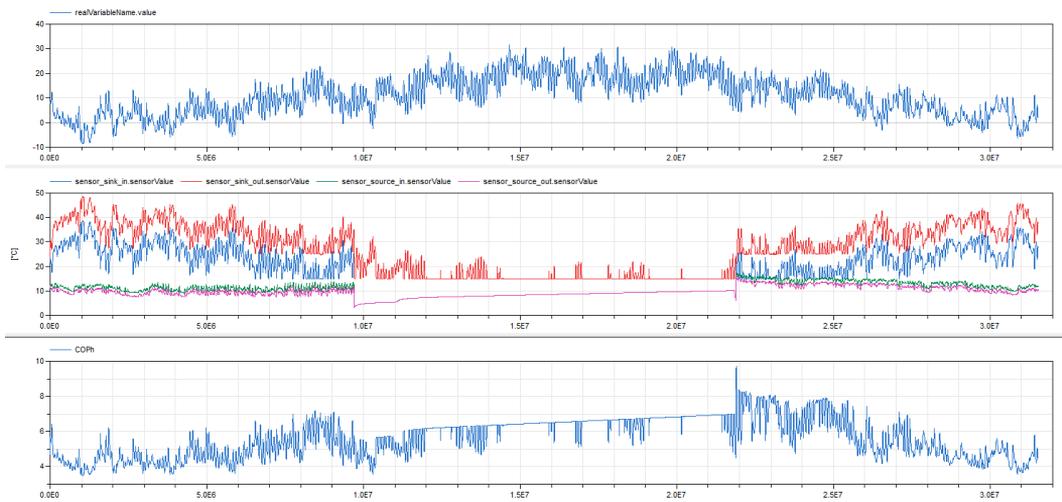


Abbildung 45: Radiatoren, sanfte Regeneration. Außentemperatur (oben), VL/RL Heizung und VL/RL Quelle (Mitte) und COP (unten)

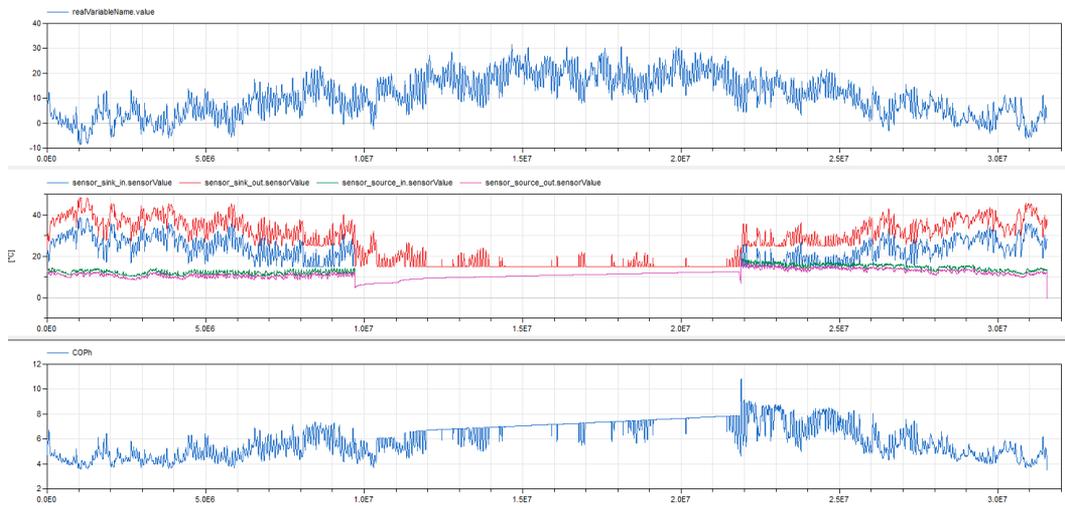


Abbildung 46: Radiatoren, volle Regeneration. Außentemperatur (oben), VL/RL Heizung und VL/RL Quelle (Mitte) und COP (unten)

