

Diplomarbeit

Geothermische Nutzung einer Bohrpfahlwand im Lainzer Tunnel – Numerische Modellierung, Vergleich mit Messdaten und grundlegende Einflüsse auf die statische Bemessung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Geothermal utilization of a bored pile wall in the Lainzer Tunnel – Numerical modeling, comparison with measurements and fundamental influences on the structural design

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Nathalie Sagasser, BSc

Matr.Nr.: 1427053

Betreuung: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**
Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. **Roman Markiewicz**
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Adrian Brunner**, BSc
Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/220-02, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich einerseits mit der Untersuchung des thermischen Verhaltens der langjährig geothermisch genutzten Bohrpfahlwand des Lainzer Tunnels im Abschnitt LT24 Hadersdorf-Weidlingau und andererseits mit dem Einfluss einer geothermischen Nutzung von Bohrpfählen auf deren statisch-konstruktive Bemessung.

Beim Bau des Lainzer Tunnels Anfang der 2000er Jahre wurde im Abschnitt LT24 eine Bohrpfahlwand mit Absorberleitungen geothermisch aktiviert. Dieser Prozess und das erste Jahr der Anlage in Betrieb wurden von Markiewicz im Rahmen seiner Dissertation wissenschaftlich begleitet [1]. Somit gibt es seit dem Jahr 2004 Messungen des Temperaturverhaltens dieser Bohrpfahlwand. Dieser Datensatz ist ein Alleinstellungsmerkmal.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine numerische Vergleichsmodellierung für die Heizperiode 2005/06 mit dem Finite-Elemente-Programm COMSOL Multiphysics anzustellen und damit die Messwerte abzubilden. Dabei soll die Modellierung durch bekannte Parameter und Messwerte, wie der Außenlufttemperatur und der Temperatur im Pfahl an verschiedenen Stellen validiert werden.

Zur Kalibrierung dienen Parameter, die bekannt, allerdings mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind, sowie Parameter, die erst durch die Modellierung angenähert werden. Dazu zählen unter anderem die Anfangstemperatur des Bodens, die Tunnelinnenlufttemperatur, die Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit sowie die Vorlauftemperatur. Die Annäherung erfolgt in einem iterativen Prozess. Anschließend wird durch Variation einzelner Variablen gezeigt, welchen Einfluss diese auf das Gesamtsystem sowie den Wärmeertrag haben.

Im zweiten Abschnitt wird der Einfluss einer geothermischen Nutzung auf die statisch-konstruktive Bemessung behandelt. Dabei wird zunächst eine Auflistung der notwendigen Nachweise zur Bemessung eines Bohrpfahls gebracht. Anschließend folgen Überlegungen, welche Parameter dieser Nachweise durch eine geothermische Nutzung des Bauteils beeinflusst werden.

Am Ende des Kapitels wird aufgezeigt, welche Ansätze es zur Berücksichtigung einer geothermischen Nutzung in der Bemessung bereits gibt und wie diese in internationalen Normen und Richtlinien verankert sind. Dies soll die Planung und Ausführung künftiger Anlagen unterstützen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

The present diploma thesis deals on the one hand with the investigation of the thermal behavior of the bored pile wall of the Lainzer Tunnel in section LT24 Hadersdorf-Weidlingau, which has been geothermally utilized for many years, and on the other hand with the influence of a geothermal activation of bored piles on their structural design.

During the construction of the Lainzer Tunnel in the early 2000s, a bored pile wall in section LT24 was geothermally activated with heat exchanger pipes. This process and the first year of the system in operation were scientifically monitored by Markiewicz as part of his thesis [1]. Thus, there are numerous measurements of the temperature behavior of this bored pile wall from 2004 on. This data set has a unique characteristic.

The aim of this work is to perform a comparative numerical model for the heating period 2005/06 with the finite element software COMSOL Multiphysics and to reproduce the measured values. The model is to be validated by known parameters and values, such as the outside air temperature and the temperature in the pile at different locations.

Parameters that are known, but subject to certain uncertainties, as well as parameters that are only approximated through modeling are used for calibration. These include, among others, the initial temperature of the soil, the air temperature inside the tunnel, the flow velocity of the heat exchanger fluid, and the inlet temperature. The approximation is done in an iterative process. Subsequently, by varying individual variables, it is shown what influence they have on the overall system as well as the heat output.

In the second section, the influence of geothermal activation on the structural design is discussed. First, a list of the necessary verifications for the design of a bored pile is presented. This is followed by considerations which parameters in the design are influenced by geothermal utilization of the structural element.

At the end of the chapter, the approaches for the consideration of geothermal use are shown and how they are already anchored in international standards and guidelines. This should support the design and execution of future plants.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Mit dem Abschluss der Diplomarbeit ist auch das Ende meines Studiums in unmittelbare Nähe gerückt. Ein guter Zeitpunkt um nicht nur nach vorne, sondern auch zurückzublicken und all jenen meinen Dank auszusprechen, die mich auf diesem Weg begleitet, unterstützt und mir die Erstellung dieser Diplomarbeit ermöglicht haben.

In diesem Sinne darf ich meinen besonderen Dank an Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam aussprechen für seine wertvollen wissenschaftlichen Inputs und auch der Möglichkeit, an diversen Fachveranstaltungen zum Thema Geothermie teilzunehmen, wodurch ich meinen Blickwinkel erweitern konnte.

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Markiewicz danke ich für seine fachliche Betreuung und die zahlreichen Denkanstöße, die ich aus unseren Gesprächen mitnehmen durfte und in meine Arbeit eingeflossen sind. Univ.Ass. Dipl.-Ing. Adrian Brunner sei an dieser Stelle nicht nur für seine fachliche und organisatorische Unterstützung, sondern auch für die Bereitstellung der Daten gedankt.

Sie alle haben mich durch eine sehr lehrreiche Zeit geleitet, in der konstruktive Kritik stets wertschätzend ihren Platz fand und kollegialer Umgang und ein rasches Feedback immer im Vordergrund standen.

Mein Dank gilt ebenso der Forschungsgesellschaft Schiene – Straße – Verkehr für die Förderung dieser Diplomarbeit und dem Arbeitskreis „Offene Bauweise“ für dessen fachliche Unterstützung.

Ich spreche meiner Familie Dank aus, die stets ein offenes Ohr und ermutigende Worte für mich hatte und mir während meiner gesamten Ausbildung eine verlässliche Stütze war, auf die ich immer zählen durfte.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen StudienkollegInnen bedanken, die mit mir diverse Phasen des Studiums durchlebt und schlussendlich gemeistert haben, woraus langjährige Freundschaften entstanden sind.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract	5
Danksagung	7
Inhaltsverzeichnis	9
1 Einleitung	13
1.1 Hintergründe.....	13
1.2 Ziele und Aufbau.....	14
2 Grundlagen der Geothermie	15
2.1 Allgemeine Grundlagen	15
2.2 Bedeutung der Geothermie in Österreich	15
2.3 Aufbau der Erde	16
2.4 Oberflächennahe Geothermie.....	17
2.5 Massivabsorberanlagen.....	20
2.6 Heizen mit Wärmepumpe.....	22
2.6.1 Funktionsweise.....	22
2.6.2 Messung der Leistung.....	23
2.7 Kühlen mit oder ohne Kältemaschine.....	24
2.8 Saisonaler Wärmespeicher	25
2.9 Energiewände	25
2.9.1 Allgemeines	25
2.9.2 Anwendung im Tunnelbau bei offener Bauweise und Deckelbauweise	26
3 Lainzer Tunnel (LT24 – Hadersdorf-Weidlingau)	29
3.1 Projektüberblick Lainzer Tunnel	29
3.2 Baulos LT24 – Hadersdorf-Weidlingau	30
3.2.1 Einordnung in das Gesamtprojekt.....	30
3.2.2 Bauliche Charakteristika dieses Abschnitts	31
3.2.3 Geothermische Anlage	31
3.3 Grundlagen aus vorhergehender Forschungsarbeit.....	33
3.3.1 Positionierung der Messeinrichtungen an den Pfählen	34

3.3.2	Ergänzende Sensoren	38
3.3.3	Auslesen der Temperaturmessdaten	38
3.4	Erforderliche Parameter zur Modellierung.....	38
3.4.1	Wahl des Messpfahls sowie des Referenzbereichs zur Modellierung	40
3.4.2	Zeitraum	44
3.4.3	Untergrundverhältnisse.....	44
3.4.4	Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (bei konstantem Druck)	47
3.4.5	Porosität	48
3.4.6	Grundwasser.....	48
3.4.7	Strömungsgeschwindigkeit in den Absorberleitungen.....	49
3.5	Aufbereitung und Interpretation der thermischen Messdaten.....	51
3.5.1	Außenlufttemperatur	51
3.5.2	Innenlufttemperatur.....	53
3.5.3	Temperaturen Messpfahl	59
3.5.4	Vorlauf- und Rücklauftemperatur Absorberflüssigkeit	62
3.6	Beschreibung des Berechnungsmodells	65
3.6.1	Modellaufbau	65
3.6.2	Lage der Absorberleitungen	67
3.6.3	Randbedingungen.....	69
3.6.4	FE-Netz.....	71
3.6.5	Auswertepunkte für die Modellkalibrierung	71
3.7	Modellkalibrierung.....	72
3.7.1	Variierte Parameter zur Modellkalibrierung	73
3.7.2	Berechnungsergebnisse des kalibrierten Modells und Gegenüberstellung mit den Messdaten	79
3.7.3	Abschließende Erkenntnisse zur Modellkalibrierung	94
3.8	Parameterstudie – Einfluss einzelner Variablen	95
3.8.1	Tunnelinnenlufttemperatur.....	96
3.8.2	Vorlauftemperatur.....	100
3.8.3	Anfangstemperatur des Bodens	101
3.8.4	Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit	102
3.9	Erkenntnisse aus der Parameterstudie.....	104
4	Einfluss einer geothermischen Nutzung von Bohrpfählen auf deren statisch- konstruktive Bemessung	105
4.1	Einleitung	105
4.2	Bemessung eines Bohrpfahls ohne geothermische Nutzung	105
4.2.1	In Österreich relevante Normen, Richtlinien und Regelwerke.....	105
4.2.2	Grundlagen sowie Lastangaben aus der Originalstatik des LT24	107
4.2.3	Dauerhaftigkeit.....	111

4.2.4	Materialkennwerte	115
4.2.5	Knicknachweis	116
4.2.6	Erforderliche Einbindelänge	116
4.2.7	Längsbewehrung	117
4.2.8	Querkraftbewehrung.....	119
4.2.9	Verankerungslänge	121
4.2.10	Lichte Mindestabstände der Bewehrungsstäbe	122
4.3	Grundlegendes zur Bemessung eines Bohrpfahls mit geothermischer Nutzung	122
4.3.1	Zwang zufolge Temperaturveränderung.....	123
4.3.2	Verringerung der aufnehmbaren Kräfte zufolge von Einbauten.....	124
4.3.3	Einfluss auf das Verhalten der Böden.....	124
4.3.4	Schlussfolgerungen – Möglicherweise abhängige Parameter.....	125
4.4	Ansätze zur Bemessung eines Bohrpfahls mit geothermischer Nutzung	126
4.4.1	Regelwerke in Österreich	126
4.4.2	Regelwerke im Ausland	127
4.4.3	Bemessungsansätze gemäß Forschung	129
4.5	Bewertung der Ansätze und Schlussfolgerung	130
5	Zusammenfassung	131
6	Literaturverzeichnis	133
7	Abbildungsverzeichnis	139
8	Tabellenverzeichnis	145



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

1.1 Hintergründe

Der Ursprung der oberflächennahen Geothermie in Österreich liegt in den 1970er-Jahren, ausgelöst durch die damalige Ölkrise und die dadurch sehr stark angestiegenen Preise. In den folgenden Jahrzehnten sank der Ölpreis jedoch wieder drastisch und damit flaute auch das Interesse an der Technologie ab. Seit Beginn der 2020er-Jahre steigt das Interesse am Einsatz dieser Technologie wieder rapide an. Dies ist einerseits auf die gestiegenen Energiepreise sowie andererseits auf ein ökologisches Umdenken der Bevölkerung zurückzuführen [2, 3, 4].

Das Potential zur thermischen Aktivierung des Bodens sowie erdberührter Bauteile bei Neubauten im Hoch- und Tunnelbau ist umfassend vorhanden. Eine Herausforderung birgt allerdings der Umstand, dass es kaum wissenschaftliche Daten aus Langzeitbeobachtungen eines realen Projekts gibt. Die in der Literatur festgehaltenen Untersuchungen zum Thema Energiewände bedienen sich zumeist numerischer Modellierungen. Sofern Validierungen vorhanden sind, handelt es sich um spärliche Messdaten – jedoch keine kontinuierlichen Aufzeichnungen [5].

Ein Alleinstellungsmerkmal zu anderen Arbeiten auf dem Feld der thermisch aktivierten Bauteile (Massivabsorber) ist, dass hierbei eine Energiewand untersucht wird. Bei anderen Projekten lag der Fokus zumeist auf einzelnen Energiepfählen. Die beiden Seiten einer Energiewand zeigen ein unterschiedliches Temperaturverhalten auf, da eine Seite erd- und die andere luftberührt ist. Dies kann ausschlaggebend für die Temperaturverteilung in der Energiewand sein [5].

Im Jahr 2004 wurde bei der Errichtung des Lainzer Tunnels im Abschnitt LT24 eine Energiebohrpfahlwand hergestellt, um ein nahe gelegenes Schulgebäude mit Erdwärme zu versorgen. Da dies eines der ersten Projekte seiner Art war, wurden Messeinrichtungen eingebaut, um Temperatur- und Dehnungsdaten zu gewinnen und eine wissenschaftliche Auswertung zu ermöglichen. Somit wurden seit dem Jahr 2004 (mit Unterbrechungen) Messwerte aufgezeichnet. Diese langjährige Verfügbarkeit von Messdaten einer Energiewand stellt ein weltweites Unikum dar.

Eine weitere Herausforderung bei der Anwendung der Technologie der Massivabsorber in Österreich, zu der auch geothermisch aktivierte Bohrpfahlwände zählen, ist das Regelwerk. In Österreich gibt es zwar einige Richtlinien, allerdings setzen sich diese hauptsächlich mit der Energiegewinnung auseinander, jedoch nicht mit den Auswirkungen auf die statisch-konstruktiven Nachweise.

1.2 Ziele und Aufbau

Das erste Ziel der Diplomarbeit ist eine wissenschaftliche Betrachtung eines Langzeitprojektes am Beispiel des Lainzer Tunnels (Baulos „LT24 Hadersdorf-Weidlingau“ – Energiebohrpfahlwand) durch eine Vergleichsmodellierung eines repräsentativen Tunnelabschnitts mit dem Finite-Elemente-Programm COMSOL Multiphysics.

Zunächst werden durch Messungen sowie Gutachten bekannte Parameter – Temperaturmessdaten sowie der Bodenaufbau und die Bodenkennzahlen – aufbereitet und analysiert. Anschließend werden mittels Literaturrecherche sowie theoretischen Überlegungen Ansätze für nicht bekannte Variablen, wie beispielsweise die Tunnelinnenlufttemperatur getroffen.

Auf Grundlage dessen werden in einem iterativen Modellierungsprozess die Parameter, welche mit Unsicherheiten behaftet oder unbekannt sind, kalibriert. Dadurch sollen die Messungen, welche der Validierung dienen, bestmöglich wiedergespiegelt werden. Das Ergebnis wird anschließend im Detail mit allen Eingangsgrößen diskutiert.

Aufbauend darauf wird gezeigt, welchen Einfluss die Variation einzelner Parameter auf das Gesamtergebnis hat und welche Parameter am signifikantesten für das Temperaturverhalten im Pfahl sind. Das Ergebnis soll die Wirksamkeit der langfristigen Gewinnung von geothermischer Energie mittels Massivabsorbern, anhand wissenschaftlich fundierter Daten, darstellen.

Das zweite Ziel der Diplomarbeit ist die Betrachtung des Einflusses einer geothermischen Nutzung von Bohrpfählen auf deren statisch-konstruktiven Nachweise. Dabei wird zunächst der Bemessungsvorgang eines Bohrpfahls ohne geothermischer Nutzung – nach Norm – angeführt. Darauf aufbauend werden Überlegungen angestellt, in welchen Nachweisen ein geothermischer Energiebetrieb berücksichtigt werden kann.

Darüberhinausgehend wird eine Literaturstudie durchgeführt, durch die gezeigt wird in welcher Größenordnung sich die Auswirkungen einer geothermischen Nutzung befinden. Dabei geht es im Konkreten vor allem um entstehende Zwänge, mögliche zyklische Veränderungen sowie um die Schnittstelle zwischen dem Boden und dem Bauwerk.

Abschließend werden konkrete Bemessungsansätze für die Berücksichtigung einer geothermischen Nutzung von Bohrpfählen gebracht. Diese stammen einerseits aus internationalen Richtlinien sowie Regelwerken und andererseits aus wissenschaftlicher Forschung.

Das langfristige Ziel dieser Arbeit ist die Verbreitung der Technologie zu fördern. Einerseits durch Ansätze zur statischen Berücksichtigung, welche den Bauherrn eine gewisse Sicherheit bieten sollen. Andererseits wird durch die Vergleichsmodellierung ein kalibriertes Modell zur Verfügung gestellt, das als Grundlage für die Bemessung von Neubauprojekten dienen kann.

2 Grundlagen der Geothermie

2.1 Allgemeine Grundlagen

Der Begriff Geothermie beschreibt ein breites Feld an Möglichkeiten. Grundsätzlich befasst sie sich mit der Nutzung von Energie, welche im Inneren der Erde in Form von Wärme gespeichert vorliegt.

Wichtig zu erwähnen ist die nahezu überall vorhandene Verfügbarkeit sowie mögliche Gewinnung von geothermischer Energie. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, dass Geothermie grundlastfähig ist und somit Energie konstant liefern kann. Darüber hinaus regeneriert sie sich selbst und weist somit ein beinahe unlimitiertes Potential auf. Die Voraussetzung hierfür ist eine korrekte Dimensionierung der Anlage und eine angemessene Berücksichtigung der Rahmenbedingungen [4]. Dies bedeutet wiederum eine Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen, wie dem Wetter, der Außentemperatur oder auch politischer und wirtschaftlicher Faktoren.

2.2 Bedeutung der Geothermie in Österreich

In diesem Abschnitt soll der Anteil der geothermischen Nutzung am Gesamtenergiebedarf sowie ihr Potential in Österreich beschrieben werden. Der Anteil, der durch Geothermie gewonnener Energie ist in Österreich momentan sehr gering. Mit Hilfe dieser Technologien wurde im Jahr 2020 lediglich ein Anteil von knapp 0,2 Prozent der erneuerbaren Energien gedeckt [6]. Hinzu kommt, dass im Jahr 2020 der Prozentsatz an erneuerbarer Energie am nationalen Energieverbrauch bei rund 36,5 % lag [7].

Wichtig zu erwähnen ist, dass der Überbegriff „Wärmepumpen“ in den meisten Statistiken sowohl die Gewinnung von Energie aus Luft, Grundwasser als auch Böden umfasst [6]. Dabei liegt der Anteil der Luftwärmepumpen im Jahr 2021 bei etwa 82,5 % aller Wärmepumpen in Österreich [8].

In der vorliegenden Arbeit soll vor allem auf die Nutzung der Erde sowie des Grundwassers eingegangen werden. Die eingangs angeführten Zahlen verdeutlichen, dass es erhebliches Potential gibt diese als Ressourcen zur Energiegewinnung auszubauen und ihren Anteil zur Deckung des Energiebedarfs deutlich zu steigern. In den folgenden Unterkapiteln werden die verwendeten Begriffe genauer definiert und erklärt, um die Thematik klar abzustecken.

2.3 Aufbau der Erde

Die Erde weist einen schalenförmigen Aufbau auf. Rund 99 % des Planeten sind wärmer als 1000 °C [2]. Durch Bohrungen sind Schichten bis zu 35 km unter der Erdoberfläche erreichbar und für die geothermische Nutzung gewinnbar [2].

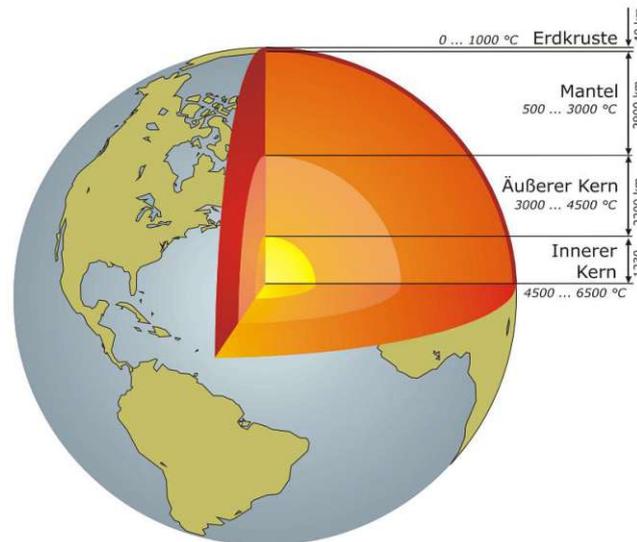


Abb. 2.1: Aufbau der Erde [2]

Wie in der Abb. 2.1 zu erkennen ist, nimmt die Temperatur vom Erdinneren bis zur Erdkruste stark ab. Das führt zu einem kontinuierlichen Wärmestrom vom Erdkern an die Oberfläche. Dieser Transport kann durch Wärmeleitung, Konvektion und elektromagnetischer Strahlung erfolgen, wobei in der Kruste, im Gegensatz zu den anderen Schichten, die Wärmeleitung vorherrschend ist [3].

Der geothermische Tiefengradient beträgt etwa $1^\circ/33\text{ m}$, sofern keine Anomalien, wie der Zusammenstoß von Kontinentalplatten, vorliegen [2]. Nur die äußerste Schicht der Erdkruste unterliegt größeren thermischen Schwankungen. Da der Erdboden thermodynamisch träge ist, ist die Temperatur ab einer Tiefe von 10-15 m nahezu konstant. Die Temperatur liegt in diesem Bereich meist zwischen 10 und 15 °C und nimmt nur langsam mit dem geothermischen Tiefengradienten zu [5]. Bis zu dieser Tiefe beeinflusst die Sonneneinstrahlung die Bodentemperatur wesentlich, was durch Abb. 2.2 verdeutlicht wird.

In der folgenden Darstellung wird der Einfluss der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen auf das oberflächennahe Temperaturregime gezeigt. Die Daten sind schematisch für Mitteleuropa zu verstehen. Diese Grafik leitet auch zum folgenden Kapitel über, in dem die oberflächennahe Geothermie definiert wird.

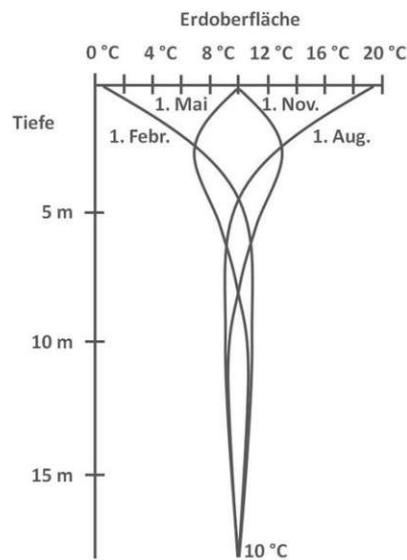


Abb. 2.2: Oberflächennahes Temperaturregime in Deutschland [9]

2.4 Oberflächennahe Geothermie

In Österreich spricht man im Zusammenhang mit der Nutzung oberflächennaher Geothermie von Einbauten, die nicht weiter als 300 m in das Erdreich eingebracht werden [3]. Dies steht im Zusammenhang mit den Bestimmungen des Wasserrechtsgesetz (im Speziellen §31c), wonach Vertikalkollektoranlagen mit einer geringeren Tiefe nur noch in ausgewiesenen Bereichen einer Bewilligung bedürfen. Diese Sonderfälle liegen vor, wenn gespanntes, oder artesisch gespanntes Grundwasser vorhanden ist oder es sich um wasserrechtlich besonders geschützte Bereiche handelt. Andernfalls ist lediglich ein Anzeigeverfahren einzuhalten [10]. Bohrungen tiefer als 300 m, sind laut Mineralrohstoffgesetz § 119 immer bewilligungspflichtig [11]. Dieses Gesetz dient als Grundlage für das Bergrecht, welches im Kontext der Geothermie in Österreich häufig zitiert wird [12].

Erst ab einer Temperatur des Bodens von über 150 °C wird eine Stromgewinnung ökonomisch und ökologisch sinnvoll, da bei geringeren Temperaturen der Wirkungsgrad zu niedrig ist. Somit eignet sich die oberflächennahe Geothermie in erster Linie dazu, Wärmeenergie zum Heizen und Kühlen zu gewinnen [2].

Eine weitere wichtige Unterscheidung ist jene zwischen offenen Systemen, wie Brunnenanlagen, und geschlossenen Systemen, zu denen Erdreichkollektoren, Erdwärmesonden und Massivabsorber zählen [3]. Die folgende Grafik soll die Unterscheidung zwischen diesen genannten Systemen an Beispielen verdeutlichen.

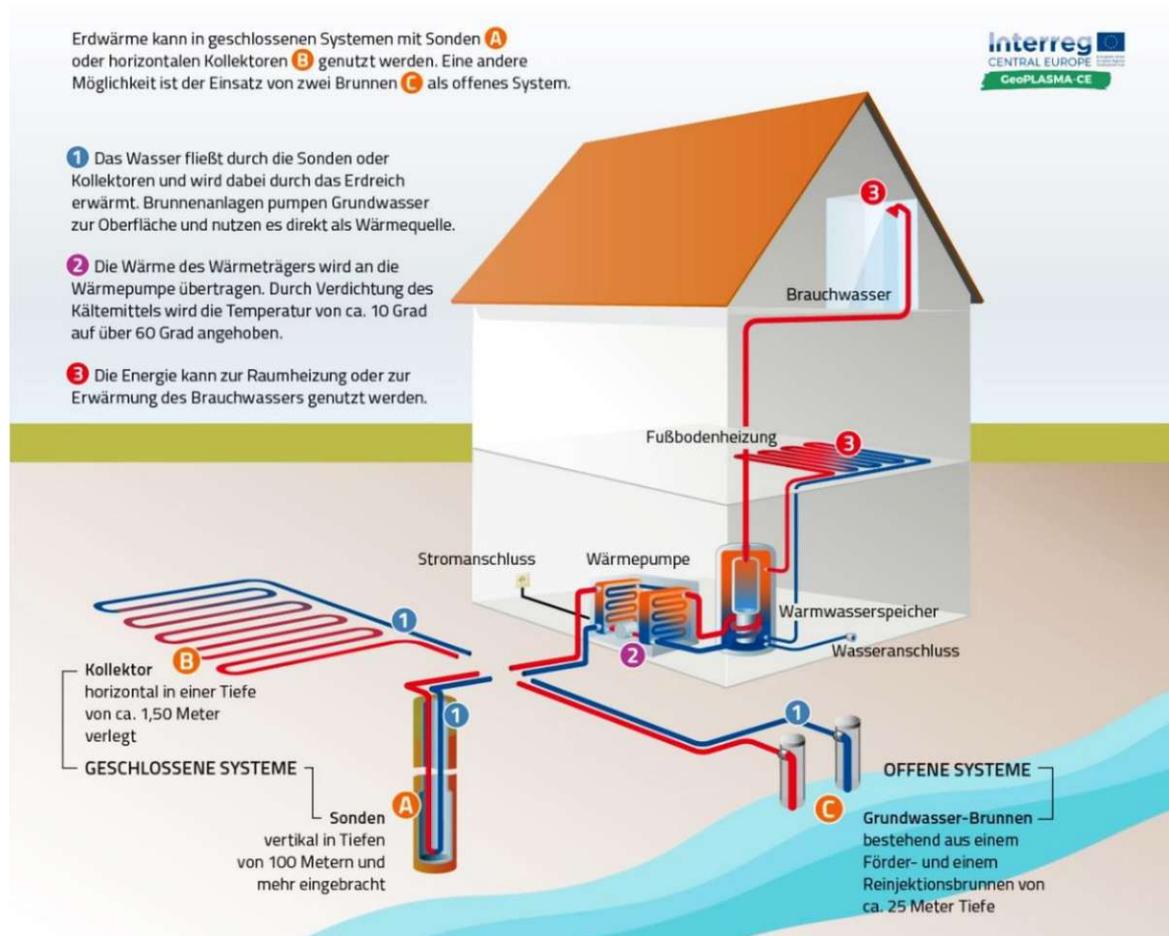


Abb. 2.3: Veranschaulichung der Systeme [13]

Das Handbuch für Geothermie [3] gibt die folgende Definition:

Offene Systeme nutzen die thermische Energie des Grundwassers, das über einen Förderbrunnen gehoben und zur Wärmepumpe geleitet wird. Dort wird dem Wasser Wärme entzogen und anschließend wird das kühlere Wasser über einen Injektionsbrunnen wieder in den Untergrund eingeleitet. [...] Bei den geschlossenen Systemen zirkuliert ein Fluid in horizontal oder vertikal verlegten Rohrleitungen und die Wärmepumpe entzieht diesem Transportmedium die Wärme.