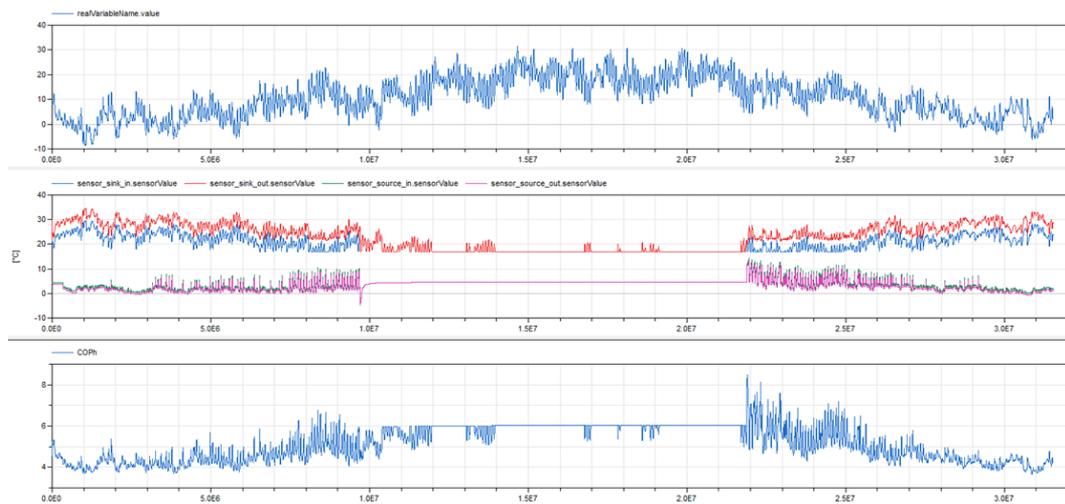


Abbildung 47: FBH, ohne Regeneration. Außentemperatur (oben), VL/RL Heizung und VL/RL Quelle (Mitte) und COP (unten)

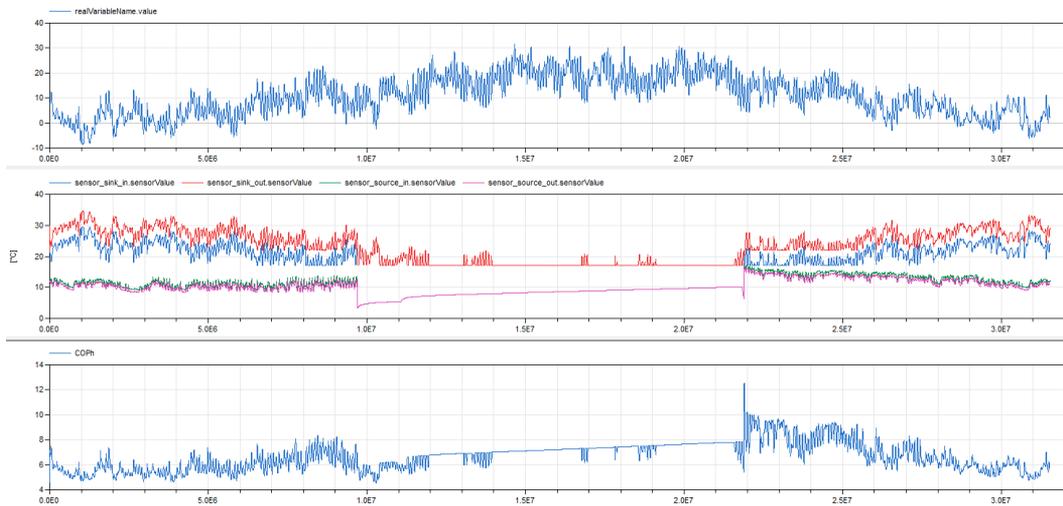


Abbildung 48: FBH, sanfte Regeneration. Außentemperatur (oben), VL/RL Heizung und VL/RL Quelle (Mitte) und COP (unten)