Wichtig für die Nutzung des offenen Systems ist, dass es einen ausreichend ergiebigen Grundwasserleiter gibt, jedoch ist eine Speicherung der Energie aufgrund der Grundwasserströmung sehr schwierig. Auch muss die Nutzung des Grundwassers behördlich bewilligt werden, da diese Verwendung nicht mit anderen Nutzungen interferieren darf [3]. Hierfür muss über andere Regularien hinausgehend das Wasserrechtsgesetz berücksichtigt werden [14]. Auch muss beachtet werden, dass im Heizfall die Temperaturabsenkung des entnommenen Grundwassers bei maximal 6 °C liegen soll [4]. Des Weiteren ist im Kühlfall eine maximale Erwärmung des Grundwassers auf 20 °C zu begrenzen. Darüberhinausgehend ist die

maximal zulässige Temperaturspreizung – Änderung der Wassertemperatur an der Einleitstelle im Vergleich zu der ungestörten Grundwassertemperatur – mit 5°C festgelegt [15].

Der Vorteil geschlossener Systeme besteht in der hydraulischen Trennung des Wärmeträgers vom Grundwasser [3]. Des Weiteren ist eine Wärmespeicherung möglich und sofern Massivabsorber verwendet werden, eine thermische Aktivierung der Gründungselemente vorhanden. Zweiteres bietet den Vorteil, dass große Betonvolumina zusätzliche Wärmetransportvorgänge ermöglichen [3].

Die am Markt gängigste Ausführung der genannten Möglichkeiten sind Erdwärmesonden. Einer der Gründe hierfür ist, dass diese unabhängig von der restlichen Struktur eingebaut werden können und nur einen untergeordneten Einfluss auf den Bauablauf haben [16, 17].

Die folgende Grafik veranschaulicht den schematischen Verlauf einer geschlossenen Anlage mit ihren wesentlichen Elementen. Auf deren Einzelemente wird in den anschließenden Kapiteln eingegangen.

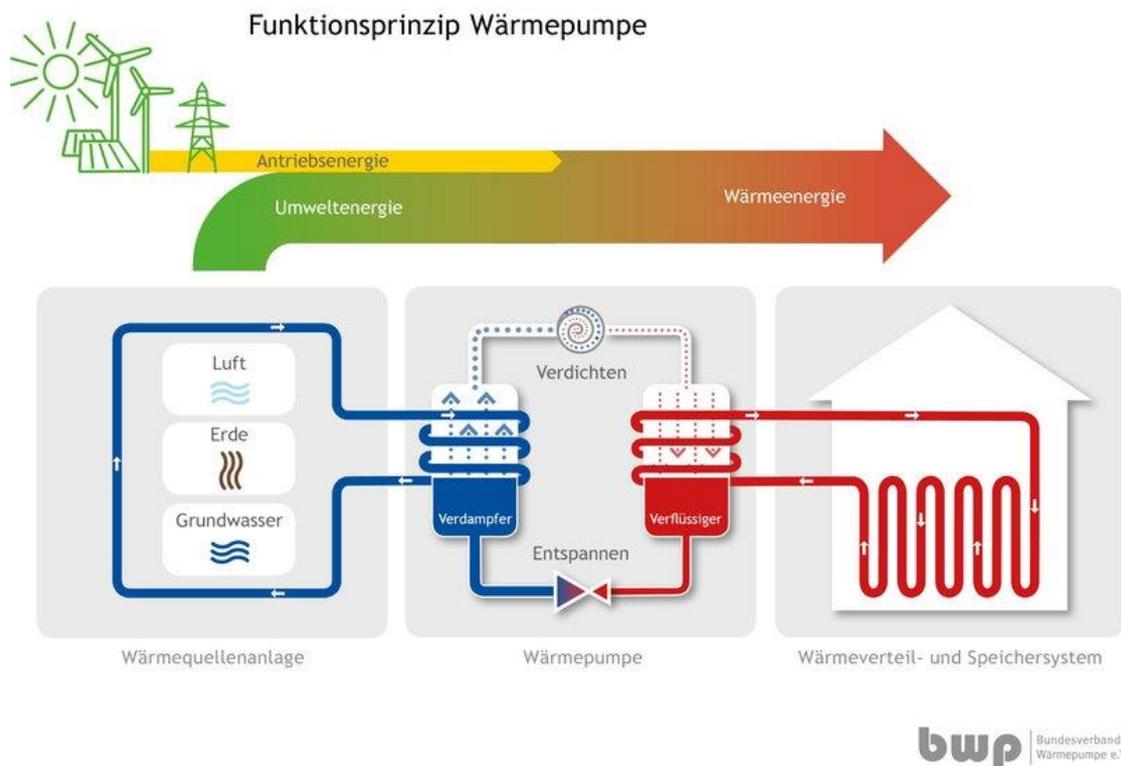


Abb. 2.4: Schema einer geothermischen Anlage [18]

Der Bereich der Wärmequellenanlage wird auch als Primärkreislauf bezeichnet. Die zirkulierende Flüssigkeit vermischt sich nicht mit der des Wärmeverteilsystems. Der letztgenannte Bereich wird auch als Sekundärkreislauf bezeichnet. Wichtig zu erwähnen ist, dass sich weder die Fluide miteinander vermischen noch das Fluid mit dem Boden, sondern lediglich Wärme über die Wärmepumpe übertragen wird. Näheres zu der Funktionsweise dieser wird im Kapitel zum Thema der Wärmepumpe erläutert werden (Kapitel 2.6, ab Seite 22) [1, 2].

2.5 Massivabsorberanlagen

Diese Anlagen sind Elemente, die zur oberflächennahen Gewinnung von geothermischer Energie herangezogen werden. Dabei handelt es sich um geschlossene Systeme. In Abb. 2.4 sind sie dem Überbegriff der Wärmequellenanlage zuzuordnen und beziehen sich auf die Energiegewinnung aus der Erde.

Massivabsorber werden auch als thermisch aktivierte Bauteile bezeichnet. Dabei werden Absorberleitungen in statisch erforderliche Bauteile eingesetzt [3]. Diese Absorberleitungen werden meistens auf der Innenseite des Bewehrungskorbs montiert und sind schlangen- oder spiralförmig angeordnet [19, 20].

Die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten reicht von Energiepfählen über Energieschlitzwände, Energiepfahlwände, Energiebodenplatten bis hin zu Energietunnelementen wie beispielsweise Energietübbinge oder Energiefolie. Dabei können auch mehrere dieser Systeme miteinander kombiniert werden, um ein bestmögliches Resultat zu erzielen [19]. Im Kapitel 2.9 (zum Thema Energiewände) werden in der Abb. 2.11 weitere Beispiele von Massivabsorbern dargestellt.

Abb. 2.5 verdeutlicht das Schema der Massivabsorber am Beispiel von Energiepfählen. Die weiteren erwähnten aktivierten Gründungselemente funktionieren analog.

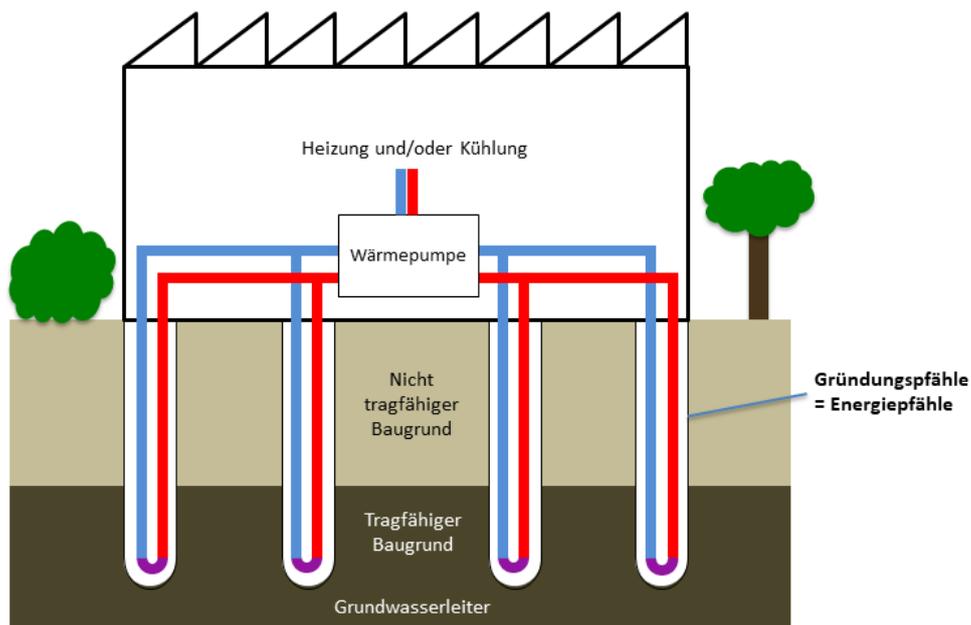


Abb. 2.5: Massivabsorber Funktionsweise [21]

Absorberleitungen sind in der Regel Kunststoffleitungen aus Polyethylen, mit einem Durchmesser von 16-32 mm [19]. In diesen Leitungen fließt Wasser, eine Wasserfrostschutzmischung oder aber ein Gas, um die Wärme des Bodens transportieren zu können [4]. Bei reinem Wasser müssen die Temperaturen ausreichend hoch sein, um ein Gefrieren der Leitungen auszuschließen. Hingegen wirken sich, bei der Variante mit reinem Wasser, die geringen Kosten bei der Anlagenbefüllung positiv aus. Auch Gas hat einige

Nachteile, da hier keine Kühlung möglich ist, Kupferrohre (teuer) verwendet werden müssen und im Falle von Leckagen der Gasaustritt kritisch ist. Somit ist die gängigste Variante eine Wasserfrostschutzmischung. Hierbei ist lediglich die höhere Zähigkeit, im Vergleich zu den anderen beiden Optionen zu beachten, die einen Einfluss auf die Größe der Umwälzpumpe und somit den Stromverbrauch hat. Des Weiteren ist in regelmäßigen Abständen die Qualität der Flüssigkeit zu prüfen, um etwaigen Anlagenschäden vorzubeugen und eine einwandfreie Nutzung zu ermöglichen [22].

Der Vorteil, gegenüber anderen Formen der oberflächennahen Geothermie ist dabei, dass Massivabsorber ohne erheblichen Zeitaufwand und mit geringen Investitionskosten installiert werden können, da die notwendigen Elemente bereits aus statischen Gründen erbaut werden. Darüber hinaus können durch die großen erdberührten Flächen weitreichende Bodenbereiche aktiviert werden [19]. Durch diese Nutzung entsteht ein Synergieeffekt, da einem Bauteil mehrere Funktionen zukommen [23]. In der folgenden Abbildung ist diese Technologie am Beispiel eines Energiepfahls dargestellt.

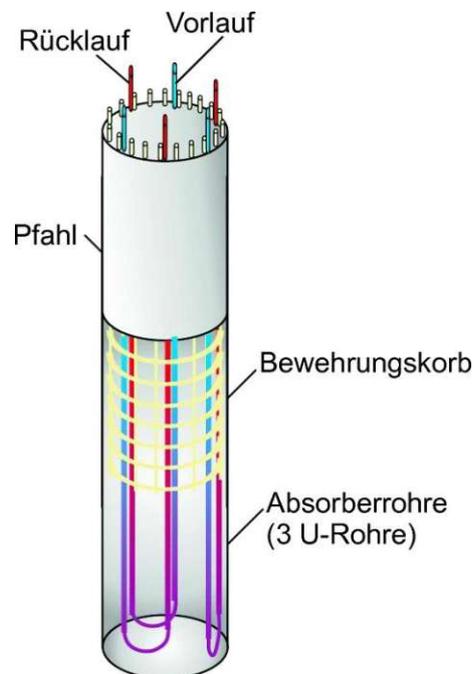


Abb. 2.6: Leitungsführung in einem Energiepfahl [19]

Die abgebildeten Absorberleitungen werden an einem zentralen Verteilerblock zusammengeführt und in einer Sammelleitung zur Heizzentrale geleitet. Dort befindet sich die Wärmepumpe, auf die im Kapitel 2.6 näher eingegangen wird [1].

2.6 Heizen mit Wärmepumpe

2.6.1 Funktionsweise

Da die aus der Wärmequellenanlage (Abb. 2.4) – z.B. durch Massivabsorber – gewonnene Rücklauf­temperatur in der Regel bei 5-15 °C liegt, als Vorlauf­temperatur für die Heizanlage (Heizvertei­l- und Speichersystem, Abb. 2.4) jedoch mindestens 30-35 °C notwendig sind, wird bei oberflächennaher Geothermie eine Wärmepumpe benötigt, um das erforderliche Temperaturniveau zu erreichen [4, 19, 24].

Bei der notwendigen Vorlauf­temperatur ist zu unterscheiden, ob es sich um ein Heizsystem mit Radiatoren handelt, oder eines mit Fußbodenheizung. Bei ersterem sind Temperaturen von etwa 55 °C notwendig. Bei einer Fußbodenheizung sind hingegen 35 °C jedenfalls ausreichend [4].

Der Begriff Wärmepumpe umfasst eine große Bandbreite an Geräten. Im Bereich der oberflächennahen Geothermie sind hauptsächlich wasserbetriebene Kompressionswärmepumpen (Wasser/Wasser oder Sole/Wasser) in Verwendung [19]. Alle weiteren Aussagen betreffen diesen Typus und beziehen sich ausschließlich darauf. In Abb. 2.7 wird das Schema einer Wärmepumpe dargestellt. Auf die einzelnen Prozessschritte wird in weiterer Folge eingegangen.

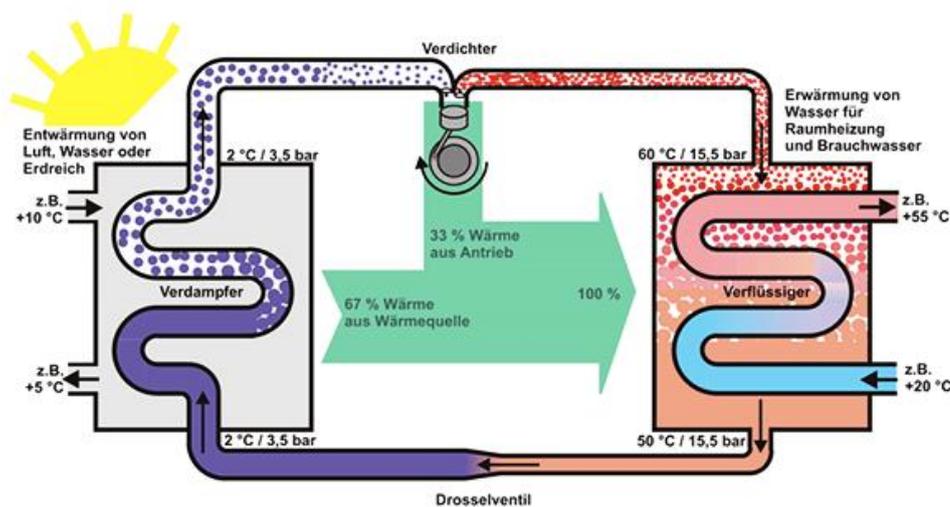


Abb. 2.7: Funktionsskizze Wärmepumpe [25]

In der Wärmepumpe fließt ein eigenes, von den anderen Kreisläufen unabhängiges Kältemittel. Dabei durchläuft das Fluid vier wesentliche Prozessschritte, welche anschließend erläutert werden [1].

Die durch die Umgebungswärme aufgeheizte Flüssigkeit in den Absorberleitungen des Primärkreislaufs fließt zu dem Verdampfer. Dort umströmt die Flüssigkeit das Fluid des

Wärmetauschers und erhitzt es. Durch diesen Erhitzungsprozess verdampft das Fluid und die Flüssigkeit des Primärkreislaufs kühlt ab und fließt wieder Richtung Erdreich.

Das verdampfte Fluid strömt zum Verdichter, welcher das noch relativ kühle Gas komprimiert. Durch diese Erhöhung der Dichte entsteht Wärme [4]. In diesem Schritt wird elektrische Energie zugeführt, um das Gas zu verdichten. Der Anteil der notwendigen zuzuführenden Energie liegt bei etwa 25-35 % und richtet sich nach der erforderlichen Heiztemperatur, die von den thermischen Eigenschaften des Gebäudes abhängt und der vorhandenen Rücklauftemperatur [25]. Dieses erwärmte Gas bewegt sich weiter zum Verflüssiger. An dieser Stelle wird die im Sekundärkreislauf zirkulierende Flüssigkeit umströmt. Dadurch nimmt die Temperatur des Gases in der Wärmepumpe ab und wird wieder flüssig. Bevor das Fluid in den Verdampfer gelangt, durchläuft es ein Drosselventil. Dies dient dazu, die Dichte wieder zu verringern, da mit einer geringeren Dichte die Temperatur abnimmt und die Wärme des Absorberkreislaufes besser auf das Fluid der Wärmepumpe übergehen kann [4]. Auf der folgenden Grafik sind die unterschiedlichen Temperaturniveaus im Gesamtsystem der Wärmepumpe im Heizfall zu erkennen.

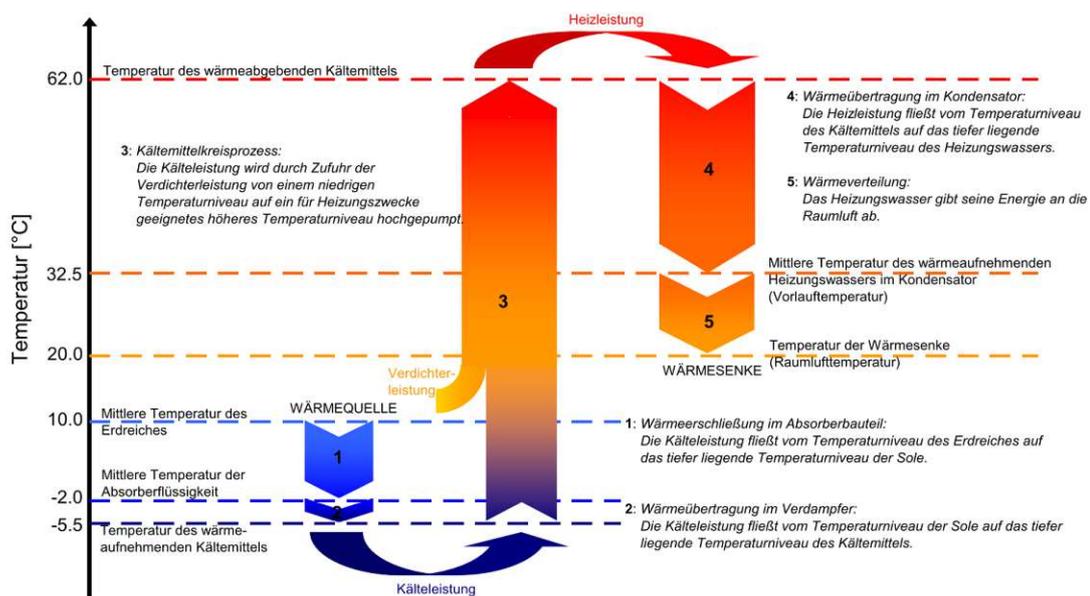


Abb. 2.8: Energiefluss einer erdgekoppelten Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperaturen im Heizfall [1]

2.6.2 Messung der Leistung

Es gibt verschiedene Kennzahlen, die die Effizienz von Wärmepumpen bewerten. Am häufigsten werden die Leistungszahl (Coefficient of Performance (COP)) sowie die Jahresarbeitszahl (JAZ) herangezogen.

Beim COP-Wert wird das Verhältnis aus abgegebener Nutzwärmeleistung (P_H) zu Antriebsenergie der Wärmepumpe (P_{WP}) gebildet [19]. Je höher dieser Wert ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe [4]. Dies ist ein reiner Maschinenparameter, der einen momentanen Spitzenwert darstellt und über das Jahr nicht konstant ist [4].

Nicht weniger relevant ist die Jahresarbeitszahl, da sie die Gesamtsystemtechnik berücksichtigt. Sie ist eine gesamtenergetische Größe und hängt nicht nur von den Geräten, sondern auch vom Nutzer und dem Klima ab. Hierbei wird das Verhältnis von jährlich abgegebener Wärmeenergie zu elektrischer Arbeit (inklusive aller Umwälzpumpen), die zum Betrieb notwendig ist, gebildet. Je höher die JAZ ist, desto effizienter ist das gesamte System [4]. Grundsätzlich gilt, dass die Jahresarbeitszahl geringer ist als die Leistungszahl.

2.7 Kühlen mit oder ohne Kältemaschine

Bei der Nutzung von Erdwärme ist es möglich "Heizen im Winter" mit einer "Kühlung im Sommer" zu kombinieren. Für das Kühlen ist in bestimmten Fällen nur die Umwälzung der Absorberflüssigkeit erforderlich. Dieses System wird auch als Free Cooling oder passive Kühlung bezeichnet, da keine Kältemaschine notwendig ist [1]. Sofern zur Kühlung geringere Temperaturen erforderlich sind, muss eine Kältemaschine hinzugeschaltet werden.

Die Kühlung ist in der Regel bei Einfamilienhäusern nicht notwendig. Sie wird bei gewerblich genutzten Gebäuden sowie Infrastrukturbauwerken bedeutsamer. Bei einer intensiven Kühlung ist jedenfalls darauf zu achten, dass die maximale Eintrittstemperatur des Wärmeträgermediums auf längere Sicht 20 °C Temperaturdifferenz zu der Temperatur des ungestörten Bodens nicht übersteigt. Dies wird beispielsweise in der VDI 4640-2, einer Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure, geregelt [26, 27]. Diese Grenze wird aus bakteriologischen und mikrobakteriologischen Gründen festgelegt [4]. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Funktionsweise der Kühlung.

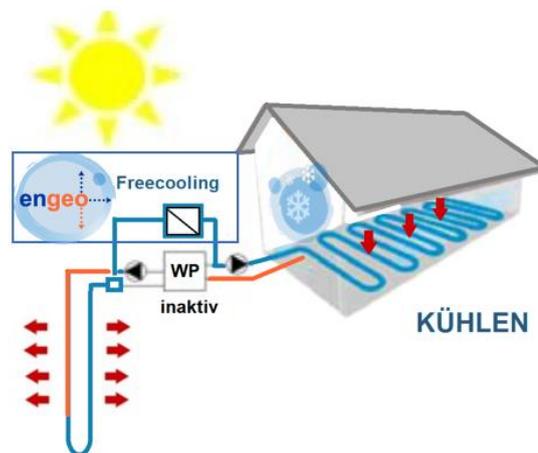


Abb. 2.9: Schema Free Cooling [28]

Das im Primärkreislauf fließende Fluid kühlt durch die Berührung mit dem Boden so weit ab, dass es direkt an das Trägermedium zur Kühlung des Hauses weitergegeben werden kann. Es ist lediglich eine Umwälzpumpe notwendig [29]. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber herkömmlichen Kühlsystemen ist der geringe Bedarf an Fremdenergie zur Betreibung des Systems. Für den Abtransport von 50 kW Wärme ist nur 1 kW zum Betrieb der Umwälzanlage erforderlich [30]. Die somit erreichbare Abkühlung im Innenraum liegt bei etwa 3-4 °C [31].

2.8 Saisonaler Wärmespeicher

Die Nutzung einer Erdwärmeanlage zum Heizen und Kühlen ermöglicht bei geeigneten Randbedingungen eine besonders große Effizienz und stabilisiert die Temperaturen im Boden. In der folgenden Abbildung ist die Temperaturveränderung im Boden im Verlauf eines Jahres zu erkennen. Die im Sommer zur Gebäudekühlung in den Boden eingebrachte Wärme wird im Boden zwischengespeichert und im Winter für Heizzwecke wieder dem Boden entzogen.

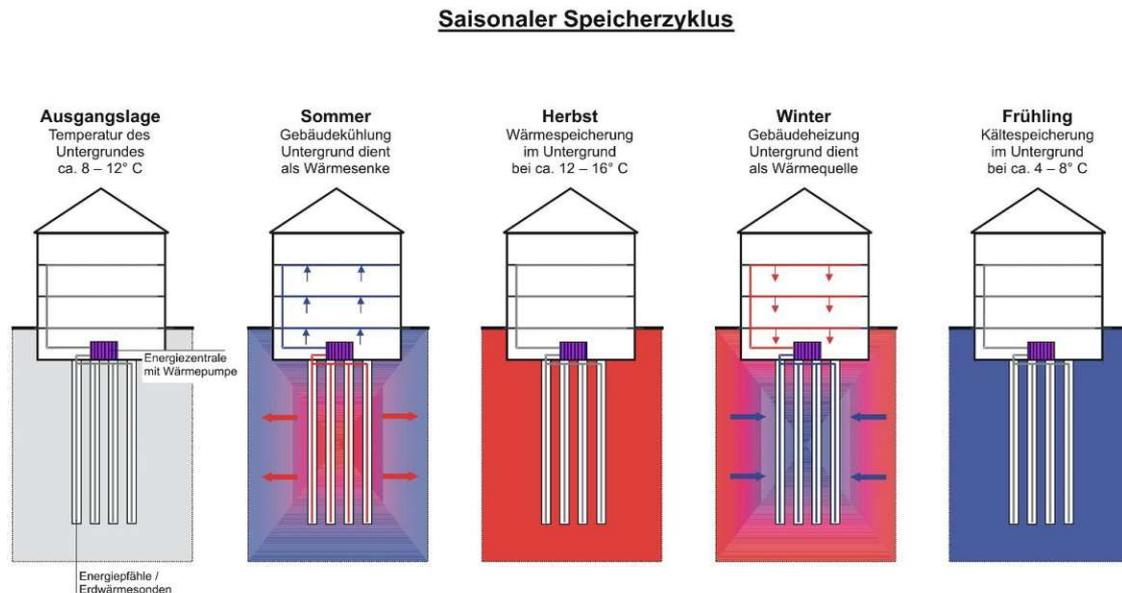


Abb. 2.10: Saisonaler Speicherzyklus des Erdbodens [32]

2.9 Energiewände

2.9.1 Allgemeines

Wie in der Abb. 2.11 dargestellt, gibt es einige Möglichkeiten für flächige Bauteile zur thermischen Aktivierung. In der folgenden Auflistung werden die Energiewände nach wesentlichen gemeinsamen Eigenschaften mit andern Massivabsorbern zusammengefasst und hinsichtlich des Wärmeverhaltens unterschieden.

- Massivabsorber – beidseitig erdberührt: Gründungselemente wie beispielsweise Pfähle oder Schlitzwände
- Massivabsorber – mit Luftseite: Tunnelelemente, Bodenplatten, Wände

Für beide Kategorien gilt, dass durch die großflächige Aktivierung des Betons größere Bodenvolumina herangezogen werden können. Zudem wirkt sich auch die Wärmespeicherfähigkeit des Betons positiv auf die Nutzung aus. Des Weiteren befinden sich die Absorberleitungen geschützt im Beton [33, 34].

Für diese Arbeit ist im Speziellen die in der Abb. 2.11 a) dargestellte Energiebohrpfahlwand mit einer Luftseite von Bedeutung. Dabei gibt es die Möglichkeit diese sowohl in aufgelöster als auch in überschnittener sowie in tangierender Weise auszuführen. Um die Energiegewinnung zu optimieren, wird hier oftmals nicht jeder Pfahl, sondern nur jeder zweite oder dritte belegt, um die gegenseitige Beeinflussung gering zu halten. Dadurch ist es auch möglich die Effizienz im Hinblick auf die Kosten zu steigern.

Die Absorberleitungen sollen möglichst nahe am Erdreich angebracht, sowie regelmäßig verteilt werden. Auch die hydraulischen und konstruktiven Parameter müssen bei der Planung als wesentliche Aspekte berücksichtigt werden [19].

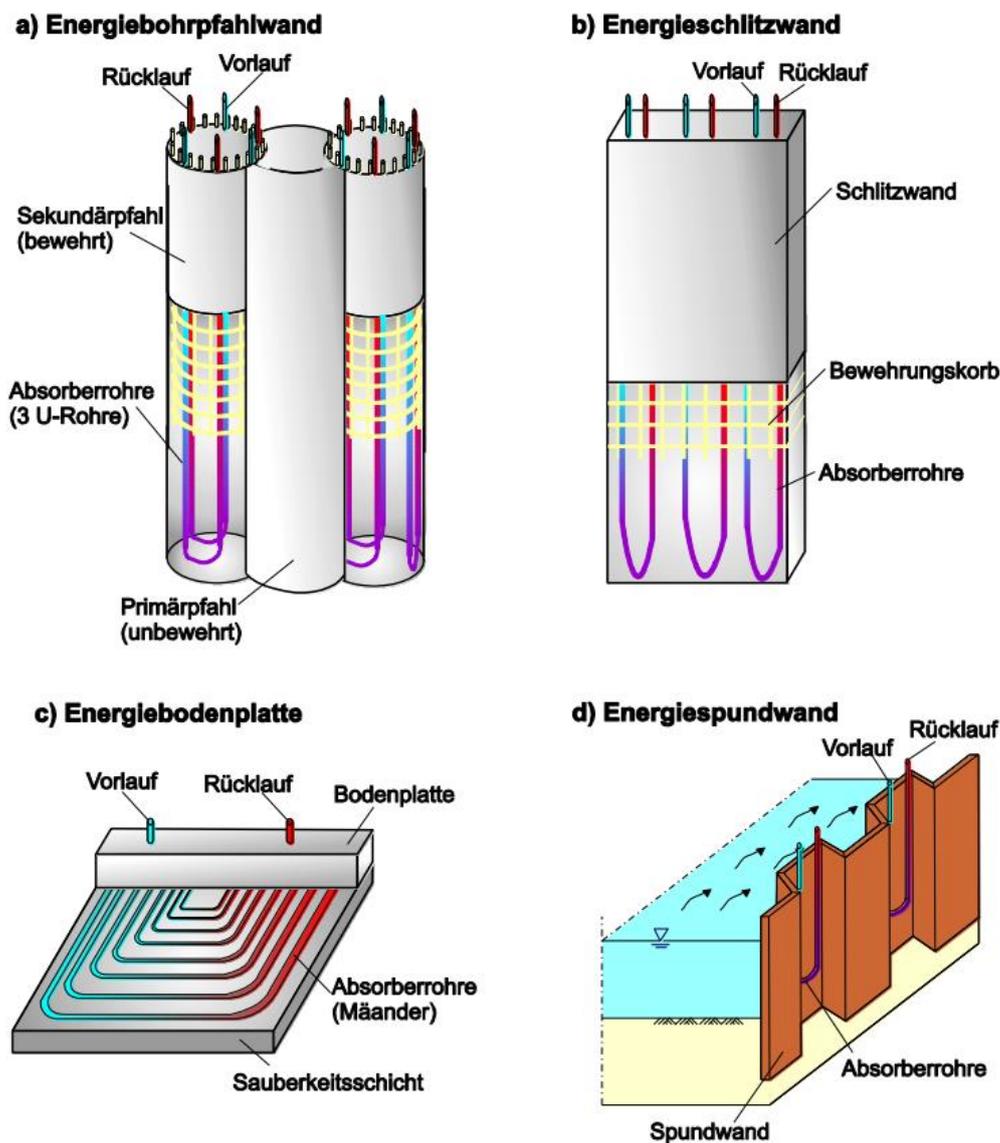


Abb. 2.11: Beispiele für Massivabsorber [19]

2.9.2 Anwendung im Tunnelbau bei offener Bauweise und Deckelbauweise

Die Anwendung von Massivabsorbern im Tunnelbau bietet sich vor allem im urbanen Raum an. Hier kann einerseits das geothermische Potential oft nicht mit anderen Absorbern, wie

beispielsweise Erdwärmesonden oder Kollektoren erschlossen werden und andererseits sind bei Tunnelbauten sehr große erdberührte Flächen vorhanden [17]. Des Weiteren liegen die Energieabnehmer sehr nahe der Energiequelle, und es sind nur kurze Leitungswege notwendig.

Aus der Sicht der Wärmeübertragung ist bei einer Energiewand im Tunnelbau zu beachten, dass die Wand – oberhalb der Bodenplatte – nicht an beiden Seiten an das Erdreich angrenzt und somit auch die Tunnelinnenlufttemperatur einen Einfluss auf den Wärmetransfer hat. Unterhalb der Bodenplatte ist die Energiewand auf beiden Seiten erdberührt. Dieses spezifische Anwendungsgebiet der Massivabsorber im Tunnelbau birgt besondere Herausforderungen und Rahmenbedingungen, auf die nachfolgend überblicksweise eingegangen wird:

Innenlufttemperatur

Wie bereits erwähnt, besteht der wesentliche Unterschied bei der Nutzung in Tunneln darin, dass die Wand nicht an beiden Seiten an das Erdreich angrenzt und somit auch die Tunnelinnenlufttemperatur eine Rolle für den potentiellen Wärmetransfer spielt [35]. Die spezifische Leistung vor der Wärmepumpe liegt bei etwa $20\text{-}35\text{ W/m}^2$ [23]. Dieser Wert unterliegt starken Schwankungen und hängt vor allem von der Energiedifferenz ab. Diese wiederum ist von den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen beeinflusst [35].

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Auswirkungen der Tunnelinnenwand auf das Temperaturverhalten in dem Massivabsorber und somit in den Absorberleitungen bislang noch nicht ausreichend erforscht sind. Dies äußert sich unter anderem in folgenden Punkten:

- Der exakte Wärmeübergangskoeffizient der Wand-Innenoberfläche ist in der Regel nicht bekannt und bildet nicht alle in der Realität vorkommenden Faktoren ab. Beispielsweise wird er sich im Laufe der Zeit ändern, da unter anderem Verschmutzungen auftreten [35].
- In manchen Tunneln hängt die Tunnellufttemperatur primär von der Außenlufttemperatur ab, wie dies beispielsweise beim Tunnel Stuttgart-Fasanenhof der Fall ist. Dieser wurde mit der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode errichtet und hat eine Überdeckung von etwa 10 m. Eine Erklärung für das Temperaturverhalten besteht in der geringen Länge des Tunnels und darin, dass dadurch die Luft in regem direktem Austausch ist. Diese Korrelation trifft jedoch nicht auf alle Tunnelprojekte zu [17]. Sie hängt unter anderem von der Luftwechselrate und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel ab [36]. Am besten geeignet für eine geothermische Nutzung sind Tunnel, in denen die Temperatur innen möglichst geringen Schwankungen unterliegt [22].

Sofern durch die geothermische Nutzung eine Wärmeengewinnung angestrebt wird, wirkt sich eine Wärmequelle im Inneren des Tunnels positiv aus. Wenn hingegen das Tunnelbauwerk für Kühlzwecke genutzt werden soll, wirken sich Wärmequellen im Inneren des Tunnels negativ aus [36].

Feuchtigkeit im Bauteil

Die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Energiewand kann sich durch eine Veränderung der Feuchtigkeit im Bauteil, hervorgerufen durch unterschiedliche Randbedingungen an den beiden Bauteilseiten, ändern [35].

Länge des Bauwerks

Eine weitere Herausforderung bei dieser Art der Nutzung besteht darin, dass es sich um Linienbauwerke handelt. Die maximale Distanz zwischen dem am weitesten entfernten Leitungspunkt und dem Abnehmer sollte nicht viel größer als 300 m sein. Diesem Richtwert liegen wirtschaftliche Aspekte und Überlegungen zum Wärmetransport zu Grunde [23].

Vertragsverhältnisse

Problematisch ist oftmals die Schnittstelle zwischen dem Gebäudebetreibenden und den Energieversorgern. Da oft nicht direkt klar ist, wer von der Technologie monetär profitiert, liegt hier eine Hemmschwelle aus wirtschaftlicher Sicht vor. Dies gilt vor allem für Infrastrukturbauwerke wie z.B. Tunnel [17].

Thermische Bemessung

Ein weiteres Hemmnis für Massivabsorber und im Speziellen für Energiewände ist, dass es nur wenige Bemessungsprogramme und Analysemethoden gibt. Dies wiederum macht eine vollständige numerische Simulation notwendig, welche einen hohen Aufwand bedeutet. Eine Abschätzung der zu erwartenden Leistung ist schwierig, da nur eine begrenzte Anzahl an Erfahrungswerten zur Verfügung steht [37].

Ökonomische und umwelttechnische Aspekte

Ferner gibt es kaum Forschung zum Thema der ökonomischen und umwelttechnischen Aspekte der geothermischen Nutzung von Tunneln. Es wäre denkbar, dass Untersuchungen, die zeigen, dass der Einsatz dieser Technologie deutlich geringere CO₂-Emissionen als die Verwendung herkömmlicher Systeme hat, die geothermische Nutzung befeuert [38].

Abschließend ist zu erwähnen, dass das größte Potential dieser Elemente zum einen in der Nutzung des Synergieeffekts liegt, wodurch dem statisch ohnehin erforderlichen Element eine weitere Nutzung zukommt. Darüberhinausgehend ist der Mehraufwand während der Bauphase gering und der Mehrwert über die Nutzungsdauer des Bauwerkes sehr groß.

Gerade im innerstädtischen Bereich ist mit der hohen Dichte an Abnehmern ein großer Markt gegeben, um die Energie lokal nutzen zu können und damit eine stärkere Unabhängigkeit von äußeren Gegebenheiten des Energiemarkts zu erreichen.

3 Lainzer Tunnel (LT24 – Hadersdorf-Weidlingau)

3.1 Projektüberblick Lainzer Tunnel

Beim Lainzer Tunnel handelt es sich um ein Projekt, das in das europäische Eisenbahn-Hochleistungsstreckennetz (TEN-Achsen) eingegliedert ist. Im Konkreten wurde durch den Bau des in Abb. 3.1 rot markierten Streckenabschnittes die Weststrecke mit dem Wiener Hauptbahnhof verbunden [39]. Die Bauarbeiten zu diesem Abschnitt fanden zwischen 1999 und 2012 statt [40]. Der Tunnel besteht aus unterschiedlichen Teilbereichen, dessen Gliederung in Abb. 3.2 ersichtlich ist.

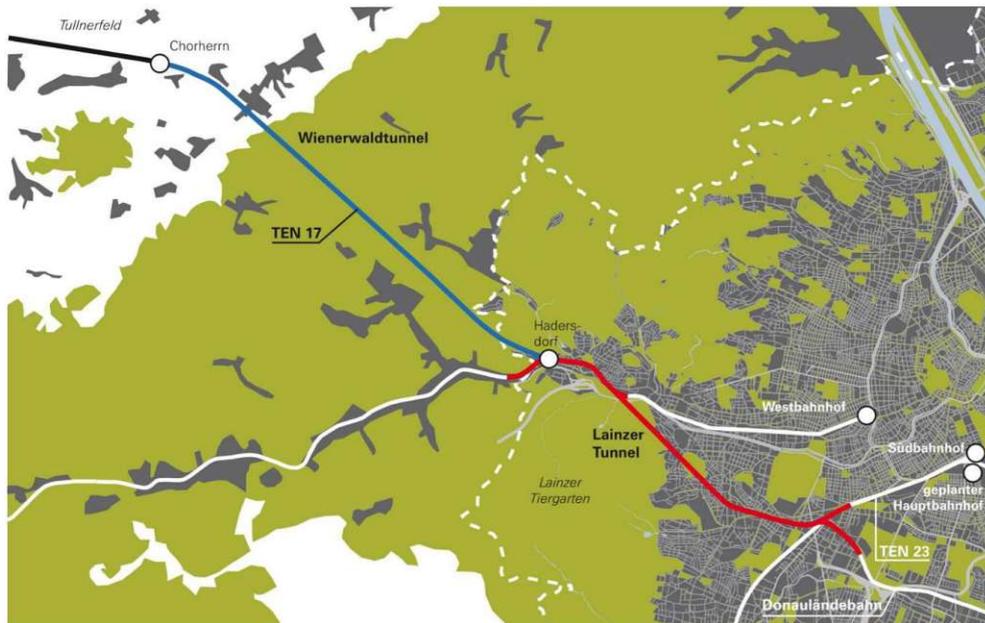


Abb. 3.1: Einordnung der Neubaustrecke in das Eisenbahnnetz [39]

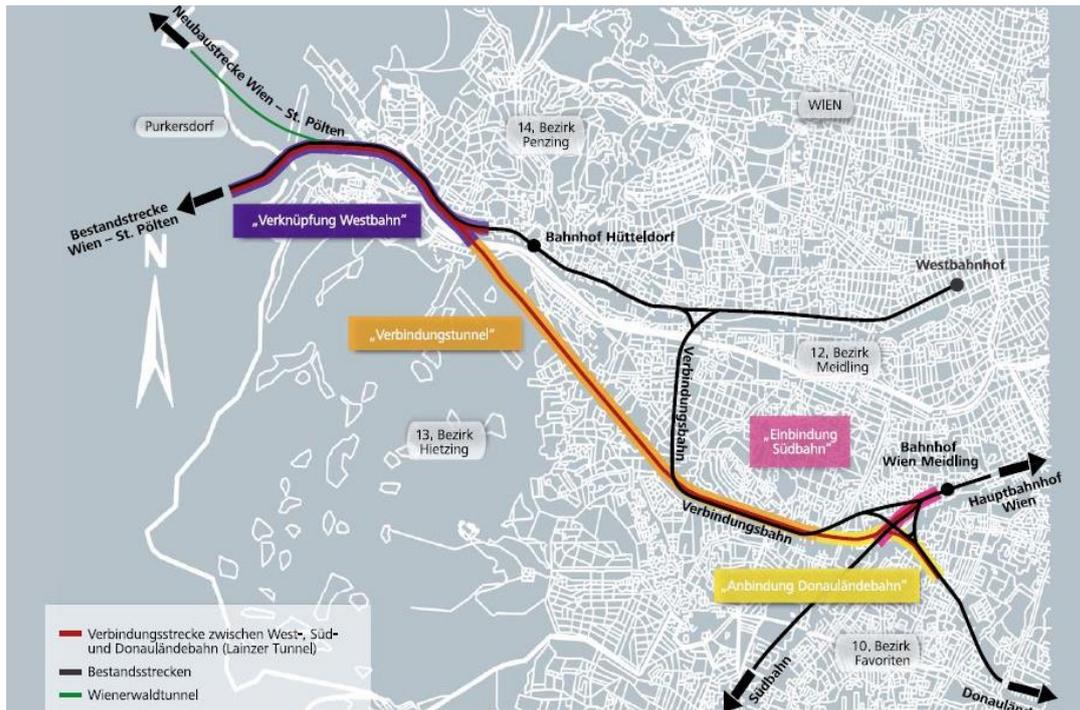


Abb. 3.2: Abschnitte des Gesamtbauwerks [41]

3.2 Baulos LT24 – Hadersdorf-Weidlingau

3.2.1 Einordnung in das Gesamtprojekt

Die Gliederung und Lokalisation der Bauabschnitte wird in der folgenden Abbildung dargestellt. Für diese Arbeit ist vor allem das Baulos „LT24 – Hadersdorf-Weidlingau“ von Bedeutung. Dieser Abschnitt befindet sich im Bereich der „Verknüpfung Westbahn“ und bildet somit das Verknüpfungsbauwerk zwischen dem Verbindungstunnel Richtung Wien Hauptbahnhof und dem Wienerwaldtunnel zur Bestandsstrecke Richtung St. Pölten [1].

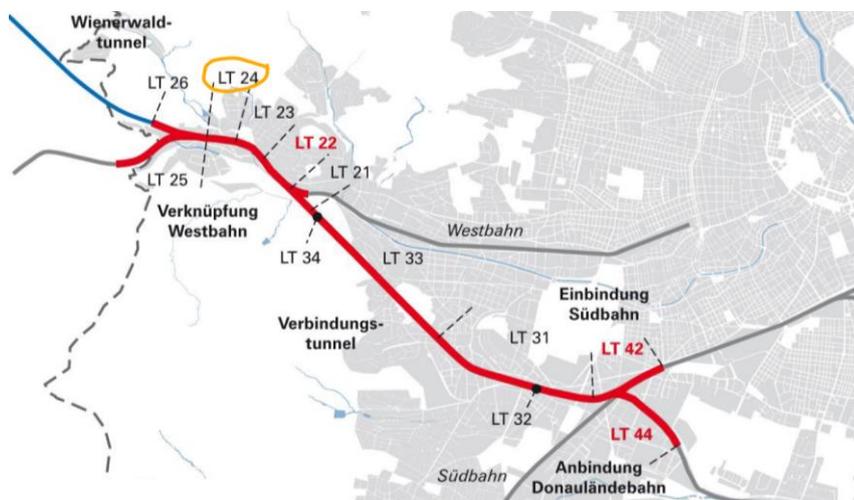


Abb. 3.3: Gliederung der Baulosabschnitte [39]

3.2.2 Bauliche Charakteristika dieses Abschnitts

Im Wesentlichen handelt es sich bei dem Abschnitt LT24 um eine große unterirdische Weichenhalle sowie zwei, an der Oberfläche liegende, Haltestellen „Hadersdorf-Weidlingau“ (heute Wien Hadersdorf) und „Weidlingau-Wurzbachtal“ (heute Wien Weidlingau).

Die Weichenhalle, auf der in der vorliegenden Arbeit der Fokus liegt, wurde mittels Deckelbauweise errichtet und befindet sich im Bereich der Haltestelle „Hadersdorf-Weidlingau“. Sie ist, je nach Abschnitt, ein bis zweischiffig.

Der gesamte Bauabschnitt lässt sich folgendermaßen beschreiben: Der Deckel ist bereichsweise unterschiedlich ausgeführt; abschnittsweise als Plattenbalkendecke oder einer teilweise gevouteten Vollplatte. Der Deckel liegt auf der vorhergehend errichteten Bohrpfahlwand auf. Im Abschnitt der Haltestelle Hadersdorf-Weidlingau ist der Deckel zusätzlich von einer Mittelwand gestützt. Dies führt zu einer Verringerung der Stützenweite und erzeugt eine Auflast für die Bodenplatte. Dadurch entsteht ein zweischiffiger Bereich. Die Überschüttung beträgt im Regelbereich der Weichenhalle 1,5-2,5 m. Um eine ausreichende Sicherheit der Bodenplatte gegen Aufschwimmen sicherstellen zu können, hat sie eine Plattenstärke von 2,0-3,0 m. Dabei wurde diese, wie auch die Innenschale (35 cm dick), nach dem Konzept der weißen Wanne errichtet. Sie ist mit der Außenschale (Bohrpfahlwand) kraftschlüssig verbunden und bildet somit eine Verbundinnenschale [1].

3.2.3 Geothermische Anlage

In den Kapiteln „2.4 Oberflächennahe Geothermie“, „2.5 Massivabsorber“ und insbesondere im Kapitel „2.9 Energiewände“ wurden Sinnhaftigkeit, Vorzüge und Funktionsweise einer geothermischen Anlage im Tunnelbau bereits diskutiert. Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau der Anlage des Lainzer Tunnels erläutert. In der Abb. 3.4 ist das Schema der Verbindungsleitungen zwischen dem Tunnel und dem zu versorgenden Gebäude zu sehen.

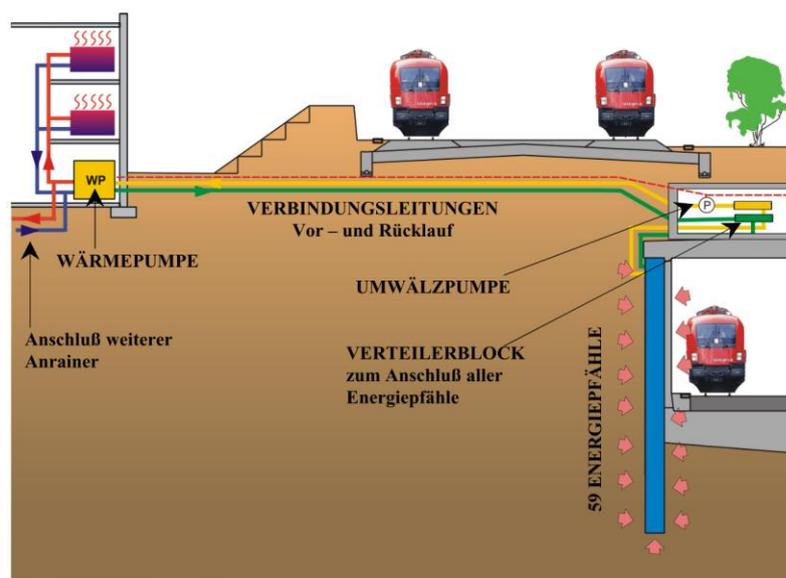


Abb. 3.4: Schema der geothermischen Anlage [1]

Die unterirdische Weichenhalle wird durch eine aufgelöste Bohrpfehlwand gestützt. Die Bohrpfehle haben Durchmesser von 0,9 oder 1,2 m und reichen bis in eine Tiefe von 22 m. Jeder dritte dieser Bohrpfehle wurde thermisch aktiviert. Sie weisen im Durchschnitt eine Länge von 17,1 m auf. Somit sind im betrachteten Abschnitt 59 Energiepfehle mit insgesamt 80 Absorberkreisen vorhanden. Die Leitungen werden über eine Sammelleitung im Verteilerraum zusammengeführt. Von dort ausgehend, führt eine Verbindungsleitung zum Endabnehmer, bei dem sich auch die Wärmepumpe befindet [1].

Die Energiepfehle wurden zwischen 12.09.2001 und 16.05.2002 eingebaut. Bilder dieser Phase sind in Abb. 3.5 zu sehen. Daran anschließend wurde die gewonnene Wärmeenergie zwischen 2004 und 2022 genutzt, um ein angrenzendes Schulgebäude zu beheizen. In der Tab. 3.1 sind die wesentlichen technischen Daten der geothermischen Anlage zusammengefasst.



Abb. 3.5: links: Bewehrungskörbe mit Absorberleitungen; rechts: Stoß der Bewehrungskörbe

Jahres-Wärmearbeit*	214 MWh
Spitzen-Wärmeleistung*	150 kW
Gesamter Wasserstrom	51,6 m ³ /h
Max. Druckverlust des gesamten Wärmetauschers	102 kPa
Anzahl Absorberkreise	80 Stk.
Rohrdimension Absorberkreise	25 x 2,3 mm
Material Absorberkreise	PE-HD (DIN 8075/8075)
Druckstufe	PN 10
Absorberkreise – Gesamtrohrlänge	9709 m
Anbindeleitungen – Gesamtrohrlänge	13754 m
Anzahl Bohrpfähle	59 Stk. a ca. 17,1 m
Außendurchmesser Bohrpfahlarmierung	102 cm
Ausgerüstete Tunnellänge	252 m

*) die Werte geben die reine Verdampferleistung an der Wärmepumpe an und inkludieren nicht die Antriebsenergie der Wärmepumpe, die ca. ein Drittel bis ein Viertel des gesamten Energieoutputs der Wärmepumpe ausmacht.

Tab. 3.1: Technische Daten der Erdwärmeanlage [1]

3.3 Grundlagen aus vorhergehender Forschungsarbeit

Die wichtigste vorhergehende Forschungsarbeit zum gegenständlichen Projekt ist in der bereits erwähnten Dissertation von Markiewicz [1] im Kapitel 8 „Versuchsanlage „LT24 – Hadersdorf-Weidlingau““ enthalten. Darin wird vor allem auf die Bauphase, die Messeinrichtungen, den Betrieb der Versuchsanlage sowie das erste Jahr der Anlage mit durchgängigem Betrieb eingegangen.

Eine weitere Grundlage, aus der aufbereitete Daten entnommen werden können, ist die interdisziplinäre Seminararbeit von Glötzl zum Thema „Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie®-Absorberanlagen am Beispiel Lainzer Tunnel, Los LT24 – Hadersdorf-Weidlingau“. Darin sind die Messdaten der Heizperioden von 2004/05 bis 2009/10 ausgewertet [42].

Die dritte umfangreiche Quelle ist die Ausarbeitung der iC-Consultanten für die MA 27 in Kooperation mit der TU Wien mit dem Titel „Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie®-Absorberanlagen- Grundlagenuntersuchung und Planungsleitfaden“ [22].

Eine weitere sehr bekannte und oft zitierte Veröffentlichung stammt von Brandl und trägt den Titel „Energy foundations and other thermo-active ground structures“ [43]. Auch hier werden Messdaten präsentiert und es wird allgemein auf das Thema der Massivabsorber eingegangen.

In den folgenden Unterkapiteln werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen aus den vorliegenden Forschungsarbeiten hervorgehoben, die entscheidenden Parameter angeführt und daraus resultierende Annahmen getroffen.

3.3.1 Positionierung der Messeinrichtungen an den Pfählen

Da es sich bei diesem Projekt um eines der ersten seiner Art handelte, wurden bei der Errichtung umfangreiche Messsensoren in den Bohrpfählen installiert. Einerseits zur Überwachung der geothermischen Energienutzung und andererseits, um eine wissenschaftliche Untersuchung zu ermöglichen [1].

In der Abb. 3.6 ist ein Plan dargestellt, der eine Übersicht zu allen vorhandenen thermisch aktivierten Bohrpfählen und deren Messeinrichtungen gibt. Die Lage der Messeinrichtungen in den einzelnen Pfählen wird an einem Beispiel in Abb. 3.7 gekennzeichnet. In der Tab. 3.2 ist eine übersichtliche Zusammenfassung der Daten aller Messsensoren gegeben.

Es besteht bei 5 Pfählen die Möglichkeit der Temperaturmessung jeweils in drei verschiedenen Tiefenlagen, sowie an einem dieser Pfähle (S_07_20) eine zusätzliche detaillierte Dehnungsmessung. Bei einem weiteren Pfahl befinden sich Temperatursensoren im Erdreich neben dem Betonkörper. Auf letztere wird jedoch in der folgenden Arbeit nicht näher eingegangen. Ebenso erfolgt an dieser Stelle auch keine nähere Betrachtung der Dehnungsmessungen.

Wichtig zu erwähnen ist, dass die theoretische Positionierung der Messsensoren bekannt ist, allerdings ist es nicht möglich mit Sicherheit zu sagen, ob diese auch während des Einbaus genau an dieser Stelle verblieben sind. Somit herrscht hierdurch eine gewisse Unsicherheit.