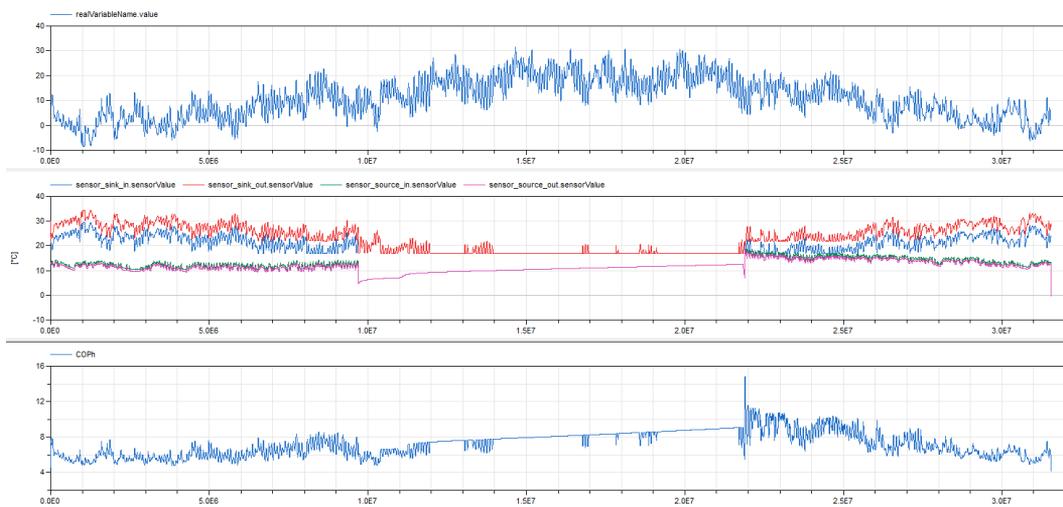


Abbildung 49: FBH, volle Regeneration. Außentemperatur (oben), VL/RL Heizung und VL/RL Quelle (Mitte) und COP (unten)

Um die laterale Beeinflussung des Untergrunds darzustellen, wurden in dem Sondenfeldmodell auf neuralgischen Punkten Beobachtungspunkte gesetzt (siehe gelbe Punkt in Abbildung 24 A). Die Temperaturverläufe an diesen Punkten im 10. Betriebsjahr sind in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die thermische Beeinflussung selbst bei deutlicher „Überladung“ des Speichers räumlich auf wenige Meter um das Sondenfeld begrenzt ist (vergleiche dazu auch Abbildung 24 B-D). Die Wärmeströme, die bei Be- und Entladung des Sondenfeldspeichers auftreten, können in einzelne Bilanzkomponenten aufgeteilt werden (Tabelle 10).

Tabelle 10: Aufstellung der Wärmeströme bei Be- und Entladung des Erdsondenspeichers.

Bilanzgröße	Gesamtes Modellgebiet	Direkte Umgebung Sondenfeld	Differenz	Kommentar
Einspeisung	1290 MWh	1290 MWh	0	Entspricht der Vorgabe
Entnahme durch Nutzung	-858 MWh	-858 MWh	0	Entspricht der Vorgabe
Wärmeverlust an der Oberfläche	-65 MWh	-51 MWh	14 MWh	Oberflächenverlust in der Umgebung
Wärmespeicherung im Untergrund	367 MWh	250 MWh	117 MWh	250 MWh führen zur Temperaturerhöhung im Sondenfeld direkt 117 MWh „verlassen“ das Sondenfeld