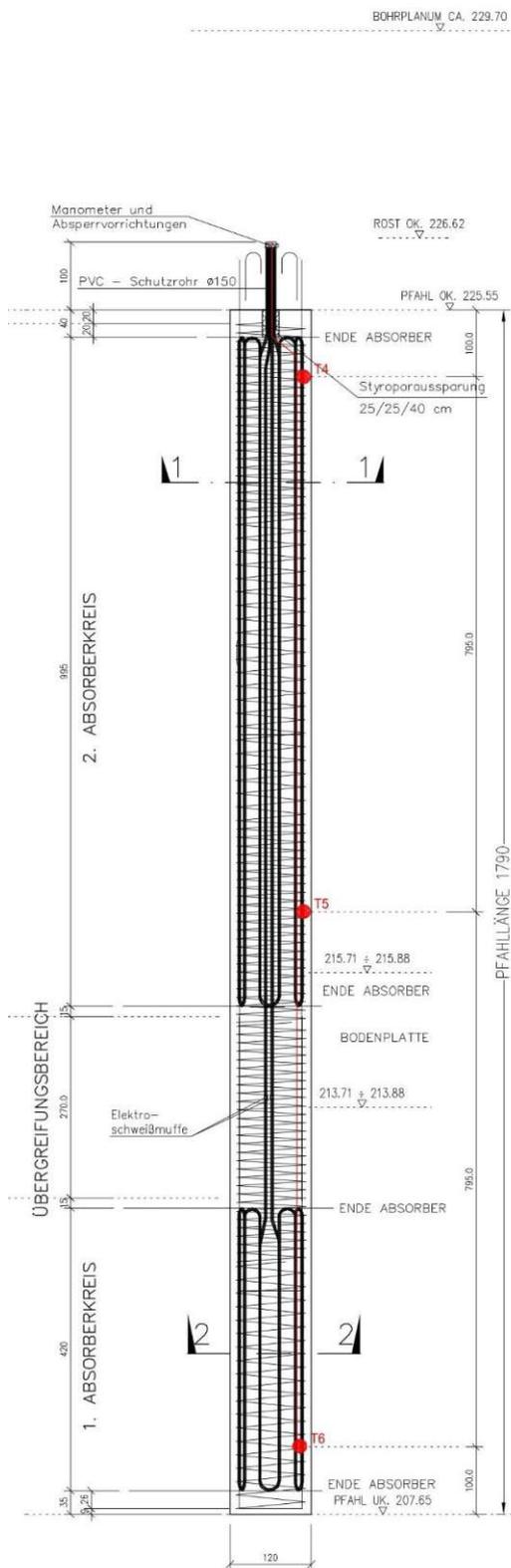
Abb. 3.6: Übersicht der Bohrpfähle sowie der installierten Messensoren [1]

Pfahl	Tiefe in [m] ab Pfahl-OK	Position	Messwert	Messgerät
S-7-20	1,00	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-7-20	1,00	Pfahlaufseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	1,00	Pfahlinnenseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	5,00	Pfahlaufseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	5,00	Pfahlinnenseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	9,00	Pfahlaufseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	9,00	Pfahlinnenseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	9,50	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-7-20	14,00	Pfahlaufseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	14,00	Pfahlinnenseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	18,00	Pfahlaufseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	18,00	Pfahlinnenseite	Temperatur + Dehnung	Geokon
S-7-20	18,00	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-10-11	1,00	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-10-11	8,95	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-10-11	16,90	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-11-12	1,00	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-11-12	8,85	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-11-12	16,70	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-13-02	1,00	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-13-02	8,15	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-13-02	15,30	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-14-11	1,00	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-14-11	8,05	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-14-11	15,10	Pfahlaufseite	Temperatur	PT-100
S-16-02	2,10	im Erdreich	Temperatur	PT-100
S-16-02	2,10	im Erdreich	Temperatur	PT-100

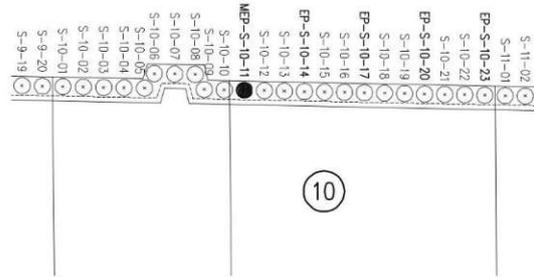
Tab. 3.2: Anführung aller Messeinrichtungen [1]

In der Abb. 3.7 wird die Leitungsführung in einem Bohrpfahl (S_10_11) dargestellt. Die Dimension der Absorberleitungen kann mit 25x2,3 mm dem Schnitt derselben Abbildung entnommen werden. Abb. 3.8 zeigt einen Schnitt, in dem die Lage der Messeinrichtungen in der Tunnelwand erkennbar ist.

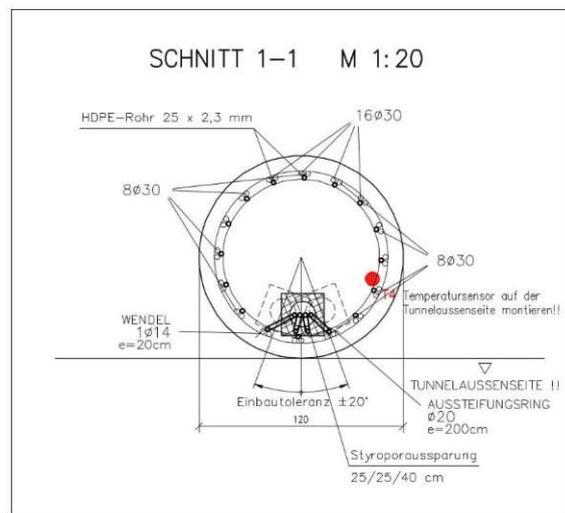
ANSICHT M 1:50



ÜBERSICHT GRUNDRISS



SCHNITT 1-1 M 1:20



SCHNITT 2-2 M 1:20

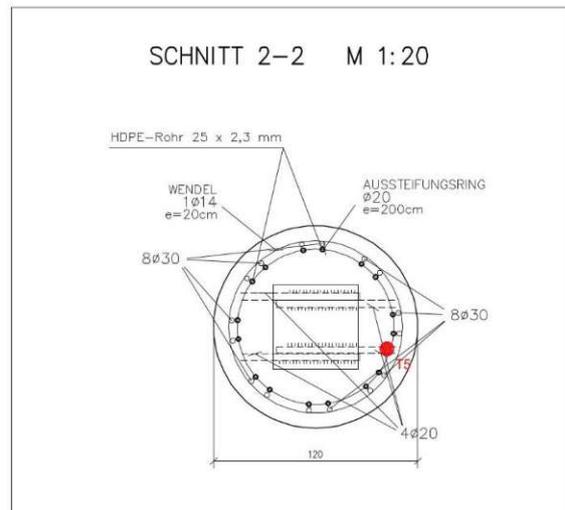


Abb. 3.7: Lage der Absorberkreise und der Temperatursensoren im Pfahl S_10_11 [44]

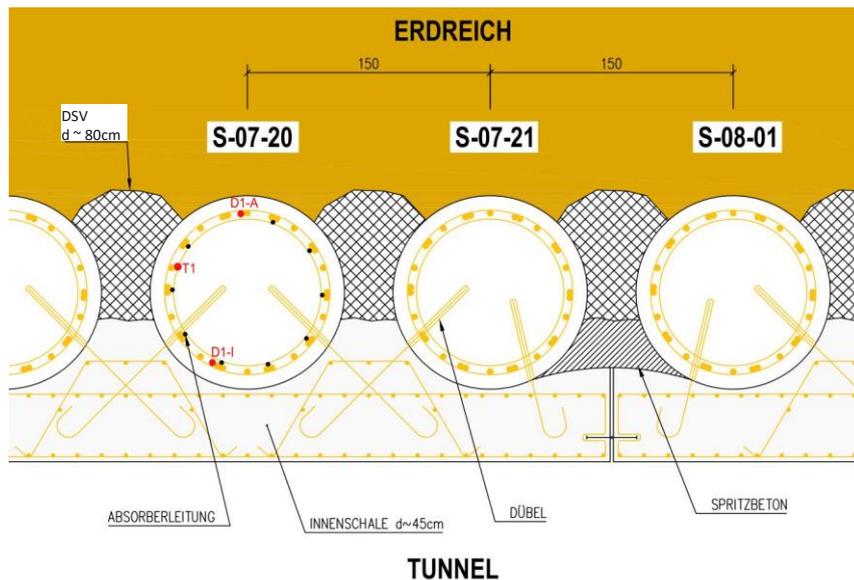


Abb. 3.8: Schnitt Bohrpfahlwand mit Lage der Temperatur- und Dehnungssensoren [1]

3.3.2 Ergänzende Sensoren

Zusätzlich zu den Messsensoren in den Pfählen wurden die Vorlauftemperatur und die Rücklauftemperatur der Sammelleitung, die Temperatur im Verteilerraum sowie die Außenlufttemperatur dokumentiert, um Rückschlüsse auf die Energiegewinnung und den Einfluss der Außenlufttemperatur ziehen zu können [1].

3.3.3 Auslesen der Temperaturmessdaten

Während der Bauphase wurden die Messdaten kontinuierlich händisch erfasst. Die initiale Messung fand am 15.05.2002 statt [1]. Eine automatische Datenerfassung wurde ab dem 22.01.2004 durch Einbau eines Datenloggers ermöglicht. Diese Erfassung wurde laufend mit kurzen Unterbrechungen in der Vergangenheit fortgeführt. Dabei wurden die Messwerte im Abstand von 10 bis 60 Minuten aufgenommen und lokal im Datenlogger, welcher sich im Verteilerraum in der Station „Hadersdorf-Weidlingau“ befindet, abgespeichert. Diese wurden in weiterer Folge regelmäßig ausgelesen.

3.4 Erforderliche Parameter zur Modellierung

Ziel dieser Arbeit ist, das thermische Verhalten der Bohrpfahlwand zu simulieren, um daraus Erkenntnisse über die Einflüsse der diversen Randbedingungen abzuleiten und um Erfahrungen für die Modellierung und Dimensionierung zukünftiger Energiewände zu gewinnen. Die Kalibrierung des Modells wird dabei mit Hilfe der Messdaten vorgenommen. Die folgende Auflistung beinhaltet eine Zusammenfassung der Eingangs- und der zu bestimmenden Werte. Es wird jeweils die Wahl der Anfangswerte und der Kenntnisstand beschrieben. Des Weiteren wird definiert, welche Daten für die Kalibrierung herangezogen werden und anhand welcher Daten die Kalibrierung validiert wird. Darüberhinausgehend ist

jeweils das Kapitel angeführt, in dem theoretische Überlegungen sowie eine Festlegung des Anfangswerts für die jeweilige Variable erfolgen.

Variable	Anfangswerte	Kenntnisstand	Verwendung	Kapitel
Referenzbereich/ Modellabmessung	für die Modellierung festgelegt	gewählt auf Basis der Planunterlagen	nicht variiert	3.4.1
Messpfahl	für die Modellierung festgelegt	gewählt auf Basis der Planunterlagen	nicht variiert	3.4.1
Zeitraum	für die Modellierung festgelegt	gewählt	nicht variiert	3.4.2
Bodenaufbau	aus Baugrund- untersuchungen entnommen	mit geringer Unsicherheit behaftet	nicht variiert	3.4.3
Bodenkennwerte	aus Baugrund- untersuchungen entnommen	mit geringer Unsicherheit behaftet	können zur Kalibrierung variiert werden	3.4.4
Wärmeleitfähigkeiten	wurden auf Basis normativer Angaben festgelegt	mit Unsicherheit behaftet	können zur Kalibrierung variiert werden	3.4.4
Wärmekapazitäten	wurden auf Basis normativer Angaben festgelegt	mit Unsicherheit behaftet	können zur Kalibrierung variiert werden	3.4.4
Porosität	aus Erfahrungswerten bestimmt	mit Unsicherheit behaftet	kann zur Kalibrierung variiert werden	3.4.5
Grundwasserfließ- geschwindigkeit	wurde näherungsweise berechnet	mit Unsicherheit behaftet	kann zur Kalibrierung variiert werden	3.4.6
Strömungs- geschwindigkeit Absorberleitung	wurde näherungsweise berechnet	mit Unsicherheit behaftet	kann zur Kalibrierung variiert werden	3.4.7
Außentemperatur	Messung vor Ort	bekannt	nicht variiert	3.5.1
Tunnelinnen- lufttemperatur	durch theoretische Überlegungen und Literaturstudie angenommen	mit Unsicherheit behaftet	kann zur Kalibrierung variiert werden	3.5.2
Temperaturen Messpfahl	Messung vor Ort	bekannt	dienen der Validierung	3.5.3
Temperaturen Vorlauf/Rücklauf	Messung vor Ort	bekannt	dienen der Kalibrierung	3.5.4
Anfangstemperaturen in der Struktur und dem Boden	mit Hilfe einer Simulation ermittelt	mit Unsicherheit behaftet	dienen der Kalibrierung	3.7.1.2

Tab. 3.3: Eingangparameter COMSOL Multiphysics – Vergleichsmodellierung

Die Kalibrierung erfolgt durch Variation jener Werte, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Validierung der Berechnungsergebnisse erfolgt letztlich anhand der bekannten Temperaturmessdaten im Energiepfahl. Genauer dazu findet sich im Kapitel 3.8.

3.4.1 Wahl des Messpfahls sowie des Referenzbereichs zur Modellierung

Die Energiewand wird repräsentativ anhand eines kurzen Teilstücks mit zwei Symmetrieebenen modelliert, da die gesamte Länge der Energiewand von 252 m sowohl für die Modellierung als auch für die Berechnung ein zu großes Ausmaß aufweist. Das gewählte Teilstück beinhaltet den Messpfahl S_07_20, da dieser mit den meisten Sensoren ausgestattet ist und somit die bestmögliche Voraussetzung zur Kalibrierung und Validierung bietet.

Die folgende Abbildung zeigt die Lage des gewählten Pfahls innerhalb der geothermischen Anlage. Er befindet sich im Block 7 des Bauabschnitts LT24. Die Abb. 3.10 zeigt die gewählten äußeren geometrischen Abmessungen des Modellabschnitts.

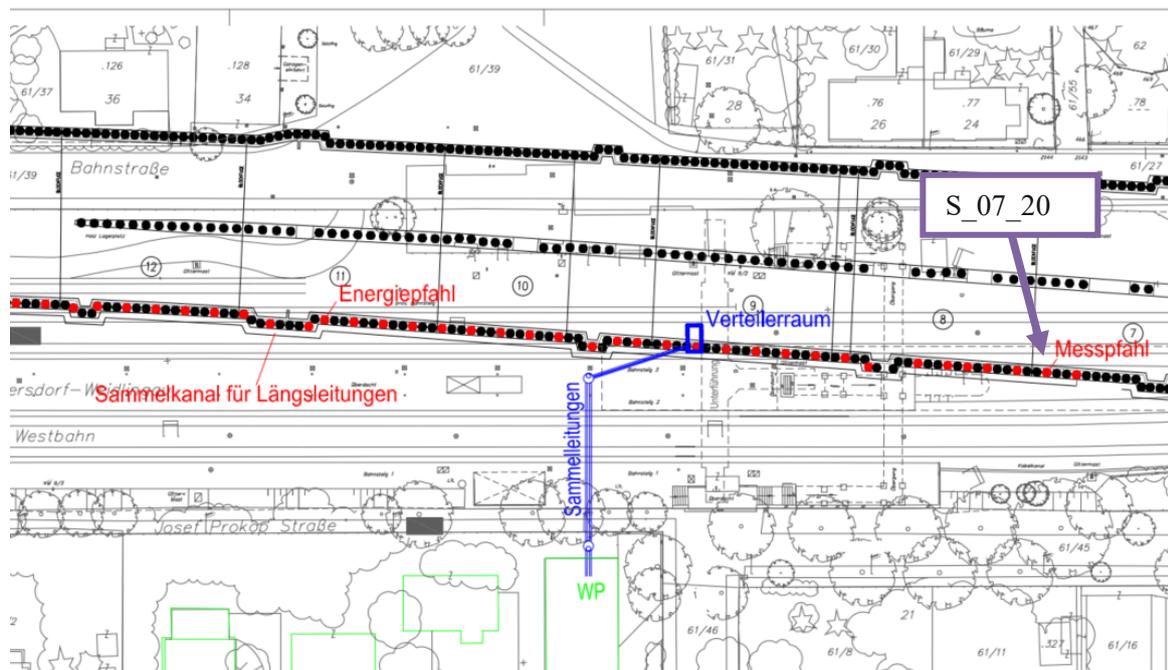


Abb. 3.9: Lage des untersuchten Messpfahls [1]

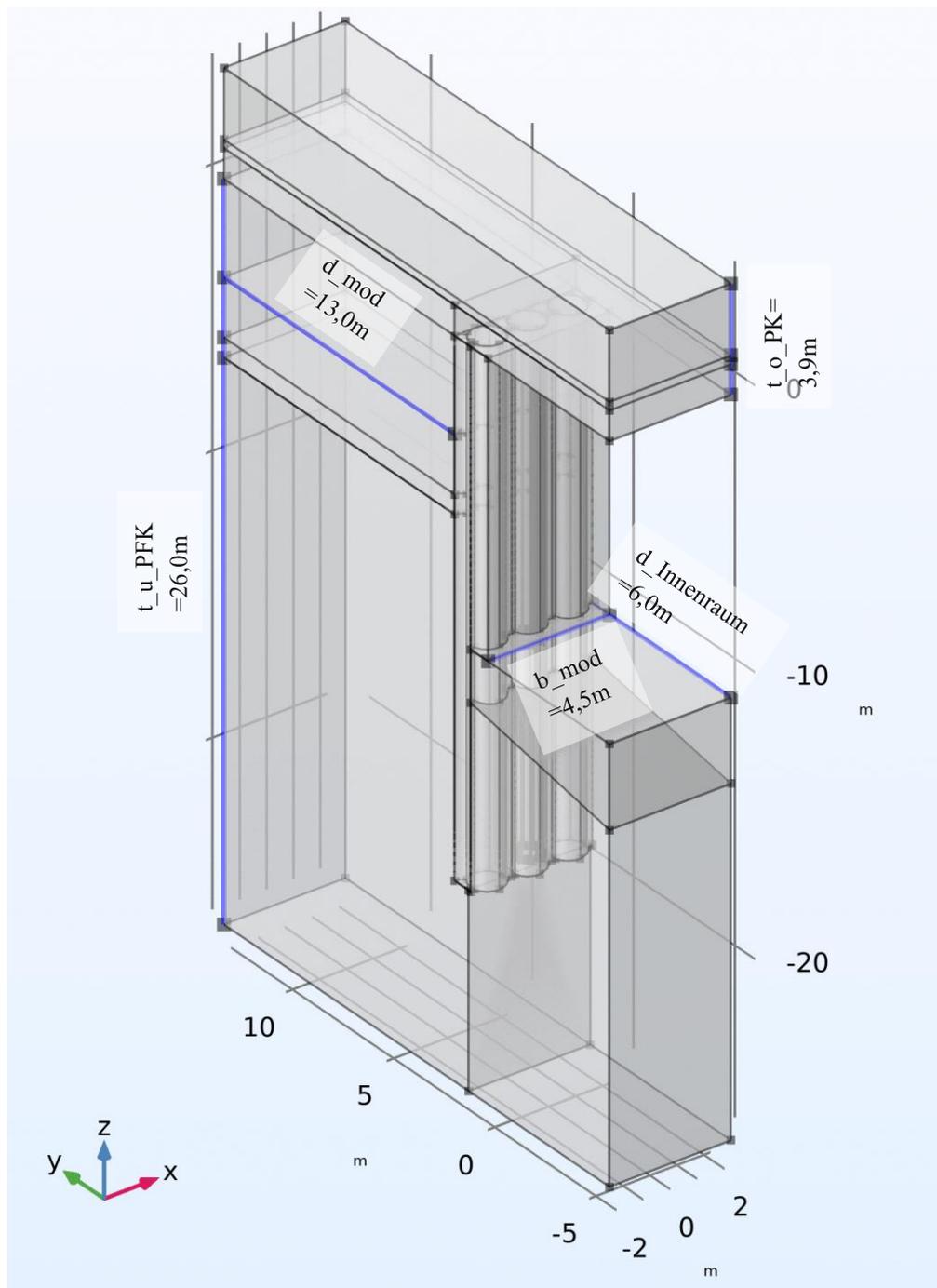


Abb. 3.10: Modellabmessungen

Nachdem jeder dritte Pfahl als Energiepfahl ausgeführt wurde, befindet sich der modellierte Energiepfahl in der Mitte des Modells, mit jeweils einem benachbarten unbelegten Pfahl auf jeder Seite. Damit werden die Symmetrieebenen genutzt und es ergibt sich eine Modellbreite von 4,5 m (b_{mod}).

Der Querschnitt des Tunnelprofils wird bis zu seiner Breite von 6,0 m ($d_{Innenraum}$) modelliert und das Erdreich bis zu einer Breite von 13,0 m (d_{mod}). Diese Modellbreite wurde

gewählt, da der Einfluss auf weiter entfernte Bereiche als gering anzunehmen ist und mit fortlaufender Entfernung stark abnimmt.

Der Boden wird bis zu einer Tiefe von 26 m unter dem Pfahlkopf modelliert (t_u_PFK) wodurch sich eine Tiefe von 7,0 m unter dem Pfahlfuß ergibt. Die Tiefe oberhalb des Pfahlkopfs ergibt sich zu 3,9 m (t_o_PFK).

In der Abb. 3.11 ist eine Übersicht des Modellabschnitts in COMSOL Multiphysics zu sehen. Dabei ist der violett markierte Pfahl jener, der geothermisch belegt ist. Der Achsabstand zwischen den Bohrpfählen beträgt 1,5 m und die einzelnen Bohrpfähle haben einen Durchmesser von 1,2 m. Zwischen den Bohrpfählen befinden sich DSV-Körper, welche in der Abb. 3.11 rechts orange markiert sind. Sie dienen der Abdichtung zwischen den Bohrpfählen.

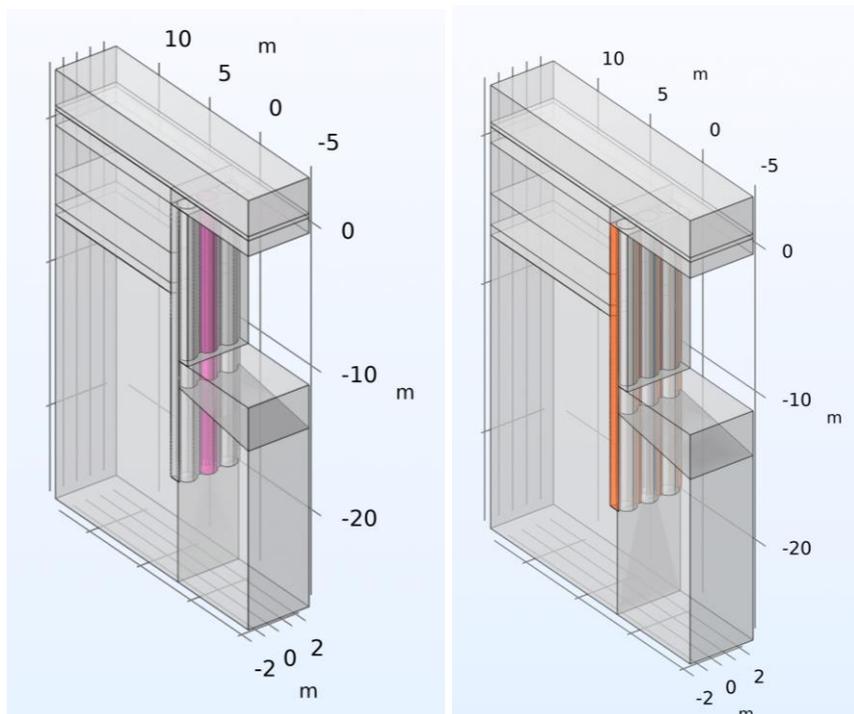


Abb. 3.11: links: Modellübersicht mit Energiepfahl in violett; rechts: DSV-Körper orange markiert

Die Abb. 3.12 zeigt die Leitungsführung und die Lage der Messeinrichtungen des zu untersuchenden Energiepfahls S_07_20. Wichtig zu erwähnen ist, dass der Messpfahl mit zwei Absorberkreisen ausgestattet ist. Dies trifft nur auf etwa ein Drittel der Energiepfähle dieser Anlage zu. Der erste Absorberkreis liegt unter dem Niveau der Bodenplatte und ist somit beidseitig erdberührt. Der zweite liegt genau im Bereich der Tunnelöffnung und ist auf der Außenseite erdberührt und auf der Innenseite durch die Tunnelinnluft beeinflusst.

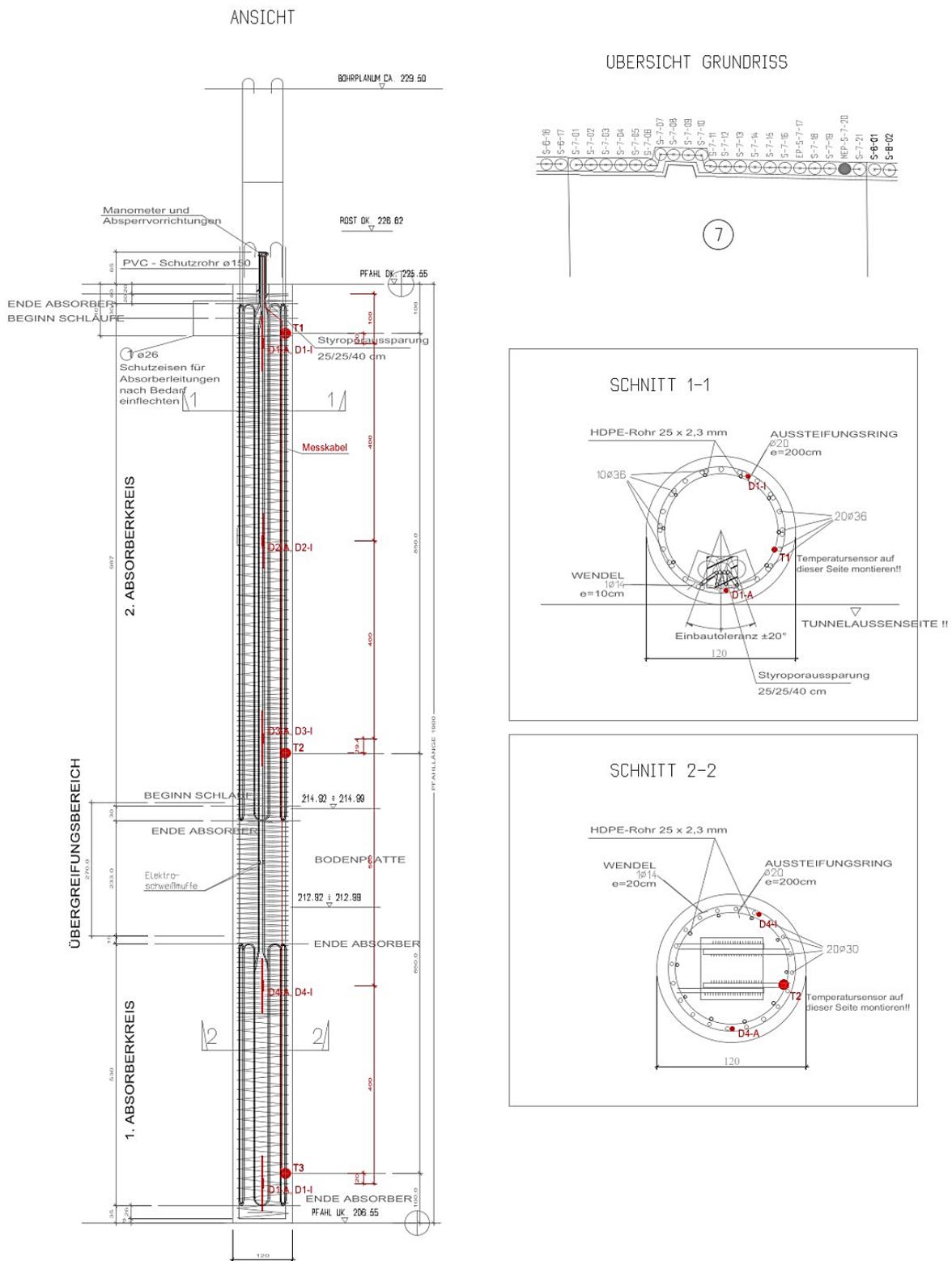


Abb. 3.12: Absorberschema im Messpfahl S_07_20 [1]

3.4.2 Zeitraum

Für die Simulationsberechnungen wird der Referenzzeitraum von einem Jahr herangezogen, um die jahreszeitlichen Veränderungen der Energienutzung und die damit einhergehenden Auswirkungen auf den Energiepfahl beobachten zu können.

Das Referenzjahr soll das typische Temperaturverhalten bestmöglich abbilden und somit eine „Normheizperiode“ sein. Aufgrund dieser Voraussetzungen wurde der Zeitraum von Anfang August 2005 bis Ende Juli 2006 gewählt.

3.4.3 Untergrundverhältnisse

In der Abb. 3.13 ist eine Übersicht zu den Bodenaufschlüssen, welche in dem relevanten Bauabschnitt vorgenommen wurden, zu sehen. Die Kernbohrungen KB14/19, KB1 sowie KB1c sind dem Messpfahl am nächsten. Der zu untersuchende Pfahl liegt zwischen den Bodenquerprofilen 2 und 3, welche für die weitere Modellierung als Referenz herangezogen werden.

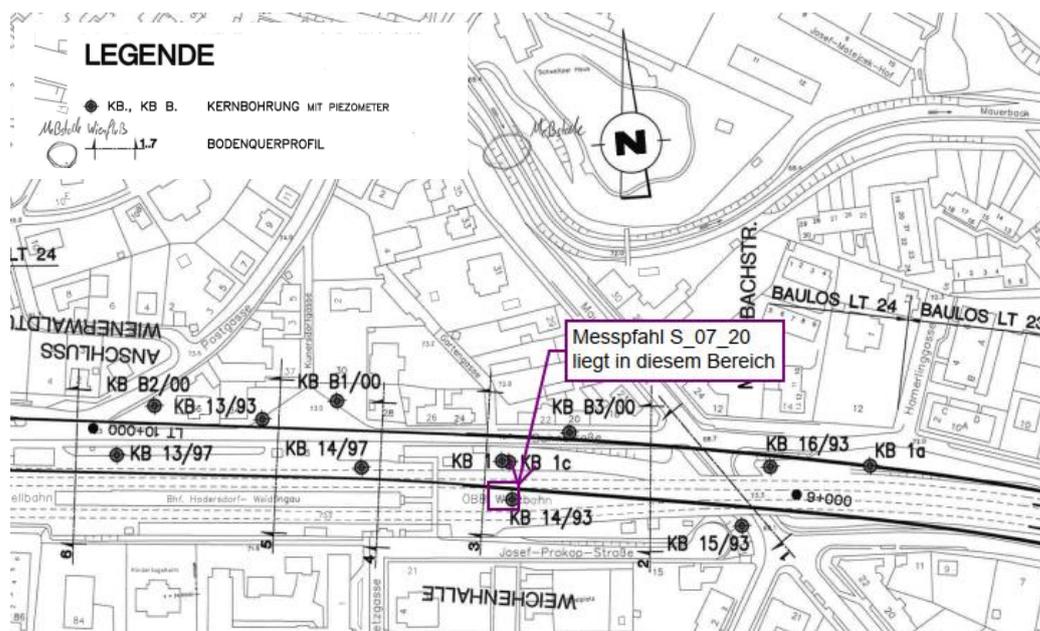


Abb. 3.13: Lage der Bodenaufschlüsse [45]

Zum Zeitpunkt der Kernbohrung lag der Grundwasserspiegel in diesem Bereich bei etwa 6-7 m u. GOK, das mit den in Kapitel 3.4.6.1 erwähnten Daten übereinstimmt [46].

Die folgenden beiden Querprofile definieren den Bodenaufbau für die Modellierung. Die in der Skizze zur Josef-Prokop-Straße näher gelegene Bohrpfahlwand ist geothermisch belegt. Die Schichtkomplexe variieren in ihrer Mächtigkeit und dem Vorkommen geringfügig. Es handelt sich Großteiles um bindigen, konsolidierten Boden. Für den Bodenaufbau in der Modellierung wird der in Tab. 3.4 festgelegte Schichtaufbau verwendet.

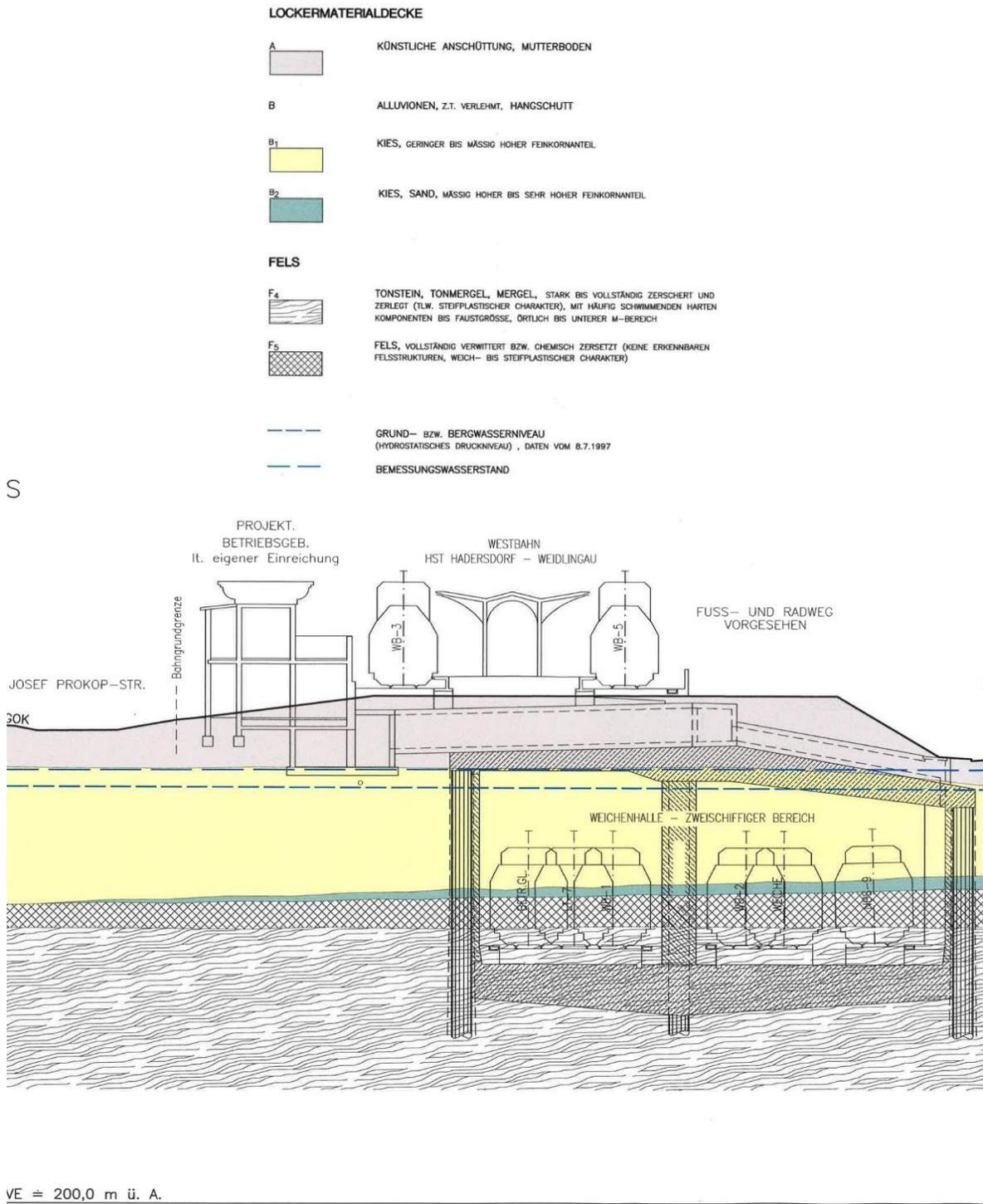


Abb. 3.14: Bodenquerschnitt 2 [47]

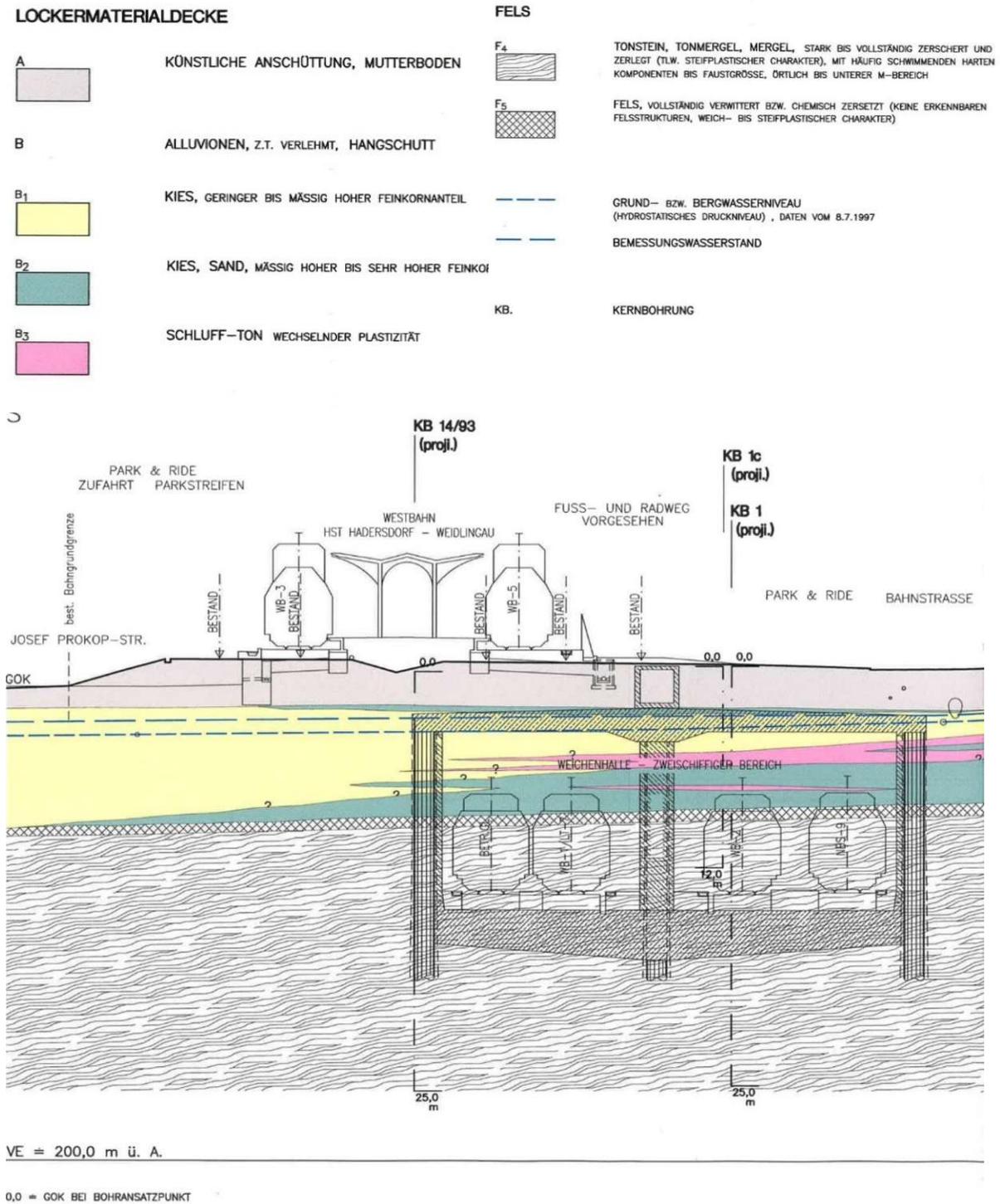


Abb. 3.15: Bodenquerprofil 3 [48]

Tiefe Absolut [m]	Tiefe ab GOK [m]	Schichtdicke [m]	Schichtkomplex	Kurzbeschreibung
229,05	0,0	2,0	A	künstliche Anschüttung, Mutterboden
227,05	2,0			
226,75	2,3	0,3	B ₂	Kies, Sand , mäßig hoher bis sehr hoher Feinkornanteil
		4,5	B ₁	Kies , geringer bis mäßig hoher Feinkornanteil
222,25	6,8	2,1	B ₂	Kies, Sand , mäßig hoher bis sehr hoher Feinkornanteil
220,15	8,9			
219,45	9,6	0,7	F ₅	Fels (Flysch) , vollständig verwittert bzw. chemisch zersetzt
		12,9	F ₄	Tonstein, Tonmergel, Mergel (Flysch) , stark bis vollständig zerschert und zerlegt
206,55	22,5			

Tab. 3.4: Schichtaufbau Modell

Schichtkomplex	Reibungswinkel	Kohäsion	Wichte	Wichte unter Auftrieb	Wasserdurchlässigkeit
	φ [°]	c [kN/m ²]	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	k _f [m/s]
A	30	0	20	10	/
B ₁	35	0	22	12	5·10 ⁻⁴ bis 3·10 ⁻³
B ₂	30	5	21,5	11,5	5·10 ⁻⁵ bis 2·10 ⁻⁴
F ₄	20	60	22,5	12,5	/
F ₅	20	25	22	12	/

Tab. 3.5: Relevante Bodenparameter für diesen Bereich [49]

3.4.4 Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (bei konstantem Druck)

Da bei den Bodenaufschlüssen die thermischen Parameter nicht direkt festgestellt wurden, muss hierfür eine Annahme getroffen werden. Im SIA-Leitfaden des Schweizer Ingenieur- und Architektenvereins zur "Nutzung der Erdwärme mit Foundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen" sind hierfür Richtwerte angegeben, an denen sich die folgenden Annahmen orientieren [50]. Auch die ÖBV-Richtlinie zur Erdwärmenutzung mit Massivabsorbern gibt Richtwerte für diese wichtigen Bodenkenngrößen an [51].

Schichtkomplex	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmeleitfähigkeit λ	spezifische Wärmekapazität c	spezifische Wärmekapazität c
	trocken	gesättigt	trocken	gesättigt
	[W/(mK)]	[W/(mK)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
A	2,0 (1)	-	1500 (3)	-
B ₁	0,3 (2)	1,8 (1)	1200 (1)	2200 (1)
B ₂	0,3 (2)	1,7 (1)	1000 (1)	2200 (1)
F ₄	/	2,3 (1)	/	1000 (3)
F ₅	/	2,3 (1)	/	1000 (3)

Beton	/	2,1	/	1000
Absorberleitung (PE-HD)	/	0,4	/	1900 (4)
Absorberflüssigkeit	/	0,6	/	3810 (5)

(1) SIA [50]

(2) https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php

(3) https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php

(4) https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyethylen-pe-hd?n=1411_1

(5) Glötzl [42]

Tab. 3.6: Übersicht Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

3.4.5 Porosität

In dem Bodengutachten wird für die grundwasserführenden Schichten B1 und B2 kein Wert der Porosität angegeben. Da es sich um kiesige bis sandige Schichten handelt, kann von einer Porosität $n = 0,3$ [-] ausgegangen werden. Diese Annahme ist ein Erfahrungswert.

3.4.6 Grundwasser

3.4.6.1 Grundwasserspiegel

Laut den Grundwasserganglinien, welche zwischen 1992 und 1998 aufgenommen wurden, befindet sich der Großteil des Bauwerkes ganzjährig im Grundwasser [52]. Dies ist auch in der Abb. 3.14 sowie Abb. 3.15 ersichtlich.

3.4.6.2 Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit lässt sich mit Hilfe der Formel (3.1) berechnen. Die Werte der Wasserdurchlässigkeit (k_f -Wert) sind im Kapitel 3.4.3 angeführt und aus dem Bodengutachten bekannt [49]. Diesem ist zu entnehmen, dass der Wasserzutritt überwiegend aus den Schichtkomplexen B1 sowie B2 erfolgt und das Verhalten der weiteren Schichten eine deutlich

untergeordnete Rolle spielt [49]. Das Grundwasserspiegelgefälle wird mit 0,5-2,5 % in den Regelbereichen ermittelt. Das Wasser fließt in dem Bereich der Energiewand in Richtung SSO bis SO und ist steil schräg bis annähernd normal zum Bauwerk ausgerichtet [49].

$$v = k_f \cdot i \quad (3.1)$$

3.4.6.3 Wahl der Werte für die Modellierung

Aufgrund der beschriebenen Fließrichtung des Grundwassers strömt dieses auf jener Bauwerksseite zu, die nicht geothermisch belegt ist. Somit wird zunächst davon ausgegangen, dass an der betrachteten gegenüberliegenden Energiewand keine Grundwasserströmung vorherrscht. Dem zu Grunde liegt auch die Angabe, dass Düker das Wasser unter dem Tunnel durchleiten und somit auf der Energiewandseite nur punktuell Grundwasser eingeleitet wird, das von der Wand wegströmt. Jedenfalls wird dieses jedoch nicht gleichmäßig über die gesamte Länge der Tunnelwand verteilt sein. Diese Annahme wurde im Rahmen der Parameterstudie geprüft und es hat sich ergeben, dass ein Ansetzen der Grundwasserfließgeschwindigkeit in der Modellierung nicht notwendig ist.

3.4.7 Strömungsgeschwindigkeit in den Absorberleitungen

3.4.7.1 Theoretische Grundlagen

In verschiedenen Simulationen von DiDonna [36] konnte gezeigt werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit in den Absorberleitungen einen deutlich geringeren Einfluss auf die Energiegewinnung hat als andere Parameter. Diese sind die Temperaturdifferenz zwischen der Tunnelinnenwand und dem Boden, der Abstand der Absorberleitungen, sowie die Wärmeleitfähigkeit des Betons. Darüber hinaus stellte sich heraus, dass auf lange Sicht der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf das Ergebnis deutlich kleiner wird und jener der Tunnelinnenluft dominierend wird.

3.4.7.2 Wahl der Werte für die Modellierung

Der Durchfluss durch alle Absorberleitungen der betrachteten geothermischen Anlage ist bekannt und in der Abb. 3.16 abgebildet. Es kann der Zeitraum des Heizbetriebs sehr gut abgelesen werden, es handelt sich um die Periode von Anfang Oktober bis Mitte Juni. Die Zeiten, zu denen die Anlage außer Betrieb ist, sind grau hinterlegt. Diese Markierung wird auch für alle nachfolgenden Grafiken herangezogen, damit die Zeiten des Heizbetriebs klar ersichtlich sind.

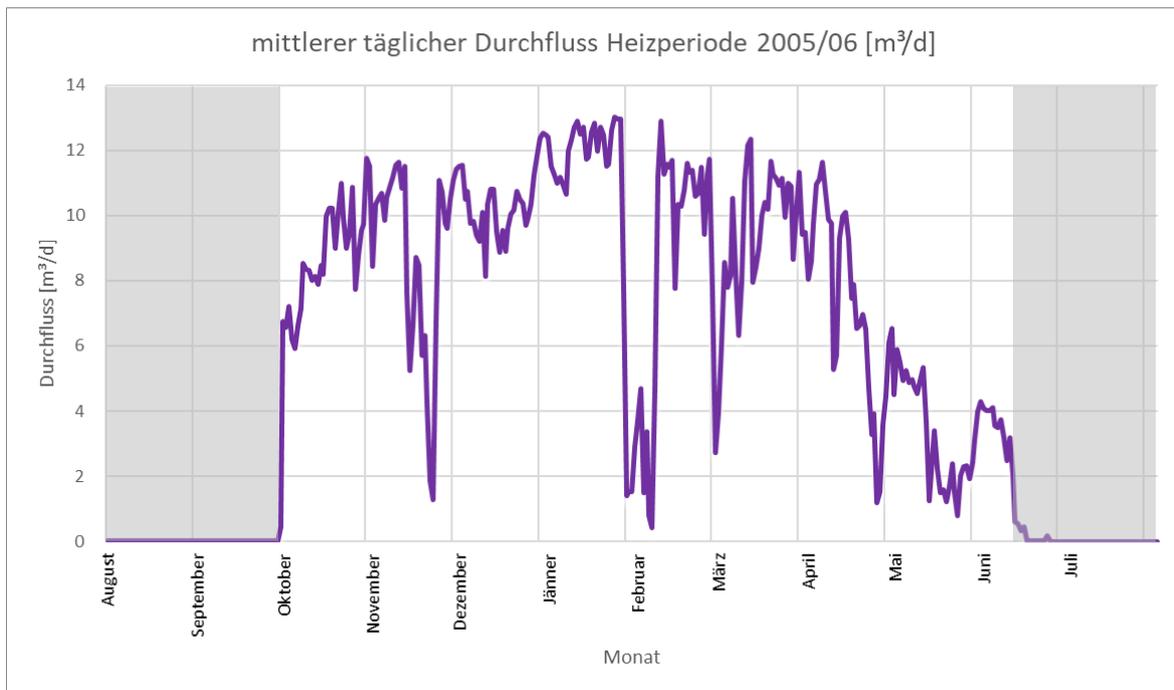


Abb. 3.16: Mittlerer täglicher Durchfluss Heizperiode 2005/06

Es wird aus strömungsmechanischen Gründen davon ausgegangen werden, dass alle im Verteilerraum angeschlossenen Leitungen den gleichen Volumenstrom haben. Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit wird der durchschnittliche Durchfluss von Oktober bis März betrachtet und durch die Anzahl der vorhandenen Absorberkreise dividiert. Daraus ergibt sich für jeden Absorberkreis ein Durchfluss von $Q_w = 0,18 \text{ m}^3/\text{h}$. Da sich im zu untersuchenden Pfahl zwei Absorberkreise befinden, die am Pfahlkopf verbunden sind und in einer gemeinsamen Leitung zum Verteiler führen, teilt sich der Durchfluss der beiden Absorberkreise näherungsweise nach dem Verhältnis ihrer Längen auf.

Der Berechnungsvorgang ist in der nachfolgenden Tabelle erläutert. Die Strömungsgeschwindigkeit wird letztlich folgendermaßen berechnet:

$$v = \frac{Q_w}{3600 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3.2)$$

Symbol	Wert	Einheit	Anmerkung
$Q_{w,ges}$	9,5	[m³/h]	mittlerer Durchfluss der Heizperiode 2005/06
$Q_{w,Kreis, Pfahl}$	0,18	[m³/h]	Annahme: alle Absorberkreise gleicher Durchfluss
a	54	[-]	Anzahl der Absorberkreise
d_a	25	[mm]	Durchmesser Absorberleitung
d_R	2,3	[mm]	Wandstärke Absorberleitung

d_i	22,7	[mm]	Innendurchmesser Absorberleitung
	0,0227	[m]	Innendurchmesser Absorberleitung
l_1	78	[m]	Länge des 1. Absorberkreises
l_2	99	[m]	Länge des 2. Absorberkreises
l_{ges}	177	[m]	Gesamtlänge beider Absorberkreise
Anteil 1	0,44	[-]	Anteil des 1. Absorberkreises
Anteil 2	0,56	[-]	Anteil des 2. Absorberkreises
$Q_{w,1}$	0,10	[m ³ /h]	Durchfluss im 1. Absorberkreis
v_1	0,068	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit im 1. Absorberkreis
$Q_{w,2}$	0,08	[m ³ /h]	Durchfluss im 2. Absorberkreis
v_2	0,053	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit im 2. Absorberkreis

Tab. 3.7: Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit in den Absorberleitungen

Die in der Tabelle grün markierten Geschwindigkeiten werden im Modell im Zeitraum von Oktober bis Juni als Eingangswert angesetzt. Für die übrigen Monate wird vereinfacht davon ausgegangen, dass es keinen Durchfluss bzw. keinen Absorberbetrieb gibt.

3.5 Aufbereitung und Interpretation der thermischen Messdaten

3.5.1 Außenlufttemperatur

3.5.1.1 Messdaten

Aus den vorhandenen Messdaten wurde, wie in Kapitel 3.4.2 erwähnt, der Referenzzeitraum der Heizperiode 2005/06 ausgewählt. In der Abb. 3.17 sind die Messwerte der Außenlufttemperatur unmittelbar beim Abschnitt LT24 zu sehen.

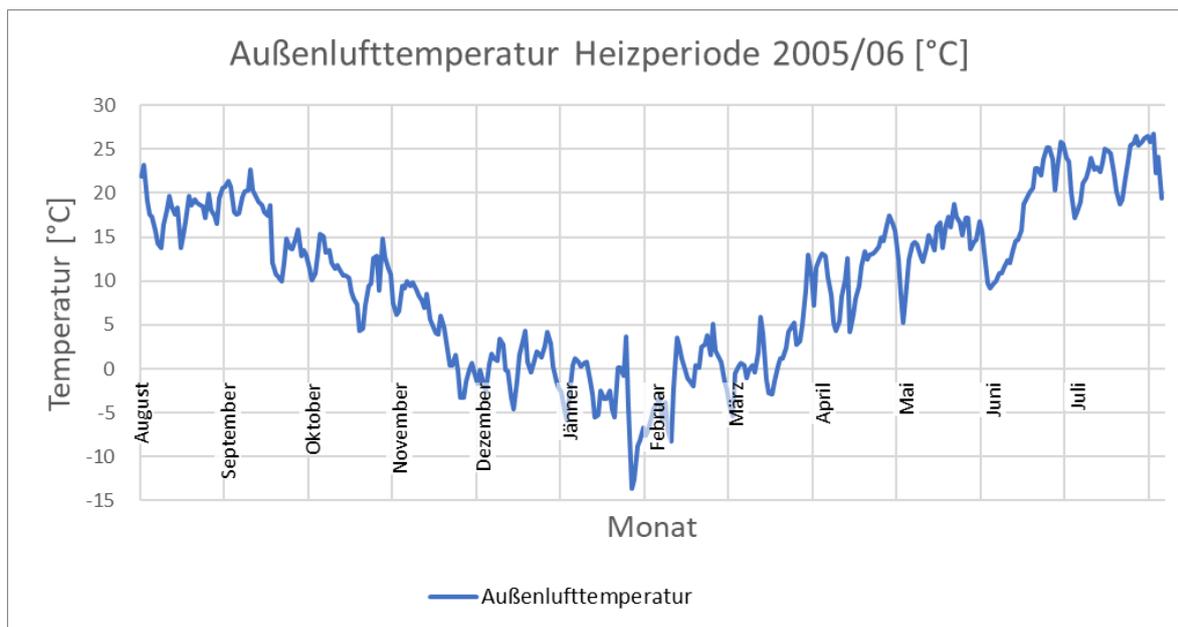


Abb. 3.17: Außenlufttemperatur in der Heizperiode 2005/06

In Tab. 3.8 sind die Kenndaten des gewählten Jahres angegeben. Diese Werte wurden aus dem gesamten Datensatz ermittelt. Die blau markierten Monate bezeichnen die maßgebenden zur Bestimmung der Amplitude. Weitere hervorgehobene Werte (Jahresmittel, mittlere Amplitude) gehen in Kapitel 3.5.1.2 „Funktion zur Modellierung“ ein.

Mittelwert der Außenlufttemperatur	
August	18,1 [°C]
September	16,3 [°C]
Oktober	10,5 [°C]
November	4,0 [°C]
Dezember	0,1 [°C]
Jänner	-3,6 [°C]
Februar	-0,9 [°C]
März	3,1 [°C]
April	11,0 [°C]
Mai	14,6 [°C]
Juni	18,7 [°C]
Juli	23,1 [°C]
Jahresmittel	9,6 [°C]
Maximalwert	23,1 [°C]
Minimalwert	-3,6 [°C]
maximale Amplitude	13,5 [°C]
minimale Amplitude	13,2 [°C]
mittlere Amplitude	13,3 [°C]

Tab. 3.8: Temperaturkenndaten Außenlufttemperatur der Heizperiode 2005/06

3.5.1.2 Funktion zur Modellierung

Die Messdaten werden mit Hilfe einer Sinusfunktion angenähert, die im Modell als Randbedingung verwendet wird. Der Vorteil einer solchen Funktion im Vergleich zur direkten Verwendung der Messdaten besteht darin, dass somit für jeden Zeitpunkt ein Temperaturwert vorhanden ist und Extremwerte ausgeglichen werden können.

Die Eingangswerte ergeben sich aus den Temperaturdaten des Kapitels 3.5.1.1 und sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Mit Hilfe dieser kann die Sinusfunktion angenähert werden. Die Formel für die angewandte Funktion ist in Formel (3.3) angeführt.

T_m	9,6 °C	mittlere Jahrestemperatur
ΔT	13,3 °C	mittlere Amplitude
Periodendauer	365 d = 31536000 s	
ε	260 d	Periodenverschiebung
t	1 d = 86400 s	Zeitabstand

Tab. 3.9: Eingangparameter Sinusfunktion Außenlufttemperatur

$$T_l(t) = T_m + \Delta T \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{31536000} \cdot (t - \varepsilon)\right) \quad (3.3)$$

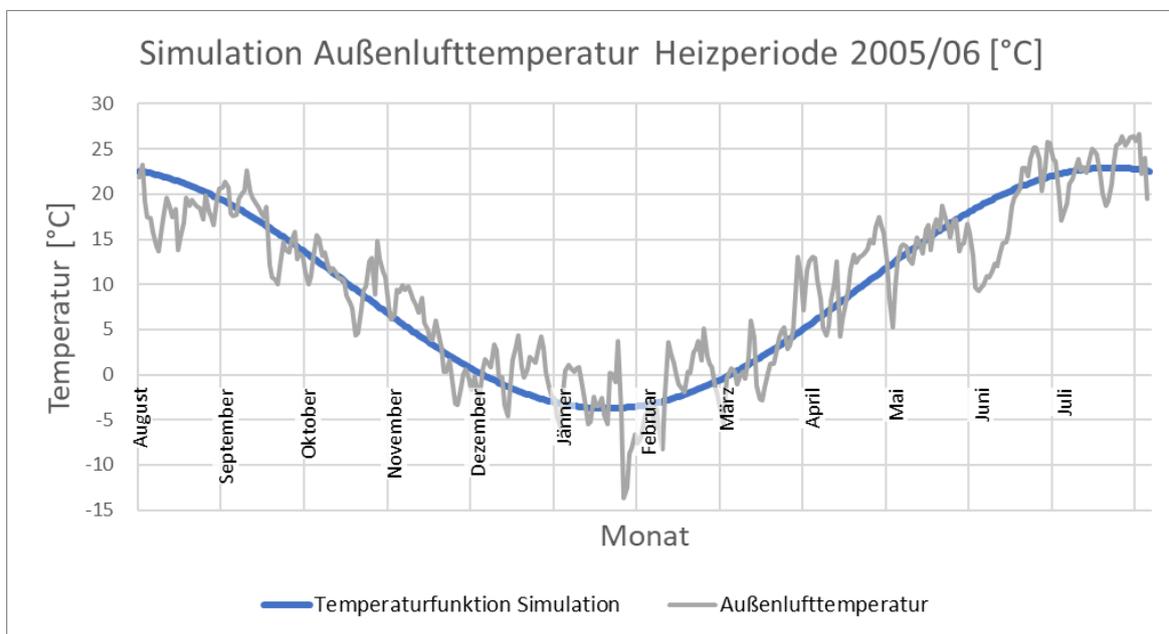


Abb. 3.18: Sinusfunktion, die die Außenlufttemperatur annähert

3.5.2 Innenlufttemperatur

Im Tunnel selbst wurde kein Sensor zur Messung der Lufttemperatur angebracht. Deswegen wird in dem folgenden Kapitel erläutert, wie für die Modellierung die Temperatur an der Tunnelinnenwand abgeschätzt wird.