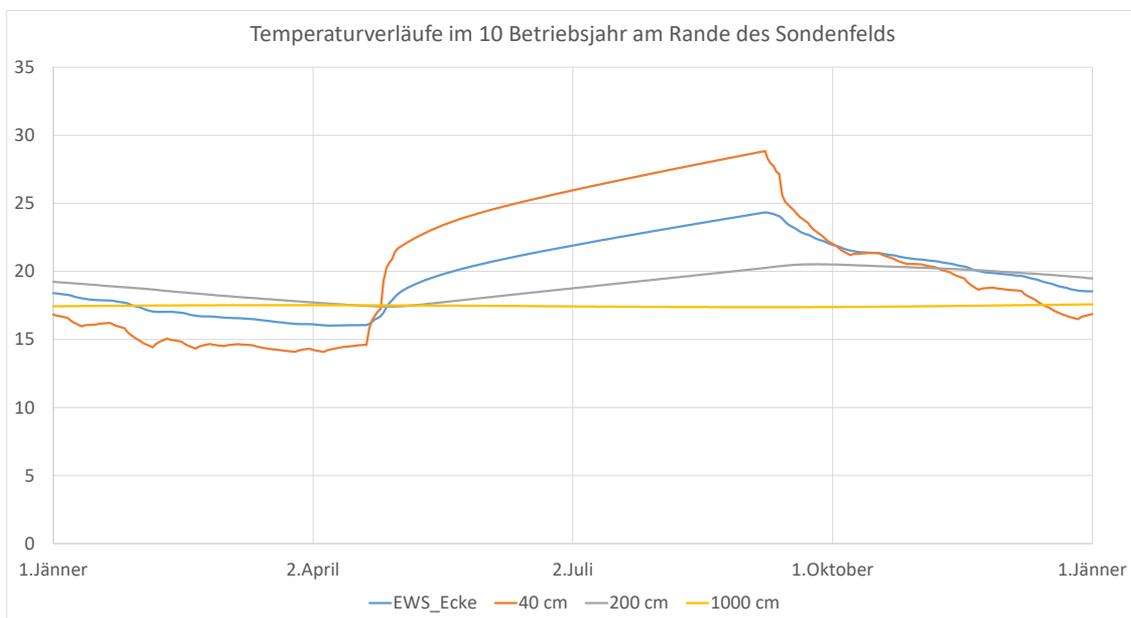


Abbildung 50: Temperaturverläufe am Rand des Speicherfelds bei voll geladenem Speicher (im 10. Betriebsjahr). Bereits 2 m neben dem Sondenfeld sind die Umweltauswirkungen unter 20 °C, 10 m neben der äußersten Sonde ca. 17 °C. Anfangstemperatur ist mit 15 °C angenommen.