3.5.2.1 Messdaten – Verteilerraum

Ein Temperatursensor wurde zu Messbeginn im Verteilerraum der Station Hadersdorf-Weidlingau angebracht. Dieser Datensatz wird in weiterer Folge veranschaulicht und als erster Ansatz für die spätere Kalibrierung herangezogen. Die orange markierten Monate wurden wiederum für die Bestimmung der Amplitude herangezogen. Weitere hervorgehobene Werte (Jahresmittel, mittlere Amplitude) gehen in Kapitel 3.5.2.3 „Funktion zur Modellierung“ ein.

Mittelwert der Innenlufttemperatur	
August	19,1 [°C]
September	18,3 [°C]
Oktober	12,1 [°C]
November	8,0 [°C]
Dezember	4,0 [°C]
Jänner	1,4 [°C]
Februar	1,4 [°C]
März	2,6 [°C]
April	7,3 [°C]
Mai	11,3 [°C]
Juni	15,0 [°C]
Juli	21,5 [°C]
Jahresmittel	10,2 [°C]
Maximalwert	21,5 [°C]
Minimalwert	1,4 [°C]
maximale Amplitude	11,4 [°C]
minimale Amplitude	8,8 [°C]
mittlere Amplitude	10,1 [°C]

Tab. 3.10: Temperaturkenndaten Innenluft in der Heizperiode 2005/06

In der folgenden Grafik wird ersichtlich, dass die Innenlufttemperatur im Verteilerraum der Außenlufttemperatur folgt, wobei stärkere Tagesschwankungen geglättet sind, und die Temperatur im Innenraum etwas zeitverzögert (etwa 15 Tage versetzt) der Außenlufttemperatur folgt.

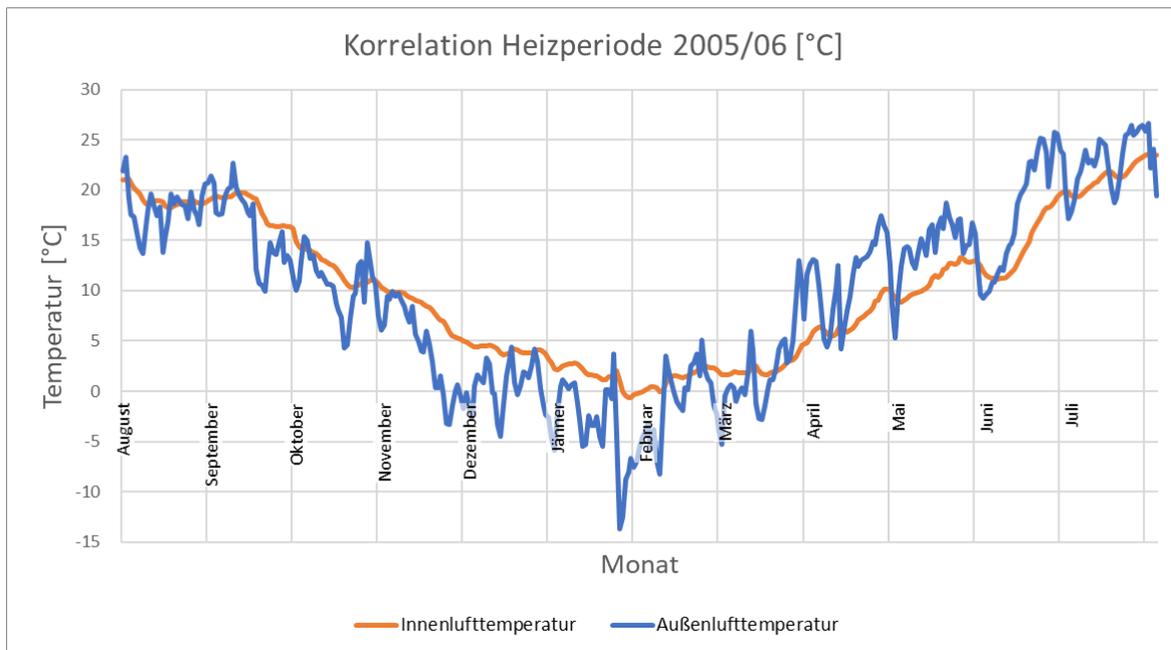


Abb. 3.19: Korrelation Messdaten Innenlufttemp./ Außenlufttemp. in der Heizperiode 2005/06

3.5.2.2 Einflussfaktoren Tunnelinnenluft

Die Temperatur der Tunnelluft hängt von vielen Parametern ab, beispielsweise von der Luftdurchströmung, der Länge des Tunnels, dem Abstand zu den Portalen, der Außenlufttemperatur, den inneren Wärmequellen (z.B. Maschinen, Züge) sowie der Überdeckung des Tunnels [53]. Es gibt nur sehr wenige wissenschaftliche Beiträge, die sich mit der Tunnelinnenluft im Rahmen der Geothermie auseinandersetzen und konkret Aufschluss darüber liefern, wie die einzelnen Faktoren zu berücksichtigen sind.

Es gibt verschiedene Ansätze wie die Tunnelinnenlufttemperatur im Modell eingehen kann. Eine Möglichkeit ist eine definierte Temperaturverteilung an den Oberflächen vorzugeben. Diese kann konstant oder zeitlich veränderlich sein, wobei die Annahme gilt, dass der Heizbetrieb die Wandtemperatur nicht beeinflusst. Ein anderer Ansatz ist die Modellierung des Tunnelinnenlufttraums als (Fluid-)Volumen, wobei dieses als stationär oder aber entlang der Tunnelachse instationär angenommen werden kann. Der zweite Ansatz ist in der Regel exakter, sofern der Tunnel über seine gesamte Länge modelliert wird, und die genannten Einflussfaktoren berücksichtigt werden [54]. Allerdings übersteigt der zweite Ansatz den Umfang der Arbeit und es ist auch zu hinterfragen, ob diese Präzision tatsächlich einen höheren Mehrwert generieren würde, oder ob nicht die iterative Annäherung der Tunnelinnenlufttemperatur für die Validierung ausreichend genau ist. Somit wurde für die vorliegende Arbeit der erste Ansatz gewählt, welcher auch in der Literatur der üblichere ist [54]. In diesem Kapitel wird auf die zuvor genannten Faktoren in Hinblick auf den gegenständlichen Tunnelabschnitt eingegangen.

Überdeckung

Da dieser Tunnelabschnitt in offener Bauweise errichtet wurde, ist die Überlagerung sehr gering und beträgt in etwa zwischen 2 und 4 m. Somit hat der geothermische Wärmegradient

– anders als bei tief gelegenen Tunneln wie z.B. dem Gotthardtunnel – keine wesentliche Temperaturerhöhung zu Folge [55].

Umso wichtiger ist der Einfluss der Außenlufttemperatur auf die Tunnelinnenlufttemperatur und gegebenenfalls auch auf die Rücklaufleitungen, sofern diese nicht ausreichend isoliert sind. Auf Grund der geringen Überdeckung kann die Außenlufttemperatur einen großen Impakt haben.

Hierfür kann als Referenzprojekt der Abschnitt LT22 des Lainzer Tunnels herangezogen werden. Er hat eine Überlagerung von 7-12 m und die Tunnelinnenluft wurde für ein Jahr kontinuierlich gemessen [22]. Beim Überlagern der gemessenen Außenlufttemperatur und der Tunnelinnenlufttemperatur wurde ersichtlich, dass sich die beiden Temperaturkurven ähnlich zueinander verhalten, wie es sich auch beim Abschnitt LT24 ergeben hat (siehe Abb. 3.19).

Tunnellänge und Abstand zu den Portalen

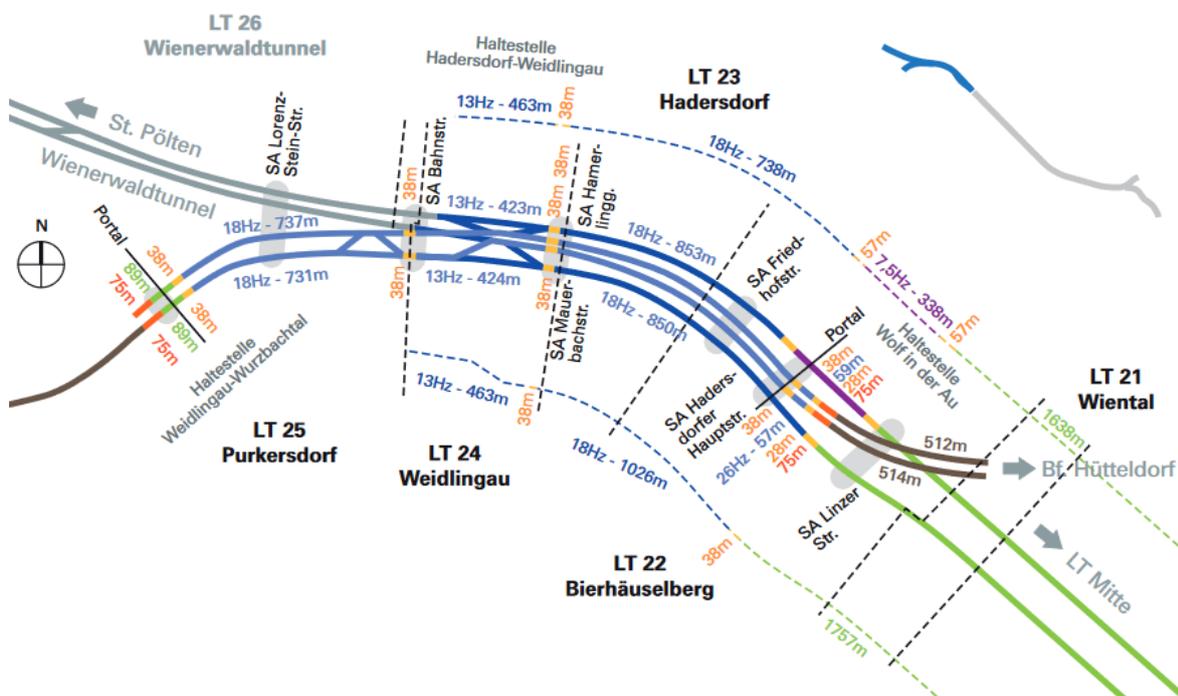


Abb. 3.20: Abstand des LT24 zu den Tunnelportalen [39]

Der Abstand der Weichenhalle Richtung Westen beträgt in etwa 800 m und Richtung Osten zirka 900 m. Die beiden Portale haben zueinander einen Abstand von etwa 2,2 km [39]. Für den Tunnel Stuttgart 21 wurden Überlegungen angestellt, inwiefern die Portalentfernung einen Einfluss auf die Temperatur im Tunnel hat. Dabei konnte festgestellt werden, dass ab einer Entfernung von 900 m der Einfluss der täglichen Temperaturschwankungen stark abnimmt und die Temperatur dem jahreszeitlichen Trend folgt [53].

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Luftwechselrate mit der Außenluft durch die Portale nur einen relativ geringen Einfluss auf die tägliche Schwankung der Tunnelinnenlufttemperatur zur Folge hat. Vielmehr ist der Trend der Außenlufttemperatur, mit anderen Worten die jahreszeitliche Schwankung, maßgeblich.

Schlussfolgerung

Die Messdaten des Verteilerraums können in einer ersten Annäherung als Richtwert herangezogen werden. Dies ist anhand der genannten Einflussfaktoren und Vergleichsprojekte zu argumentieren. Des Weiteren wurde auch in dem Paper „Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers“ aus dem Jahr 2017 festgehalten, dass sich die Tunnellufttemperatur im LT24 entsprechend den saisonalen Veränderungen der Außenlufttemperatur verhält [36]. In der Modellierung und durch Validierung mit den Messdaten kann es zu einer Anpassung dieser Annahme kommen. Ferner kommt die Analyse der Daten aus dem Jahr 2004 zu demselben Ergebnis. Dabei wurden Messungen der Tunnelinnenlufttemperatur mit der Außentemperatur beim Bauabschnitt LT24 verglichen [22].

3.5.2.3 Funktion zur Modellierung

Die Temperaturmessdaten des Verteilerraums werden mit Hilfe einer Sinusfunktion angenähert. Dies erfolgt analog zu dem Prinzip der Annäherung der Außenlufttemperatur. Es werden die Werte aus Kapitel 3.5.2.1 herangezogen. Die Formel zur Berechnung, ihre Eingangsparameter sowie der daraus resultierende Graph sind nachstehend zu finden.

$$T_l(t) = T_m + \Delta T \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{31536000} \cdot (t - \varepsilon)\right) \quad (3.4)$$

T_m	10,2 °C	mittlere Jahrestemperatur
ΔT	10,1 °C	mittlere Amplitude
Periodendauer	365 d = 31536000 s	
ε	275 d	Periodenverschiebung
t	1 d = 86400 s	Zeitabstand

Tab. 3.11: Eingangsparameter Sinusfunktion Innenlufttemperatur

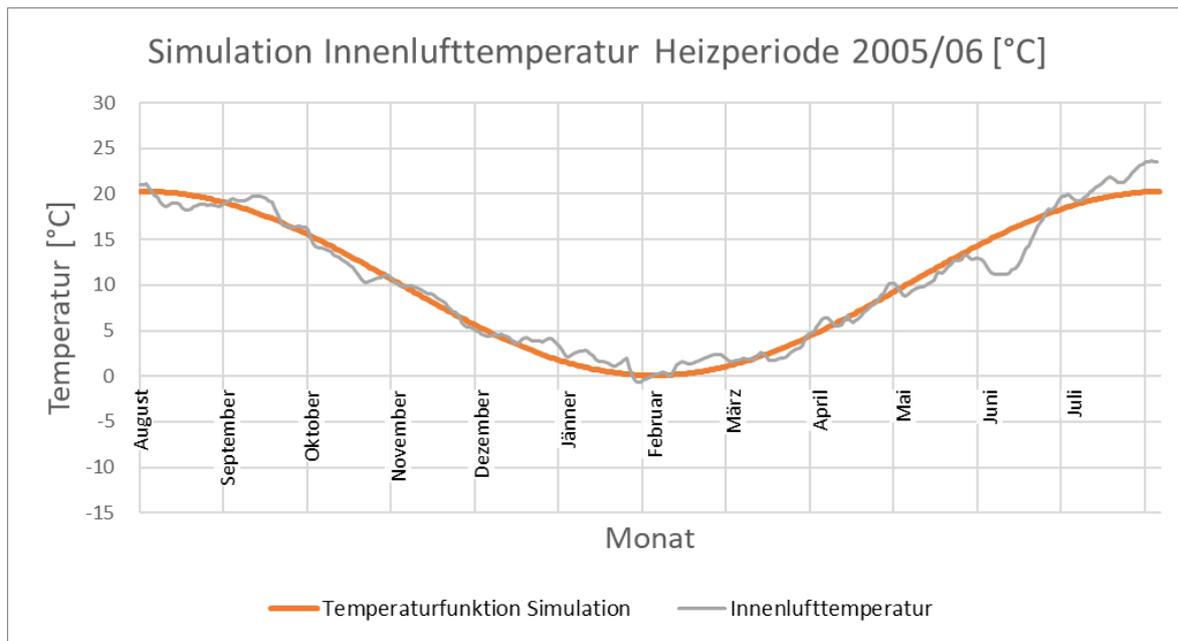


Abb. 3.21: Sinusfunktion, die die Innenlufttemperatur im Verteilerraum annähert

3.5.2.4 Außenlufttemperatur und Innenlufttemperatur für die Modellierung

In der nachfolgenden Grafik ist ersichtlich, dass sich die angenommene Innenlufttemperatur wie eine gedämpfte und zeitversetzte Funktion der Außenlufttemperatur verhält.

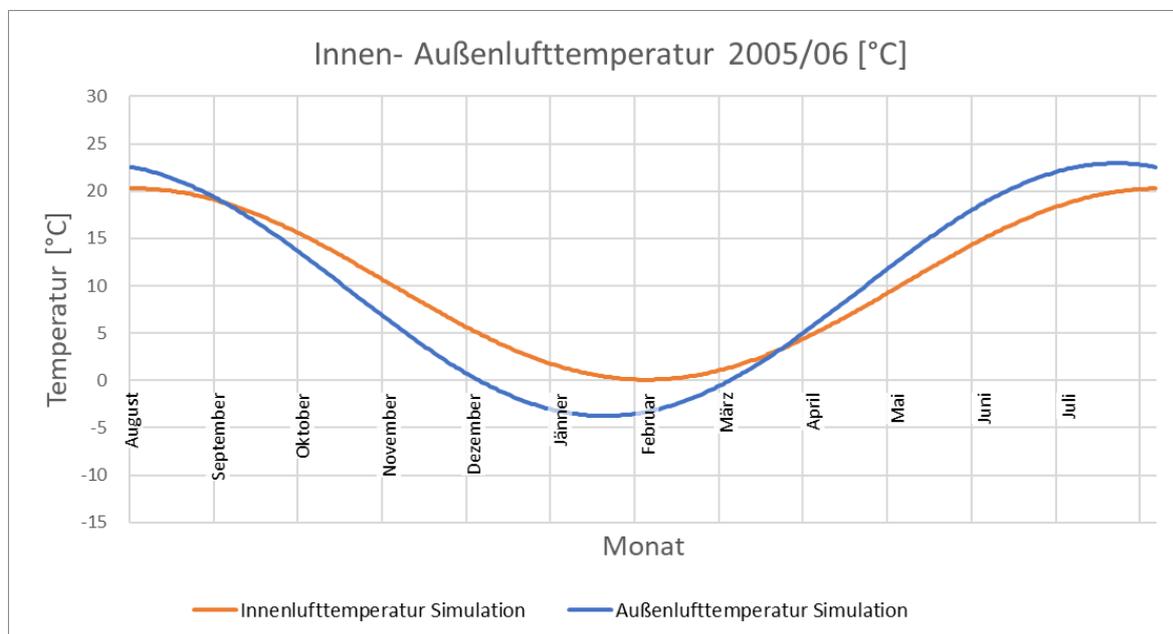


Abb. 3.22: Gegenüberstellung der Innenlufttemperatur und der Außenlufttemperatur in der Modellierung

3.5.3 Temperaturen Messpfahl

3.5.3.1 Messdaten

Wie in Kapitel 3.3.1 geschildert, sind an dem betrachteten Pfahl in fünf Tiefen jeweils zwei Sensoren für die kombinierte Temperatur- und Dehnungsmessung angebracht. Des Weiteren gibt es in drei Tiefen jeweils einen Sensor zur Temperaturmessung. In den folgenden Grafiken sind immer die Tagesmittelwerte des jeweiligen Messpunktes gezeigt.

Ein direkter Vergleich der Messungen des Energiepfahls an der Luft- und der Erdseite verdeutlicht den Einfluss der Tunnelluft. An den Messpunkten, wo der Pfahl beidseitig erdberührt ist, gibt es kaum eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messpunkten (bei -14 m und -18 m). Bei -1 m ist die Temperatur an der Tunnelinnenseite hingegen in der Regel um etwa 2 °C wärmer als erdseitig – ähnlich verhält es sich auch bei den Messpunkten bei -9 m. Lücken in den Datenreihen sind auf Messausfälle zurückzuführen.

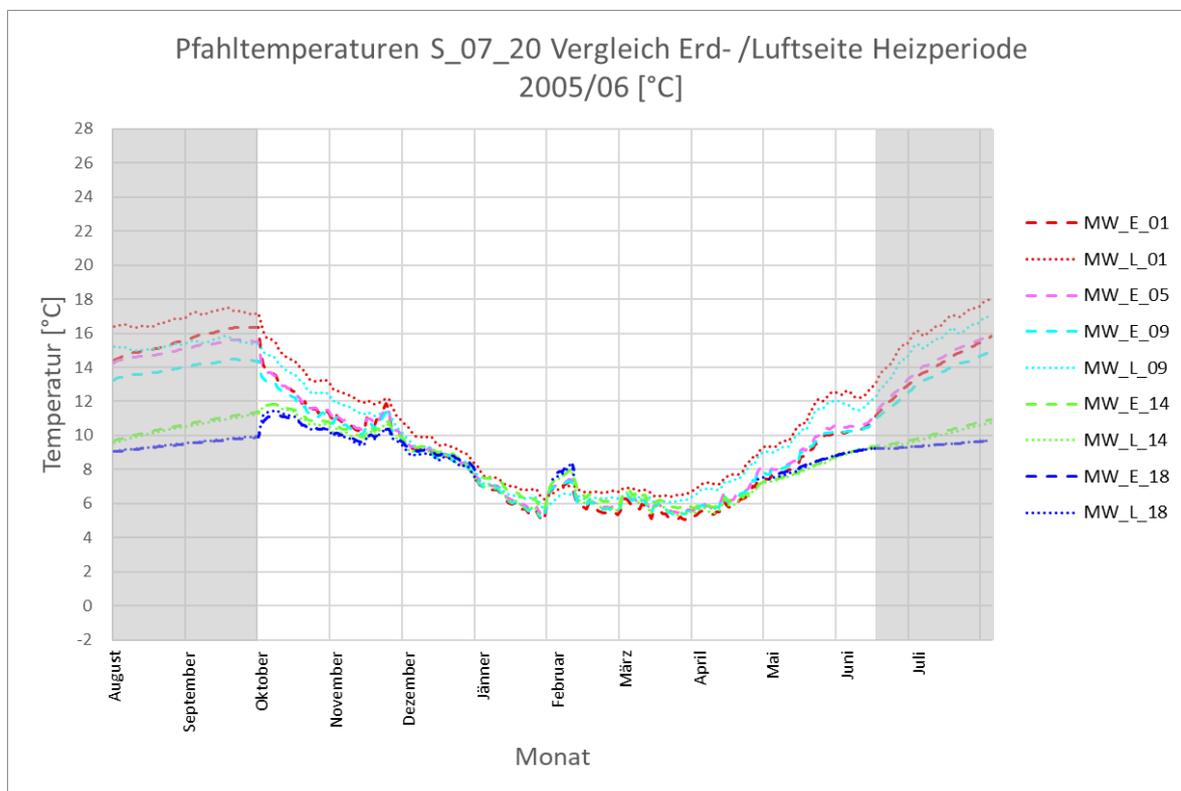


Abb. 3.23: Vergleich Messdaten luft-/ erdseitig („L“, „E“) in unterschiedlichen Tiefenstufen (1 m, 5 m, 9 m, 14 m, 18 m) in der Heizperiode 2005/06

In den folgenden beiden Diagrammen sind die Messwerte getrennt für die jeweiligen Absorberkreise dargestellt. Dabei sind in Abb. 3.24 unterhalb der Bodenplatte für den Absorberkreis 1 die Messsensoren auf -14 sowie -18 m relevant. Alle übrigen sind im Bereich des Absorberkreises 2 situiert, der oberhalb der Bodenplatte liegt.

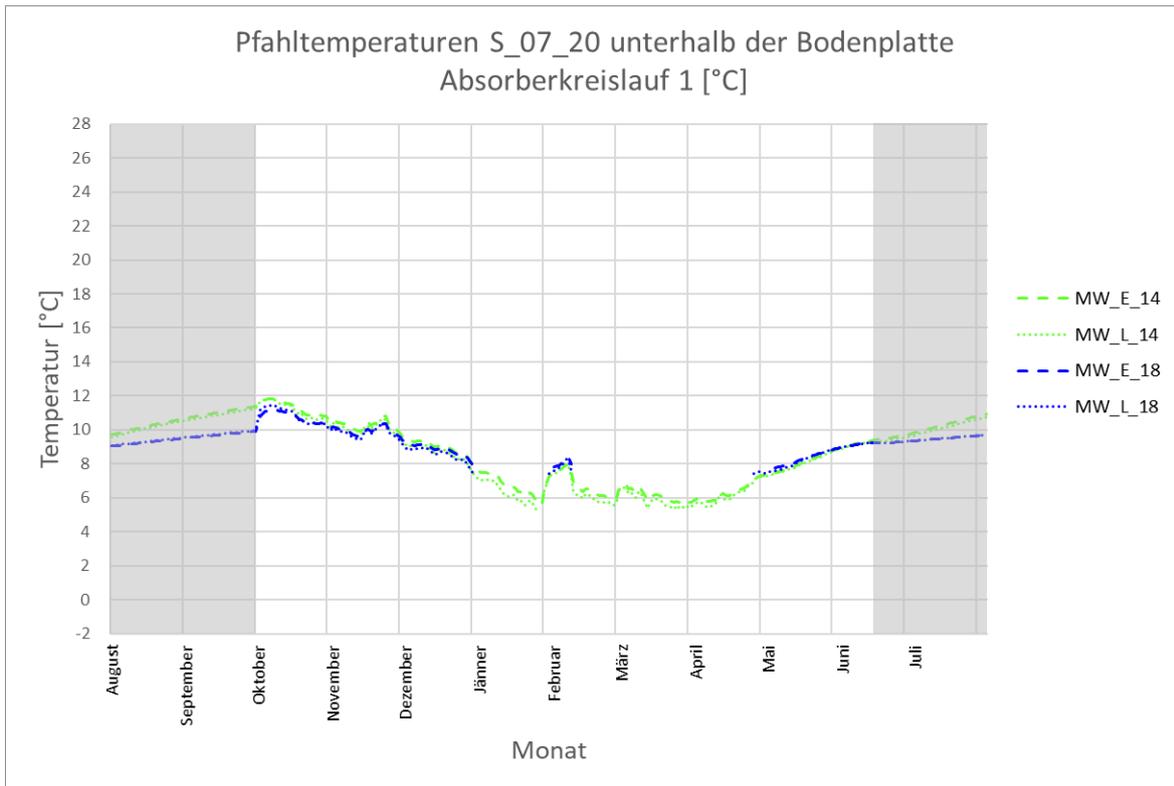


Abb. 3.24: Pfahltemperaturen im Bereich des Absorberkreises 1 in der Heizperiode 2005/06

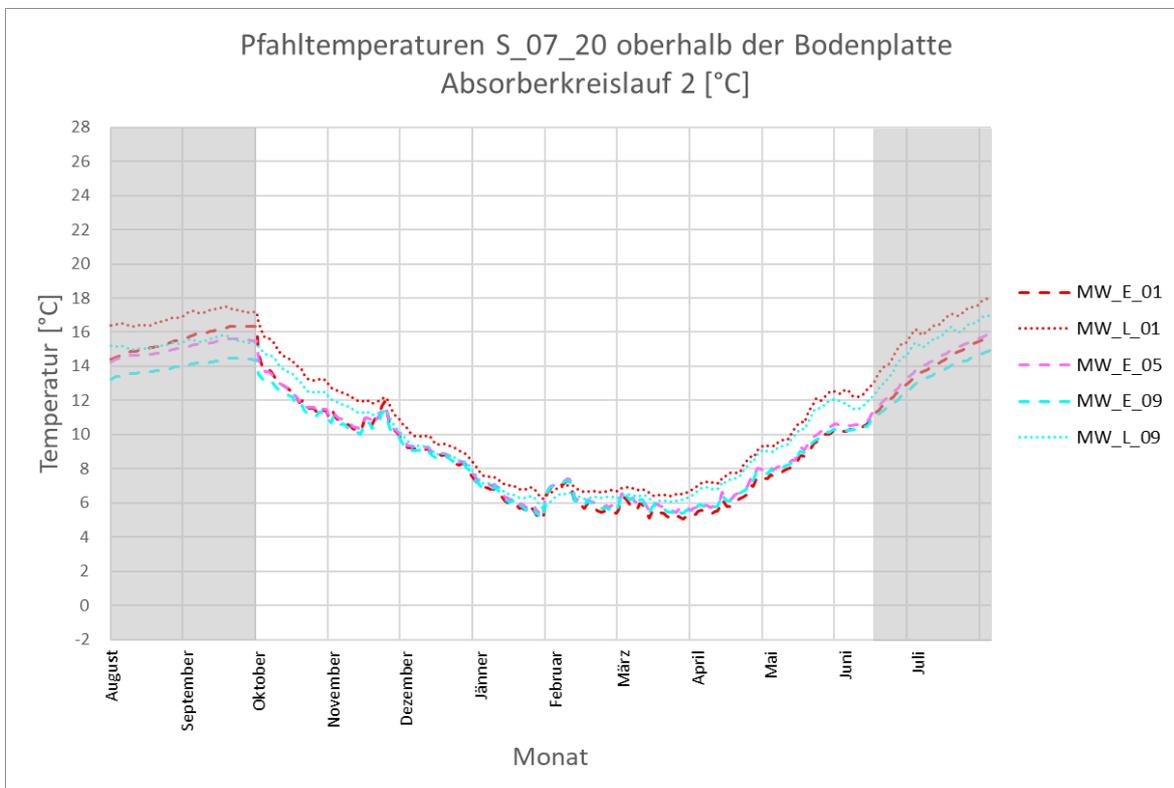


Abb. 3.25: Pfahltemperaturen im Bereich des Absorberkreises 2 in der Heizperiode 2005/06

Die folgende Darstellung zeigt zur weiteren Verdeutlichung die Werte der luftseitigen Messsensoren, wobei für jenen in einer Tiefe von 5 m keine Aufzeichnungen vorhanden sind. Somit sind für die Heizperiode 2005/06 an vier Stellen Messungen verfügbar. Die Abb. 3.26 zeigt das luftseitige Temperaturverhalten und die Abb. 3.27 beschreibt das erdseitige Temperaturverhalten.

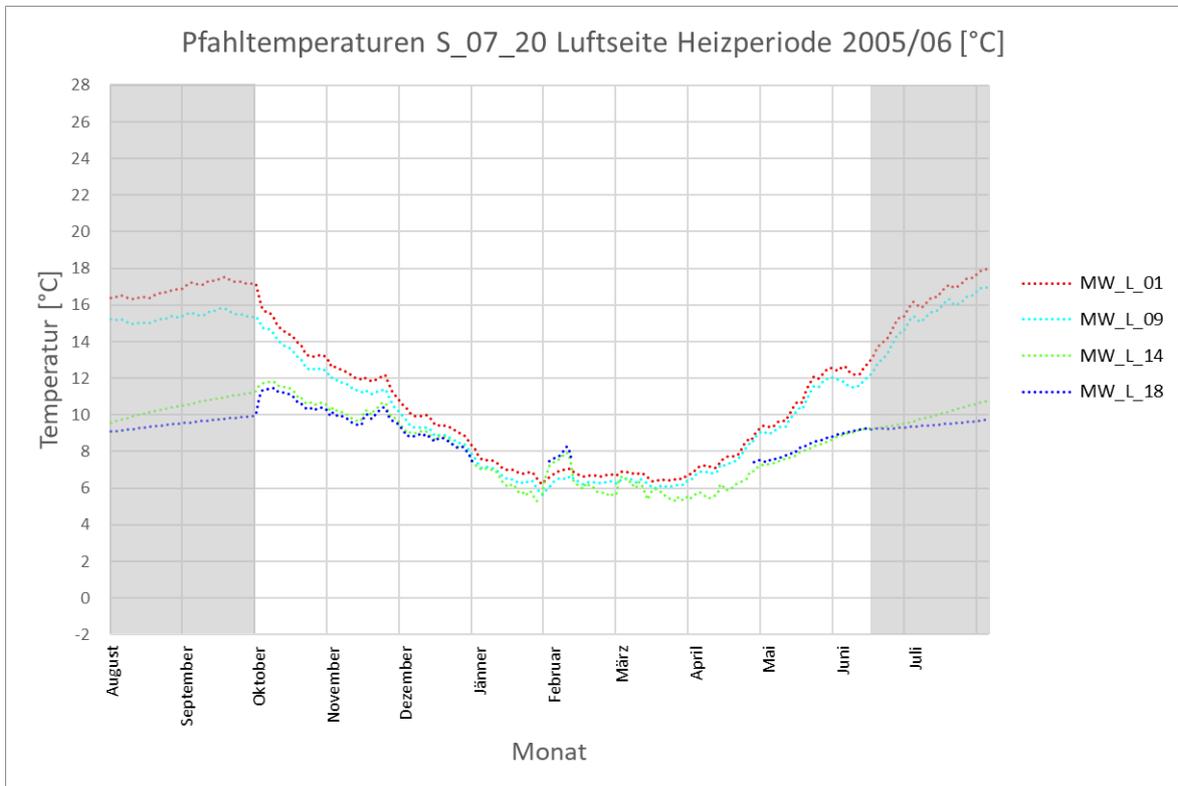


Abb. 3.26: Pfahltemperaturen auf der Tunnelinnenseite in der Heizperiode 2005/06

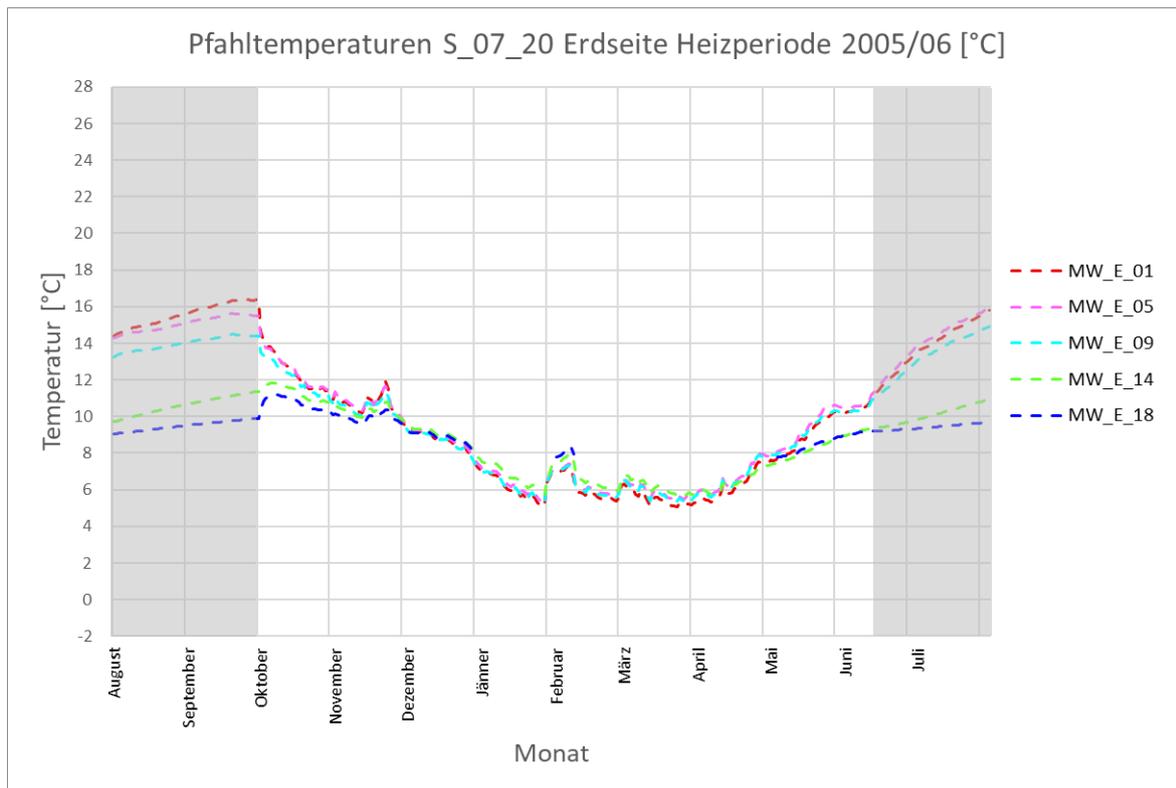


Abb. 3.27: Pfahltemperaturen auf der Erdseite in der Heizperiode 2005/06

3.5.4 Vorlauf- und Rücklauftemperatur Absorberflüssigkeit

3.5.4.1 Messdaten

Bei diesen Temperaturen gilt es zu beachten, dass die Vor- und Rücklauftemperaturen in der Sammelleitung von allen Energiepfählen aufgezeichnet wurden. Die diesbezüglichen Messsensoren befinden sich im Verteilerraum direkt an den Leitungen. In der folgenden Darstellung sind die Datenverläufe für den gewählten Auswertungszeitraum ersichtlich.

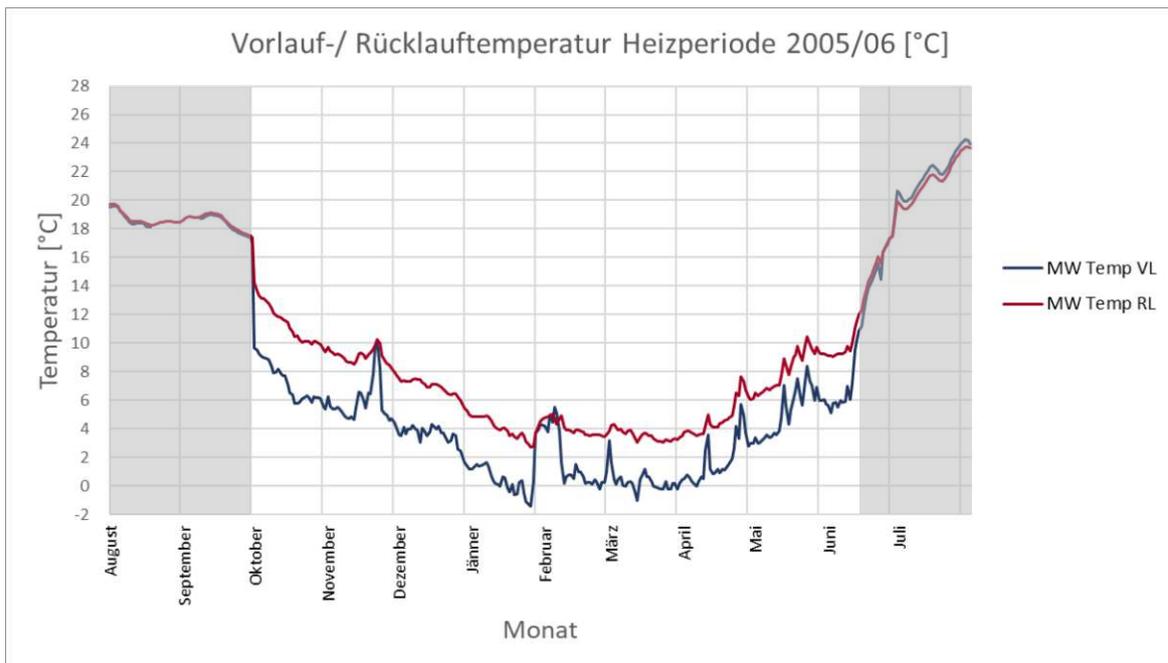


Abb. 3.28: Vorlauf- / Rücklauftemperatur in der Heizperiode 2005/06

Anhand der Vorlauftemperatur sind während der Heizperiode eindeutig Spitzen während jener Zeiträume zu erkennen, in denen weniger oder gar nicht geheizt wurde. Dies deckt sich mit der schulfreien Zeit, beispielsweise während der Weihnachtsferien, wo die Anlage nicht in Betrieb war. Da keine Wärme entzogen wurde, war die Temperatur deutlich höher als während des Betriebs.

Im nächsten Schritt werden diese Temperaturdaten mit jenen des Messpfahls verglichen. Als relevanten Messpunkt hierfür, wird der höchstgelegene an der Tunnelaußenseite herangezogen. Hier strömt die Absorberflüssigkeit zum letzten Mal nahe an einem Messsensor im Pfahl vorbei, bevor sie zurück in den Verteilerraum strömt. Die Gegenüberstellung dieser Temperaturen kann der folgenden Grafik entnommen werden.

Die Temperaturdifferenz zwischen der Rücklauftemperatur der Sammelleitung und dem höchsten Messpunkt im Pfahl liegt während der Heizperiode relativ konstant bei etwa 2 °C. Die Pfahltemperatur war dabei höher als die gemessene Flüssigkeitstemperatur im Verteilerraum. Nachfolgend wird beleuchtet, was die Ursachen für diese Temperaturdifferenz sein können.

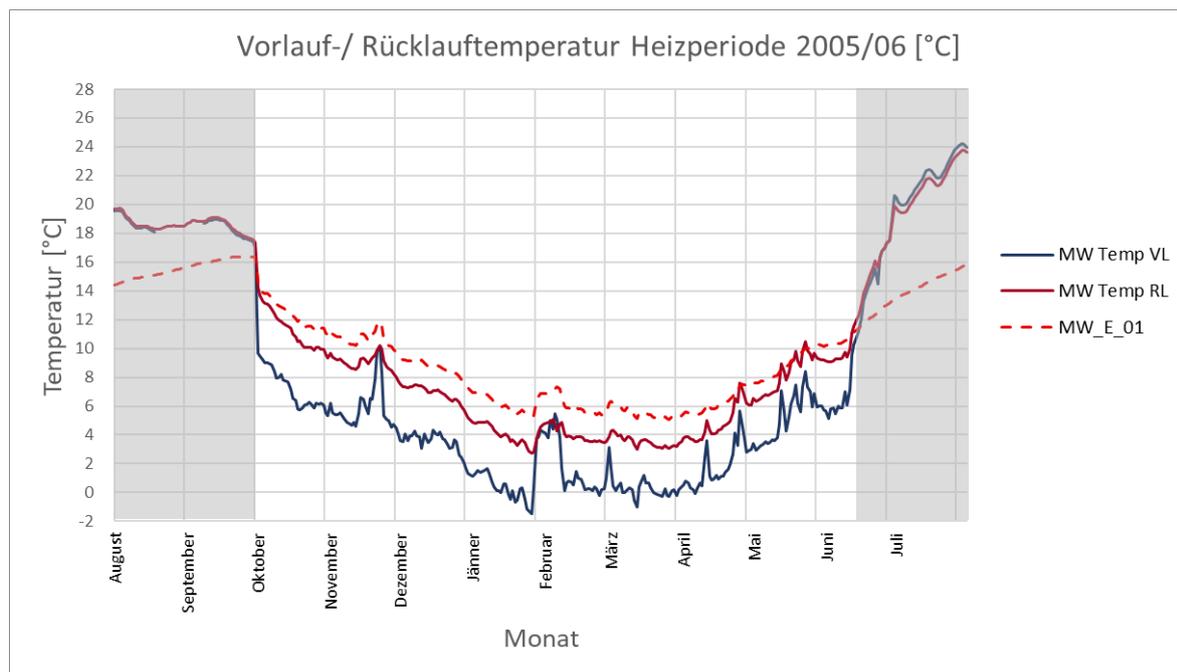


Abb. 3.29: Rücklauf Temperatur in der Sammelleitung im Verteilerraum (MW Temp RL) im Vergleich zur Pfahltemperatur (Pfahl S_07_20) in einer Tiefe von 1 m auf der Erdseite (MW_E_01)

Dies kann auf verschiedene Gründe zurückgeführt werden:

- Einerseits sind in dem betrachteten Messpfahl zwei Absorberkreise eingebaut. Dies führt zu einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit und somit einer längeren Verweildauer der Absorberflüssigkeit im Pfahl, wodurch mehr Wärme entzogen werden kann und sich dadurch höhere Temperaturen ergeben als letztlich in der Sammelleitung gemessen wurde. Die niedrigere Strömungsgeschwindigkeit entsteht, da die beiden Absorberkreise an einem gemeinsamen Zufluss angeschlossen sind.
- Andererseits können unterschiedliche Leitungslängen zwischen den jeweiligen Energiepfähle und dem Verteilerraum, eine variierende Isolierung der Leitung oder auch unterschiedliche Überdeckungen die Temperatur beeinflussen und somit zu einer Temperaturdifferenz zwischen dem letzten Messsensor im Pfahl und jenem in der Sammelleitung führen.
- Des Weiteren ist es wichtig hervorzuheben, dass die Temperaturen im Messpfahl nicht direkt an dem Absorberleitungen, sondern im Beton gemessen werden, wohingegen die Sensoren (Tauchfühler) des Vor- sowie Rücklaufs direkt die Flüssigkeitstemperatur messen.

3.5.4.2 Funktion zur Modellierung

Die Vorlauf Temperatur, die als Eingangsparameter in der Modellierung benötigt wird, wird mittels einer abschnittsweise linearen Funktion angenähert. Dabei werden in Perioden mit hoher Außentemperatur (über 20° C) etwas niedrige Temperaturen angesetzt und in Perioden niedriger Außentemperatur (unter 5° C) etwas wärmere Temperaturen. Diese Anpassung erfolgt, weil davon ausgegangen wird, dass sich die Temperatur der Absorberflüssigkeit

zwischen dem Verteilerraum und dem Energiepfahl etwas an die Umgebungstemperatur anpasst. Die im Diagramm grau markierten Bereiche zeigen wiederum jene Zeiten, zu denen es keine Strömung in den Absorberleitungen gibt (kein Heizbetrieb). Die zu diesen Zeiten vorgegebene Vorlauftemperatur hat somit keinen nennenswerten Einfluss auf das gesamte Temperaturverhalten.

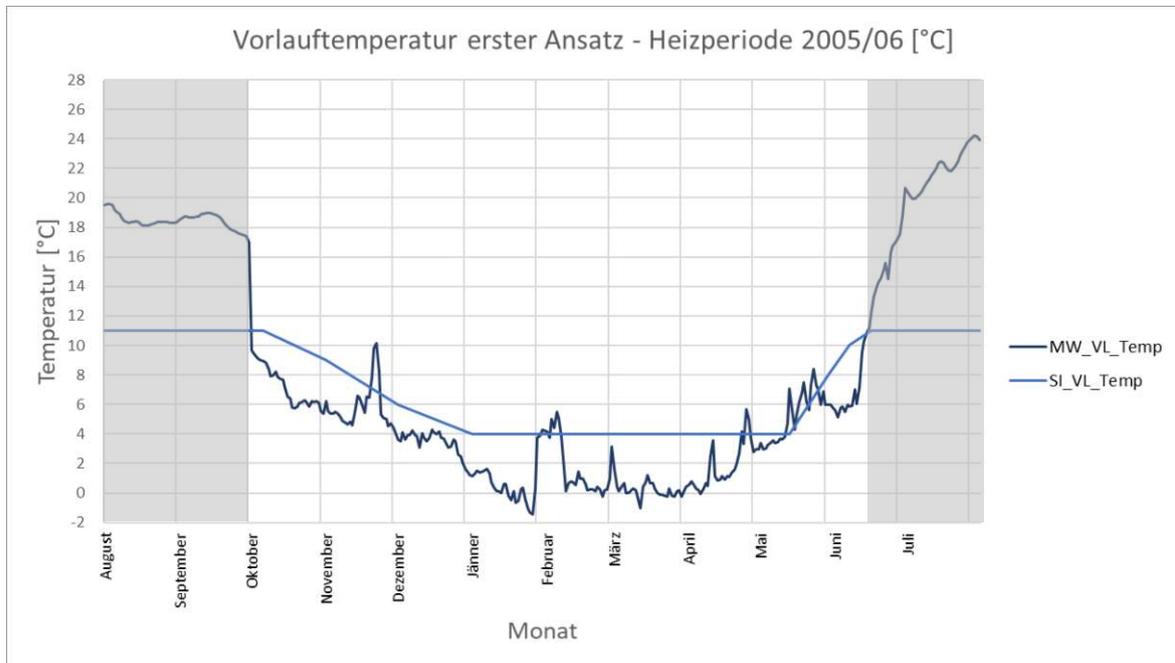


Abb. 3.30: Erster Ansatz der Vorlauftemperatur in der Heizperiode 2005/06

An dieser Stelle sei angemerkt, dass im Vergleich zur beschriebenen Modellierung der Vorlauftemperatur (Vorlauftemperatur für den gesamten Zeitraum als Eingangsparameter vorgegeben) auch ein alternativer Ansatz zur Modellierung in COMSOL Multiphysics geprüft wurde. Bei diesem wurde die Temperatur des Vorlaufs nur für jenen Zeitraum vorgegeben, zu dem auch eine Durchströmung stattfand (Oktober bis Mitte Juni). Zu allen anderen Zeitpunkten war die Temperatur eine „Unbekannte“ und sollte vom Programm berechnet werden. Bei dieser Variante der Modellierung ergaben sich jedoch ab Mitte Juli Temperaturen im hohen zweistelligen Minusgradbereich, welche keine realistischen Wert darstellten und auf numerische Probleme zurückzuführen sind. In der zu Verfügung stehenden Zeit konnte das Problem auch nicht in Zusammenarbeit mit dem Support von COMSOL Multiphysics geklärt werden, weshalb letztlich der zuvor beschriebene Ansatz beibehalten wurde.

3.6 Beschreibung des Berechnungsmodells

3.6.1 Modellaufbau

Die Außenabmessungen des Modells wurden bereits in Kapitel 3.4.1 vorgestellt und sind in der Abb. 3.10 zu sehen. Die Wahl der Schichtaufbauten und die zugehörigen Bodenparameter wurden in Kapitel 3.4.3 erläutert. Die folgende Grafik zeigt eine Zuordnung des Schichtaufbaus

und der in blau markierten Betoninnenschale. Die Abb. 3.32 verdeutlicht die Lage der Bohrfahlfwand mittels blauer Markierung im Modell.

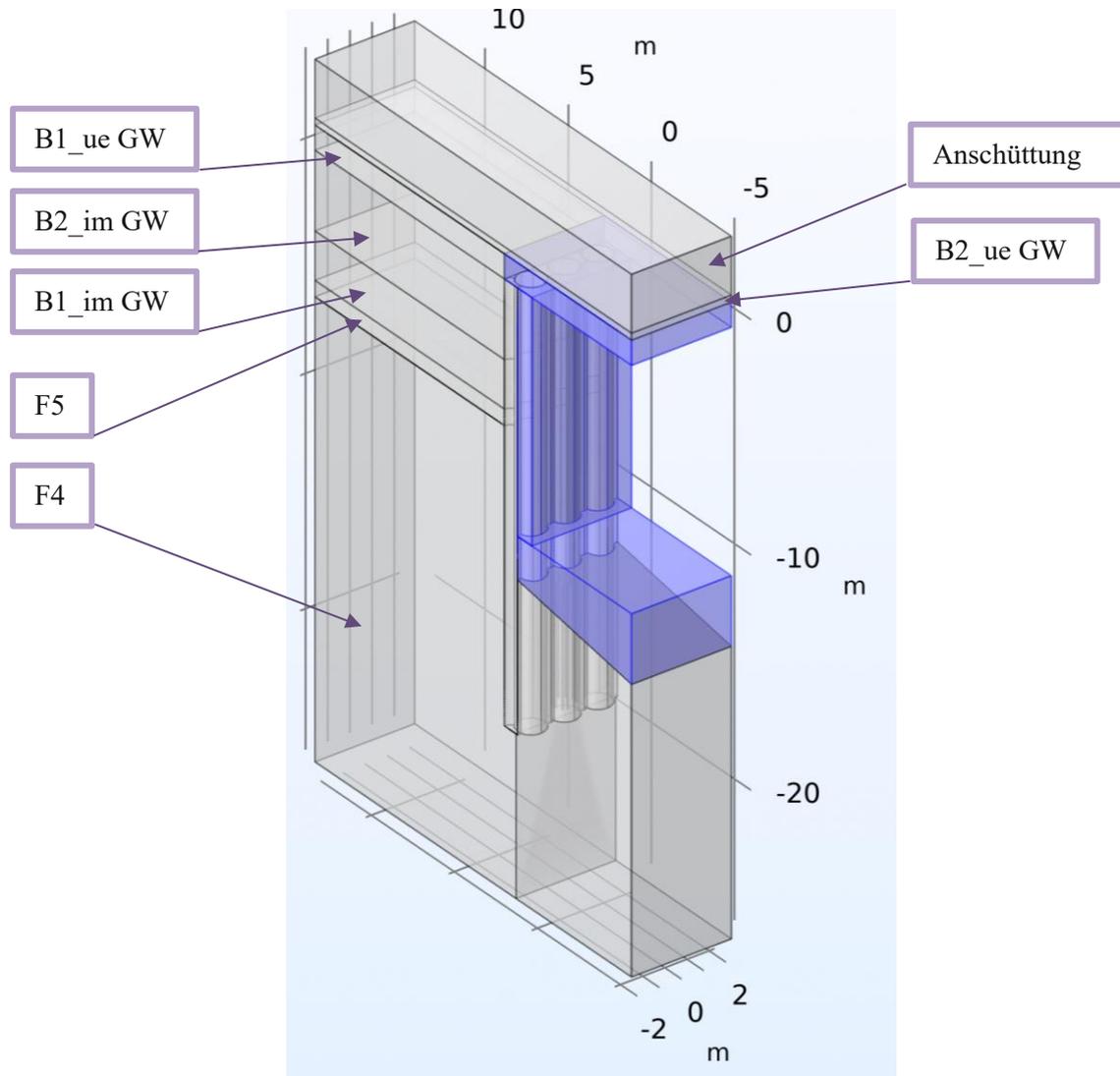


Abb. 3.31: Schichtaufbau und Innenschale (blau) im Modell

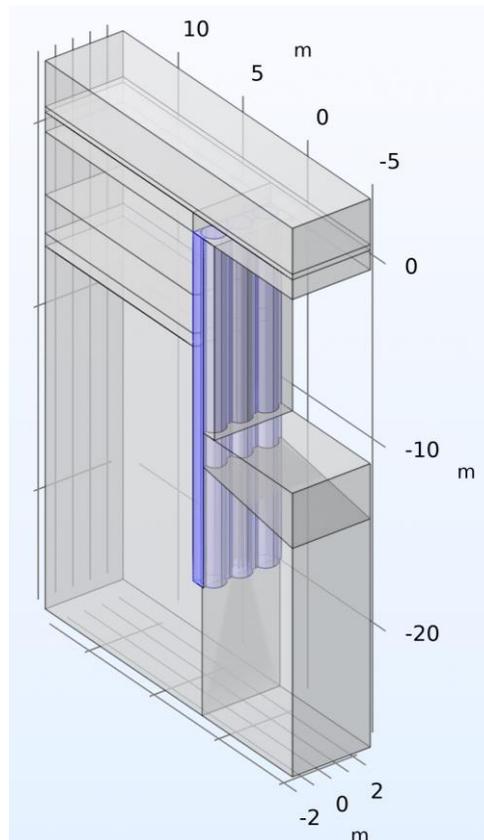


Abb. 3.32: Bohrpfahlwand (hellblau) im Modell und DSV-Körper (blau)

3.6.2 Lage der Absorberleitungen

Die Abb. 3.33 veranschaulicht die Lage der Absorberleitungen in der Energiewand in einem Längsschnitt. In Richtung der negativen Y-Achse befindet sich das Erdreich, in positive Y-Richtung die Tunnelinnenwand. Die Abb. 3.34 links zeigt einen Schnitt durch das Modell, wobei beide Absorberkreise dargestellt sind, wenngleich diese auf verschiedenen Höhen im Modell sind. Die violetten Leitungen sind dem ersten Absorberkreis zuzuordnen, der unterhalb der Bodenplatte verläuft. Die grünen Leitungen sind dem zweiten Absorberkreis zugehörig, der oberhalb der Bodenplatte eingebaut ist. Die Abb. 3.34 rechts zeigt eine detaillierte Darstellung der Absorberleitungen im Schnitt. Die jeweils dunkle äußere Umrandung zeigt das PE-Rohr der Absorberleitung, die innere helle Fläche stellt die zirkulierende Flüssigkeit dar.