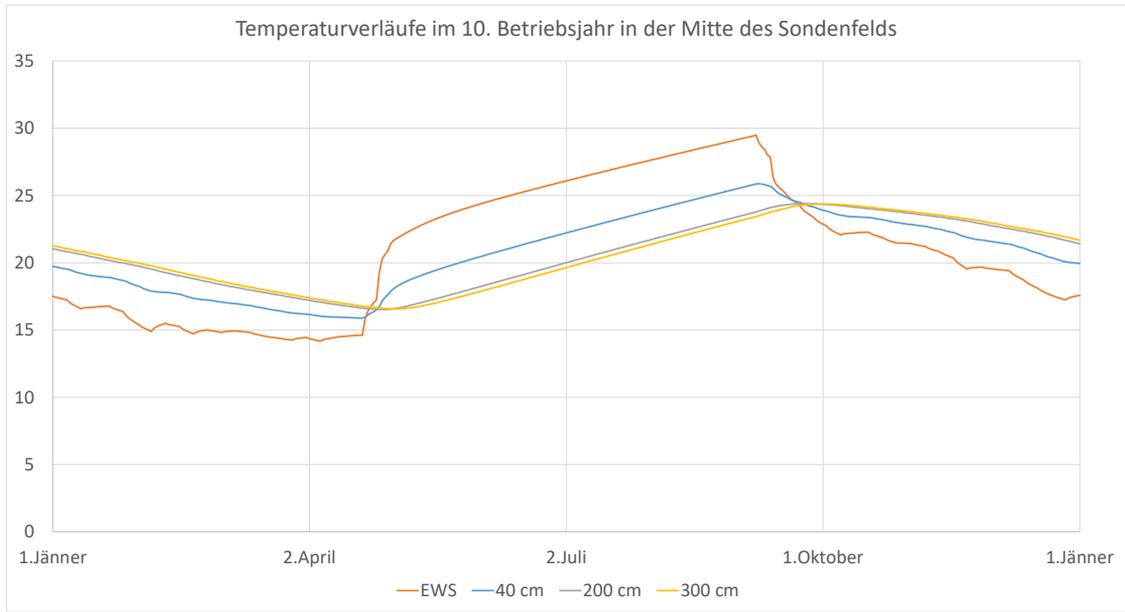


Abbildung 51: Temperaturverläufe in der Mitte des Speicherfelds bei vollgeladenem Speicher (im 10. Betriebsjahr). Die Sonde direkt („EWS“) erreicht im Sommer eine Spitzentemperatur von unter 30 °C, der Mittelpunkt zwischen 4 Sonden erreicht knapp unter 25 °C.

6 Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Gewinnung von solarer Überschusswärme in Städten kann wesentlich zur Vermeidung bzw. Verringerung des ‚Urban Heat Island‘-Effekts beitragen.
- Gleichzeitig führt das Konzept zu einer Effizienzsteigerung im Heizbetrieb und leistet somit einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Raumwärme.
- Die höhere Einspeisetemperatur (bis zu 40 °C statt der üblichen maximal 30) führen zu einer deutlichen Erhöhung der Übertragungsleistung der Sonde, aber nicht zu exzessiver Erwärmung des Untergrunds.
- Der laterale Einflussradius ist bei geeigneter Geologie räumlich sehr begrenzt,
- Die entsprechende „geeignete Geologie“ ist ein Ton-Schluff-dominiertes System wie es zum Beispiel für das Wiener Stadtgebiet südlich der Donau typisch ist.
- Saisonale Wärmespeicherung in Erdsondenfeldern und generell im Untergrund ist gerade für dicht verbaute Städte interessant, da es eine platzsparende und unsichtbare Technologie ist.
- Eine genaue Kenntnis des Untergrunds (Aufbau, Grundwasser, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) ist wesentlich für eine korrekte Planung und einen effizienten Betrieb eines Erdsondenspeichers
- Gewinnung von solarer Überschusswärme ist für (denkmalgeschützte) Bestandsgebäude auch für die Nachrüstung interessant
- Die gefundenen Erkenntnisse gelten nicht nur für die Kombination Asphaltkollektor - Erdwärmesonde, sondern gelten für alle saisonalen Wärmequellen (auch für klassische Solarthermiekollektoren).
- Dimensionierung, Betrieb und Regelung der Anlage:
 - Durch die Beladung des Speichers steigt auf der einen Seite die JAZ der Wärmepumpe, dadurch sinkt der Stromverbrauch und die Wärmeentnahme steigt um etwa 20 %.
 - Auf der anderen Seite führt der Anstieg der Speichertemperatur zu einer verringerten Temperaturdifferenz zur Wärmequelle Asphaltkollektor: Folglich sinkt über die Jahre der Wärmeeintrag.
 - Zu Beginn muss der Wärmeeintrag deutlich größer sein als der Entzug, ist der Speicher vollgeladen entsteht ein selbstregulierendes System.
 - Bei entsprechender Dimensionierung ist daher keine aufwändige Regelungstechnik benötigt.

Die im Rahmen dieses Sondierungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse sollen in weitere Forschungsvorhaben einfließen und mittelfristig zur Durchführung eines Demonstrationsprojekts genutzt werden. Da es sich im derzeitigen Stadium um eine Sondierung handelte, wurden die erzielten Erkenntnisse vor allem in mehreren Publikationen und auf Veranstaltungen für das wissenschaftliche Forschungsumfeld präsentiert.

Weiters wurden bereits während der Projektdurchführungsphase Stakeholder eingebunden, für die die Nutzung dieser neuartigen Technologie in ihrem Arbeitsumfeld von großem ökologischen wie auch ökonomischen Vorteil sein kann. Da zudem auch mehrere Bauträger bereits Interesse an der Anwendung angemeldet haben und eine Erprobung und Umsetzung in ihren Vorhaben in ernsthafte Erwägung ziehen, sieht das Konsortium ein erhebliches Marktpotenzial.

Folgende Zielgruppen können somit als relevant angesehen werden:

- Bauträger
- Gebäudebetreiber
- Kommunen
- Industrie- und Infrastrukturbetriebe mit großen Nutzungsflächen

7 Ausblick und Empfehlungen

Weiterer Forschungsbedarf:

Am Ende des Projekts konnten aus den Ergebnissen folgende offene Forschungsfragen definiert werden:

- **Einbindung der Temperaturabhängigkeit des COP der Wärmepumpe in die Untergrundmodellierung:** Die Temperaturabhängigkeit des COP kann bei klassischen Erdwärmeanwendungen ignoriert werden. Bei den hier untersuchten Szenarien mit Wärmespeicherung und deutlich erhöhten Untergrundtemperaturen ist der damit zeitlich veränderliche COP bei Untergrundmodellierungen jedoch unbedingt zu berücksichtigen. In die im Rahmen von Heat Harvest durchgeführten Modellierungen wurde diese Abhängigkeit durch Iteration zwischen Wärmepumpen- und Untergrundsimulation implementiert. Für die Anwendung in der Praxis ist diese Vorgehensweise aber nur bedingt geeignet. Die Entwicklung eines FEFLOW Plug-ins das eine dynamische Anpassung des COP an die Rücklauftemperatur der Erdwärmesonde durchführt, wäre wünschenswert. FEFLOW bietet eine offene Schnittstelle für die Entwicklung von eigenen Plug-ins, allerdings war der Bedarf eines solchen bei der Einreichung von Heat Harvest noch nicht evident.
- **Freie Kühlung:** Eine Erkenntnis aus dem Projekt Heat Harvest und dem parallel laufenden Projekt SANBA: Durch den Wärmeeintrag im Sommer und die damit einhergehende sukzessive Erhöhung der Untergrundtemperatur wird die Möglichkeit genommen, das Sondenfeld in den Sommermonaten für die freie Kühlung einzusetzen. Daher muss im Sommer mit reversibler Wärmepumpe gearbeitet werden, deren Effizienz mit steigender Untergrundtemperatur abnimmt. Es wird ein Konzept zweier Sondenfelder verfolgt, wobei die beiden Felder auf unterschiedlichen Temperaturniveaus betrieben werden. Es besteht noch Forschungsbedarf zur Dimensionierung und Wirtschaftlichkeit dieses Ansatzes.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Beispiele für Asphaltkollektoren (Road Energy Systems®, 2007)	13
Abbildung 2: Repräsentativer Tagesgang der Fahrbahntemperatur im Raum Wien.....	19
Abbildung 3: Vision des Heat-Harvest-Ansatzes.....	20
Abbildung 4: Lage der Testerdwärmesonde im Garten der GBA (P2).....	21
Abbildung 5: Kick-Off-Meeting am 12.07.2019 mit dem Konsortium und Vertretern der Stadt Wien.	25
Abbildung 6: Repräsentativer Tagesgang der Fahrbahntemperatur für einen Sommertag im Raum Wien	26
Abbildung 7: Planungsschema (oben) und 3D-Visualisierung der Versuchsanlage (unten)	28
Abbildung 8: Fertiggestellte Anlage	28
Abbildung 9: Tagesgang der Heizleistung, um möglichst den Tagesgang der Oberflächentemperaturen einer Straße nachzubilden.....	29
Abbildung 10: Schematischer Schnitt durch eine Doppel-U Erdwärmesonde.....	30
Abbildung 11: Oben: Isomet 2104 bei Messung im Gelände und verwendete Nadelsonden. Unten: Feuchtemessung im Gelände und verwendetes Messinstrument mit Sensor	34
Abbildung 12: Bodenfeuchte-Messung an den Bohrkernen.....	35
Abbildung 13: Skizze eines HFM mit symmetrischer Anordnung und einer Platte	36
Abbildung 14: a) Bohrkern, b) präparierte zylindrische Probe, c) Probe in Polyethylenfolie und d) Probenaufbau im HFM mit Thermoelementen.....	37
Abbildung 15: Trocknung der Bohrkernproben bei 105 °C in einem Laborofen.....	38
Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Wärmestrom-DSC	39
Abbildung 17: links: Tiegel und Deckel aus Aluminium; rechts: Tiegel gefüllt mit Bohrkernprobe	40
Abbildung 18: Skizze des Dilatometer-Funktionsprinzips	41
Abbildung 19: a) Vorbereitung der Bohrkernprobe b) Vorbereitung der Probe für die Quaderdilatometrie c) Bohrkernprobe im Probenhalter des Dilatometers.....	42
Abbildung 20: links: Wärmeleitfähigkeitsprofil als Ergebnis der Modellkalibrierung. Rechts: Interpretation der Bohrkernaufnahme von Matthias Harzhauser.....	44
Abbildung 21: Vertikal- und Horizontalschnitte durch das numerische Erdwärmesondenmodell	45
Abbildung 22: Vergleich der modellierten und gemessenen Fluidtemperaturen.	46
Abbildung 23: Zusammenstellung der gemessenen und durch das FEFLOW-Modell errechneten Temperaturverläufe.	46
Abbildung 24: Schnitt durch das Sondenfeldmodell.....	48
Abbildung 25: Wärmepumpenkonfiguration mit einstufiger Verdichtung.....	49
Abbildung 26: Jahresverlauf des Wärmebedarfs und der Umgebungstemperatur für das Testgebäude.	50

Abbildung 27: Vorlauftemperaturen für Radiatoren und FBH (Ruhnau et al., 2019)	51
Abbildung 28: Durchfluss	52
Abbildung 29: Vor- und Rücklauftemperatur.....	52
Abbildung 30: Temperaturdifferenz.....	52
Abbildung 31: Heizleistung.....	53
Abbildung 32: Exemplarischer Tagesgang der Leistung Mitte Juni.....	53
Abbildung 33: Verlauf der Fluidtemperatur des mehrphasigen TRT	54
Abbildung 34: Auswertung aller TRT-Phasen	54
Abbildung 35: Auswertung der Abkühlkurven aus den DTS Messungen.....	55
Abbildung 36: Vergleich der e-TRT Resultate mit der Standard-Linienquellenauswertung.	55
Abbildung 37: Graphische Darstellung der Messung der thermophysikalischen Parameter.	57
Abbildung 38: Graphische Darstellung der Feuchtebestimmung und der Messung der elektrischen Leitfähigkeit an der GBA.....	59
Abbildung 39: Zusammenfassung der Ergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität des Bohrkerns	61
Abbildung 40: Zusammenfassung der Ergebnisse der linearen Wärmeausdehnung	62
Abbildung 41: Relative Längenänderung bei Raumtemperatur.....	64
Abbildung 42: Zusammenfassung der Ergebnisse der linearen Wärmeausdehnung	65
Abbildung 43: Ein- und Austrittstemperaturen der Wärmequelle bei unterschiedlichen Regenerationsszenarien	66
Abbildung 44: Radiatoren, ohne Regeneration.....	67
Abbildung 45: Radiatoren, sanfte Regeneration	67
Abbildung 46: Radiatoren, volle Regeneration	68
Abbildung 47: FBH, ohne Regeneration	68
Abbildung 48: FBH, sanfte Regeneration	69
Abbildung 49: FBH, volle Regeneration)	69
Abbildung 50: Temperaturverläufe am Rand des Speicherfelds bei voll geladenem Speicher	70
Abbildung 51: Temperaturverläufe in der Mitte des Speicherfelds bei vollgeladenem Speicher	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationsparameter für die Wärmepumpe.	49
Tabelle 2: Kurzprofil der untersuchten Bohrung.....	56
Tabelle 3: Zusammenfassung der Feuchtebestimmungen der Schluffe an der GBA.....	58
Tabelle 4: Zusammenfassung der Messung der elektrischen Leitfähigkeit mit dem 5TM Sensor an der GBA.....	58
Tabelle 5: Abmessungen und Masseigenschaften von HFM-Proben aus dem Bohrkern in verschiedenen Teufen	60
Tabelle 6: Abmessungen und Masseigenschaften von getrockneten HFM-Proben aus dem Bohrkern in verschiedenen Tiefen	60

Tabelle 7: Gemittelte Dichten vor und nach dem Trocknen; relative Massenänderung.....	61
Tabelle 8: Probenmasse vor und nach dem Dilatometerexperiment bei Raumtemperatur von 4 feuchten Proben aus 79 m Tiefe des Bohrkerns	63
Tabelle 9: Einfluss der Untergrundregeneration auf die Jahresarbeitszahl der WP	66
Tabelle 10: Aufstellung der Wärmeströme bei Be- und Entladung des Erdsondenspeichers.	70

Literaturverzeichnis

Beier (2008): Equivalent Time for Interrupted Tests on Borehole Heat Exchangers. HVAC&R Research, 14:3, 489-505, DOI 10789669.2008.10391021

Biermayr, P., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Kristöfel, C., Leonhartsberger, K., Maringer, F., Moidl, S., Prüggl, N., Schmidl, C., Strasser, C., Weiss, W. und Wopienka, E. (2015): Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft
(<https://www.igwindkraft.at/mmedia/download/2015.08.05/143876872454476.pdf>)

Blab, R., Eberhardsteiner, L., Haselbauer, K., Marchart, B., & Hessmann, T. (2014): Implementierung des GVO und LCCA- Ansatzes in die österreichische Bemessungsmethode für Straßenoberbauten OBESTO. FFG Endbericht Projekt OBESTO, 2011.

Brandenburg, C., Damyanovich, D., Reinwald, F., Allex, B., Gantner, B., Czachs, C. (2016): Urban Heat Islands – Strategieplan Wien (<http://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/uhi-strategieplan.pdf>)

Braungard, S., Günther, D., Miara, M., Wapler, J., & Weßing, W. (2013): Elektrisch angetriebene Wärmepumpen – Aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Feldtests. BINE-Informationdienst.
(https://www.energieinstitut.at/tools/machvier/doc/BINE_WP_Effizienz_reale_Bedingungen.pdf)

DHI-WASY GmbH (2010): FEFLOW White Papers Vol V, Berlin

Hornych, P. (2014): Evaluation of the concept of equivalent temperature for pavement design, (June 2013).

<https://climathon.climate-kic.org> (abgerufen am 12. Februar 2021; 15:00)

http://wiki.cesba.eu/wiki/Greta_Best_practices (abgerufen am 12. Februar 2021; 15:15)

Milkovics, T. (1984): Ergänzende Berechnungen und Untersuchungen zur neuen Oberbaurichtlinie RVS 3.63. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik und Verkehrswesen, BOKU, Wien.

ÖWAV-RB 207 (2009): Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2. Auflage, Wien.

Road Energy Systems® (2007): Energy from asphalt – Asphalt Collectors for heating and cooling buildings and roads.

Ruhnau, O., Hirth, L. & Praktijnjo, A. (2019): Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. *Sci Data* 6, 189 <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0199-y>

Santamouris, M. (2013): Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island – A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 224 – 240.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)