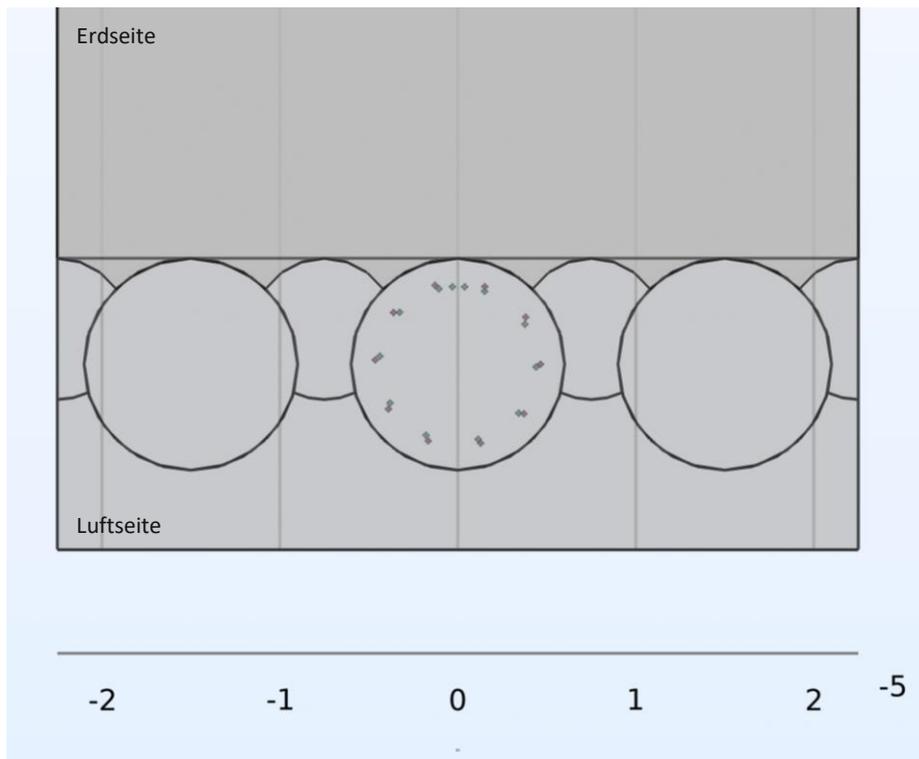


Abb. 3.33: Längsschnitt durch das Modell mit Lage der Absorberleitungen im Energiepfahl

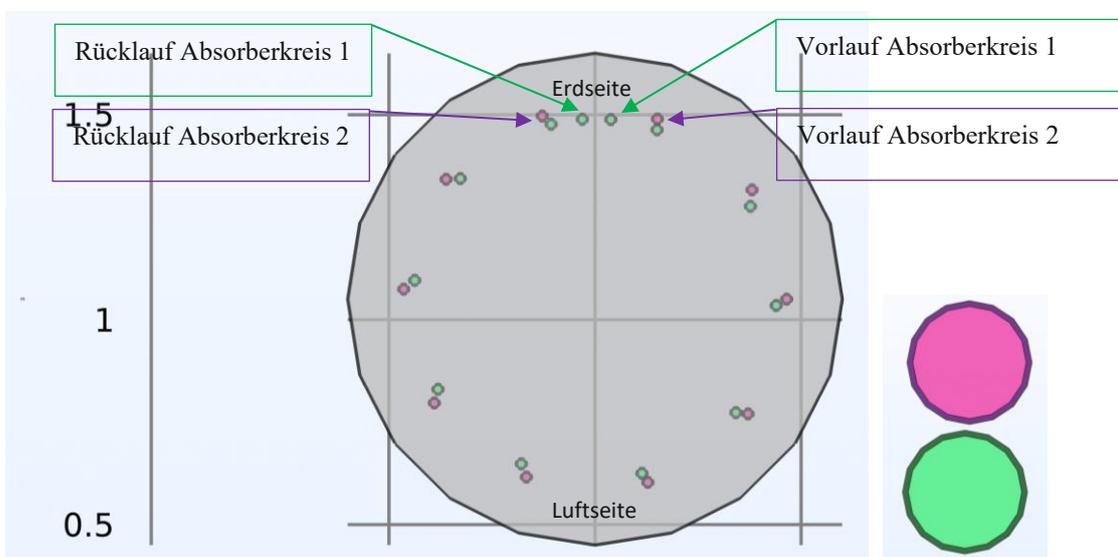


Abb. 3.34: Links: Schnitt durch den Energiepfahl mit den Absorberleitungen, rechts: Detail der PE-Rohre mit Wandstärke

Die Abb. 3.35 zeigt eine axonometrische Ansicht der beiden Absorberkreise. Am mittleren Bild sind die violetten Absorberleitungen des zweiten Kreises und die beiden grünen Absorberleitungen des ersten Absorberkreises zu sehen, die bis zum Zulauf am Bohrpfahlkopf geführt werden. Die rechte Grafik stellt den Zusammenhang beider Kreise dar. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Leitungsenden im Modell „händisch“ durch eine Abbildungsfunktion verbunden wurden. Hintergrund dazu ist, eine aufwändige und fehleranfällige Modellierung

der Leitungsbögen zu vermeiden, da diese keinen entscheidenden Mehrwert generieren würden.

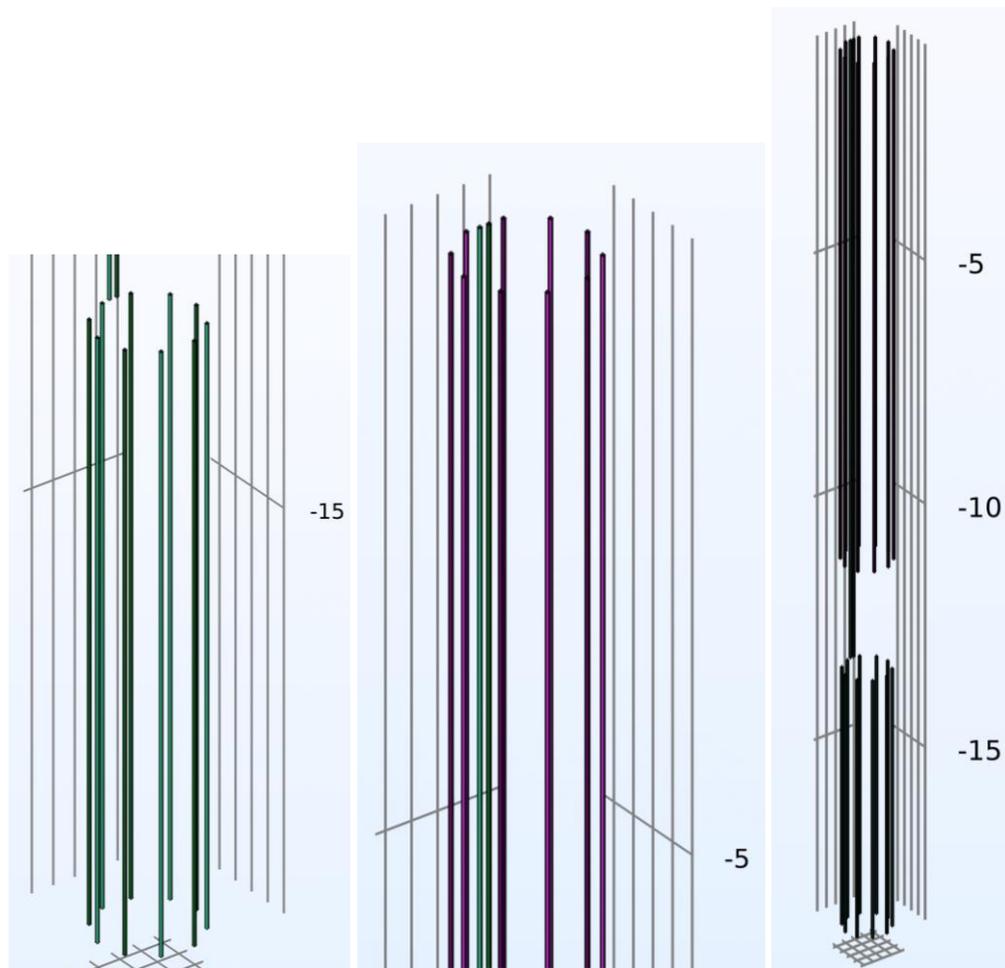


Abb. 3.35: Links: erster Absorberkreis; Mitte: zweiter Absorberkreis; rechts: beide Absorberkreise im Energiepfahl

3.6.3 Randbedingungen

3.6.3.1 Außenlufttemperatur und Innenlufttemperatur

In der folgenden Grafik ist zu sehen, auf welchen Flächen die Funktionen der Außen- und Innenlufttemperatur angesetzt werden. Diese sind aus Kapitel 3.5.1.2 und Kapitel 3.5.2.3 bekannt.

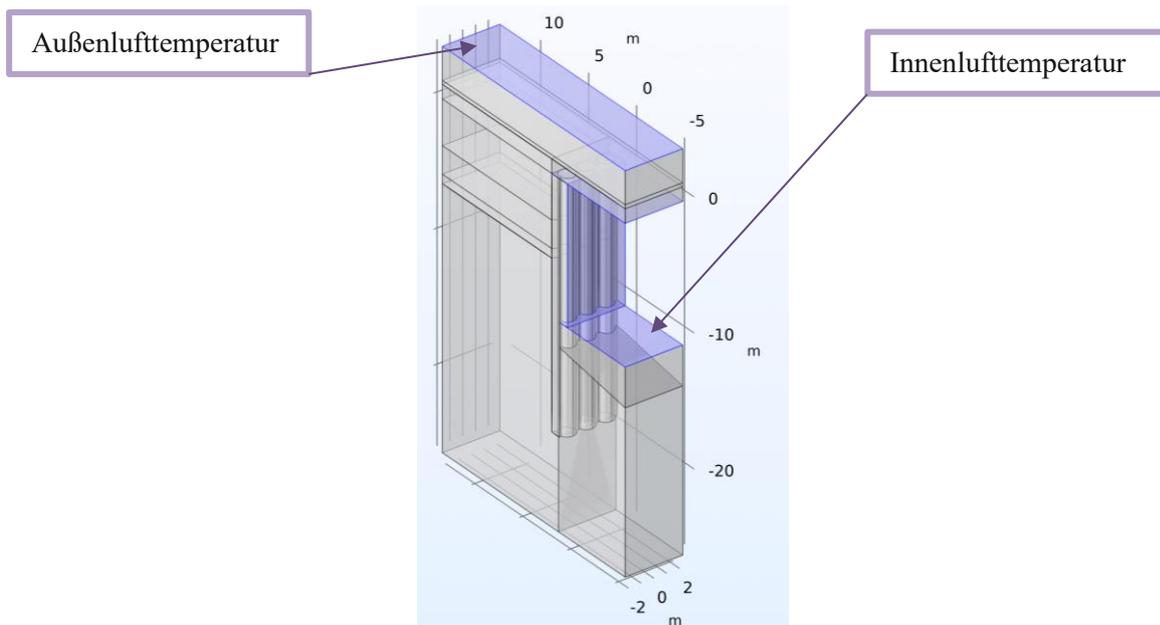


Abb. 3.36: Ansatz der Temperaturrandbedingungen

3.6.3.2 Thermische Isolierung

Alle Modell-Außenflächen, auf die weder die Funktion der Außen- noch die der Innenlufttemperatur angesetzt wird, sind mit einer thermischen Isolierung versehen. An diesen Flächen ist der Wärmestrom bzw. die Wärmestromdichte gleich 0. Diese Annahme kann getroffen werden, da es sich einerseits um Symmetrieebenen handelt und andererseits die Modellränder in einem ausreichend großen Abstand gewählt wurden.

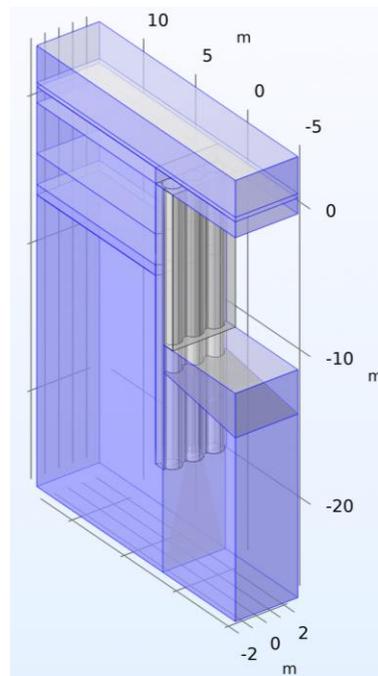


Abb. 3.37: Flächen mit thermischer Isolierung

3.6.4 FE-Netz

Für das gesamte Modell wird automatisiert ein FE-Netz generiert. Für den Energiepfahl und die darin enthaltenen Absorberleitungen wird ein engmaschigeres Netz verwendet, um die Vorgänge im Pfahl genauer beurteilen zu können. Die Auflösung dieses Netzes ist in der nachstehenden Abbildung zu erkennen.

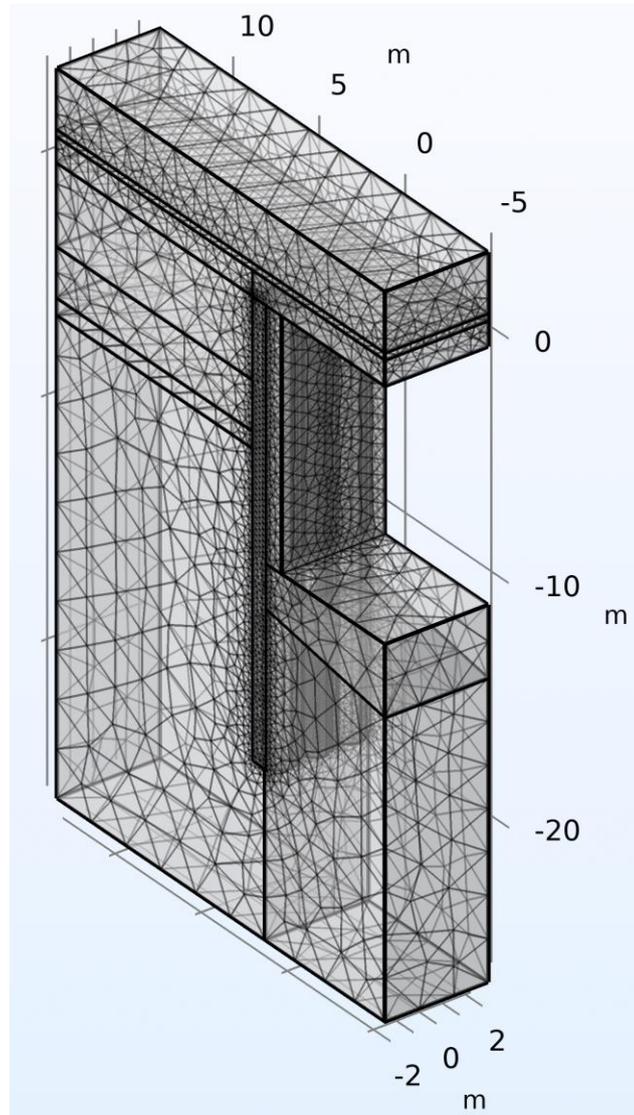


Abb. 3.38: Darstellung des FE-Netzes

3.6.5 Auswertepunkte für die Modellkalibrierung

Für die Validierung des Modells werden letztlich die Ergebnisse der Simulation punktuell mit Messdaten aus Kapitel 3.5.3 abgeglichen. Die dafür erforderlichen Auswertepunkte werden in der Simulation so angesetzt, dass sie den eingebauten Messsensoren im Pfahl entsprechen. Die Positionierung luftseitiger Sensoren im Grundriss ist in Abb. 3.12 sowie jene aller Sensoren in Abb. 3.8 ersichtlich. Die zugehörigen Auswertepunkte im Modell befindet sich in fünf verschiedenen Tiefen (-1 m, -5 m, -9 m, -14 m, -18 m). Exemplarisch wird dies in Abb. 3.39 für

den Punkt bei -18 m dargestellt. In der Abb. 3.40 zeigt sich die Lage der erdseitigen Auswertungspunkte im Modell. Die Lage dieser unterscheidet sich im Zusammenhang mit den beiden Absorberkreisen leicht.

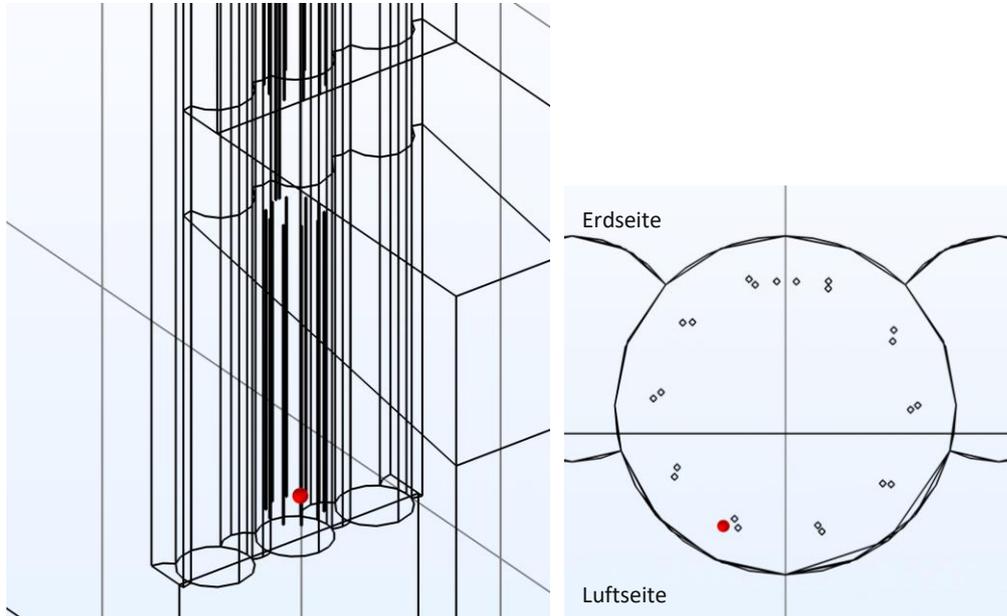


Abb. 3.39: Positionierung des luftseitigen Auswertungspunktes in 18 m Tiefe, links: Axonometrie, rechts: Schnitt

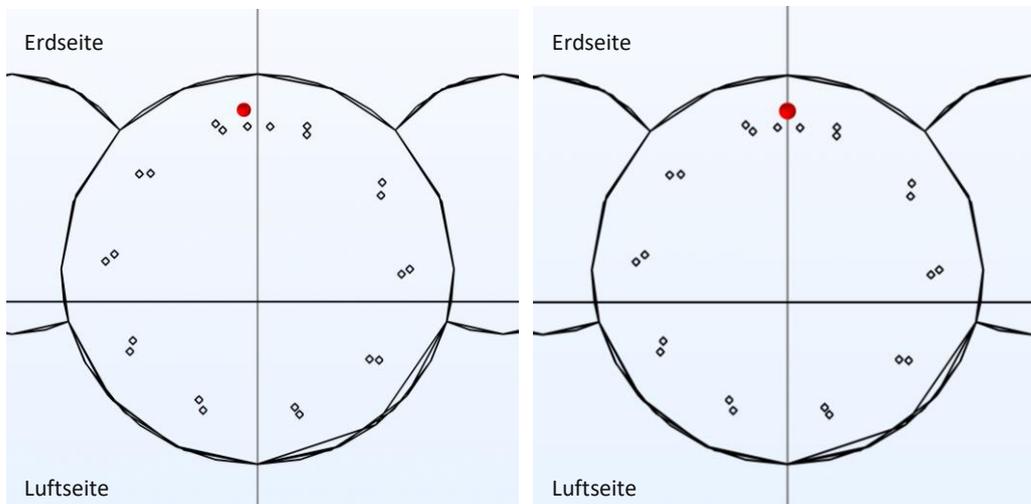


Abb. 3.40: Positionierung der erdseitigen Auswertungspunkte, links: für den Absorberkreis 1 (bei -14 und -18 m), rechts: für den Absorberkreis 2 (bei -9, -5 und -1 m)

3.7 Modellkalibrierung

Für die Modellkalibrierung wurden die mit Unsicherheiten behafteten Parameter (Kapitel 3.4) in einem iterativen Prozess variiert, um letztlich das Modell anhand der Messdaten zu kalibrieren. Im Kapitel 3.7.1 werden die zur Modellkalibrierung variierten Parameter

beschrieben. Im Kapitel 3.7.2 werden letztlich die Ergebnisse des kalibrierten Modells dargestellt und den Messdaten gegenübergestellt.

3.7.1 Variierte Parameter zur Modellkalibrierung

3.7.1.1 Materialparameter

Im Zuge der Kalibrierung wurden einzelne Materialparameter (siehe nachfolgende Tabelle) variiert. Dabei wurden diese immer innerhalb der aus Normen und Richtlinien bekannten Bandbreiten verändert. Die Parameter, welche im Vergleich zu den eingangs festgelegten Werten (siehe Kapitel 3.4.4) variiert wurden, sind in der nachfolgenden Tabelle hellgrün hinterlegt. Dabei zeigt sich, dass die Materialparameter letztlich nur leicht angepasst werden mussten.

Schicht- komplex	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmeleitfähigkeit λ	spezifische Wärmekapazität c	spezifische Wärmekapazität c
	trocken	gesättigt	trocken	gesättigt
	[W/(mK)]	[W/(mK)]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
A	2,0 (1)	-	1500 (1)	-
B ₁	0,4 (2)	1,8 (2)	1600 (2)	2400 (2)
B ₂	0,3 (2)	3,0 (2)	1300 (2)	2400 (2)
F ₄	/	2,3 (3)	/	1100 (3)
F ₅	/	2,3 (3)	/	1100 (3)
Beton	/	2,1 (2)	/	1000
Leitung (PE-HD)	/	0,42 (4)	/	1900 (4)
Flüssigkeit	/	0,6 (5)	/	3810 (5)

(1) SIA [50]

(2) ÖBV Richtlinie „Erdwärmenutzung mit Massivabsorbern“ [51]

(3) <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermekapazitaet.html>

(4) https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyethylen-pe-hd?n=1411_1

(5) Glözl [42]

Tab. 3.12: Materialparameter für das kalibrierte Modell

3.7.1.2 Ausgangszustand

Die Anfangstemperaturverteilung im gesamten Modell wird zunächst mittels einer separaten Simulation berechnet, indem die angesetzte Außen- und Innenlufttemperatur für die Heizperiode 2005/06 zyklisch für fünf Jahre auf den modellierten Bereich einwirkt. Dabei erfolgt die Berechnung ohne Zirkulation der Absorberflüssigkeit, da zum Anfangszeitpunkt

davon ausgegangen wird, dass kein Heizbetrieb vorhanden war. Als erste Startwerte für die unterschiedlichen Körper und Oberflächen werden folgende Werte angesetzt:

Bereich	Art	Temperatur [°C]
Anschüttung	Körper	15
Bodenelemente außer Anschüttung	Körper	10
Betonelemente	Körper	10
Außenlufttemperatur	Oberfläche	24
Innenlufttemperatur	Oberfläche	16,5

Tab. 3.13: Übersicht der initialen Anfangstemperaturen

Der weitere zeitliche Verlauf der Oberflächentemperaturen wird durch die Funktionen abgebildet. Das heißt, dass sich die Temperaturen im gesamten Modell nun ausschließlich zufolge der Außen- sowie der Innenlufttemperatur einstellen.

Für die Außenlufttemperatur wird die Sinusfunktion, welche aus den gemessenen Werten für die Heizperiode 2005/06 erstellt wurde, angesetzt. Der Graph dieser Funktion ist in Abb. 3.17 abgebildet. Die Innenlufttemperatur ergibt sich aus der Kalibrierung. Auf diese Funktion wird in Kapitel 3.7.1.3 näher eingegangen. Die daraus resultierende Temperaturverteilung im Modell wird in den folgenden Darstellungen verdeutlicht.

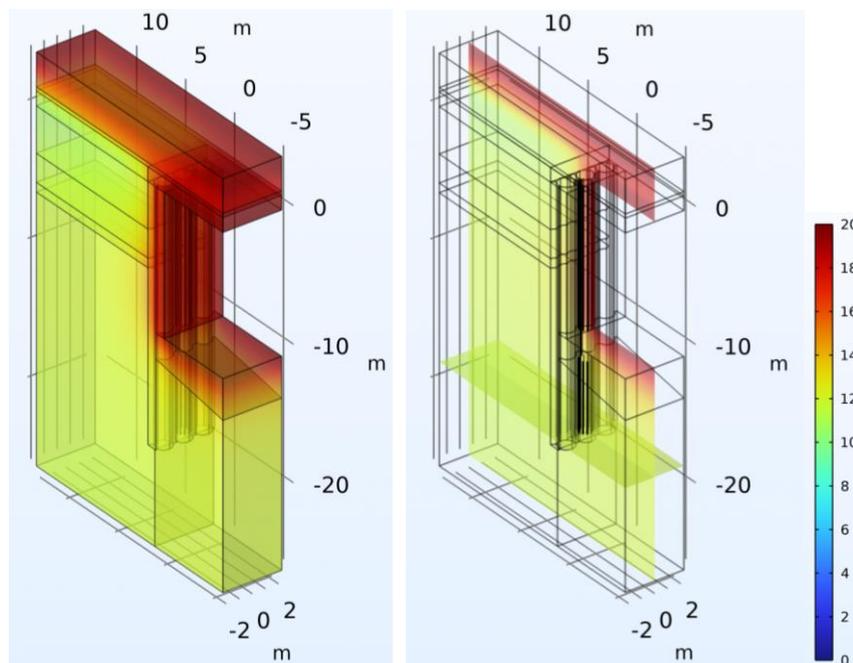


Abb. 3.41: Temperatur nach fünf Jahren ohne geothermische Nutzung, links: Oberflächentemperatur vor Beginn des Heizbetriebs; rechts: Temperaturverlauf in ausgewählten Schnitten

Anschließend wird ein Jahr mit Betrieb der Wärmepumpe und mit Durchströmung der Absorberleitungen simuliert um realistische Temperaturverhältnisse im Gesamtsystem als eigentlichen Ausgangszustand für die Heizperiode 2005/06 erreichen zu können.

Es werden dafür die nachfolgend dargestellten Temperaturverläufe gewählt, wobei diese variiert wurden, um die entsprechenden Anfangswerte für die Heizperiode 2005/06 zu erhalten.

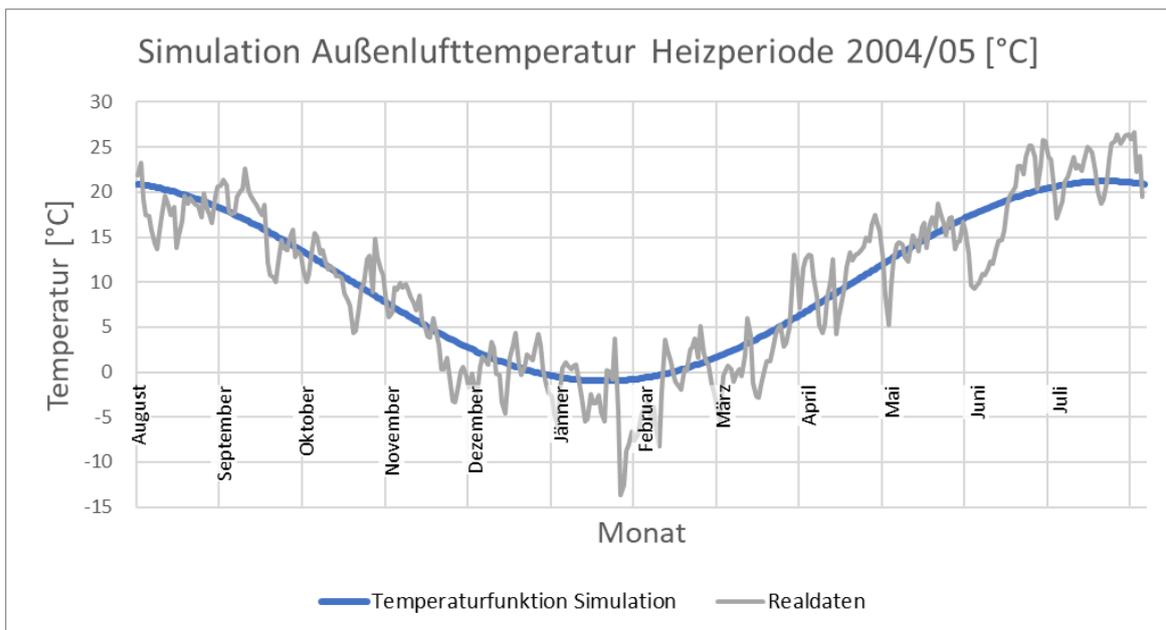


Abb. 3.42: Außenlufttemperatur in der Heizperiode 2004/05

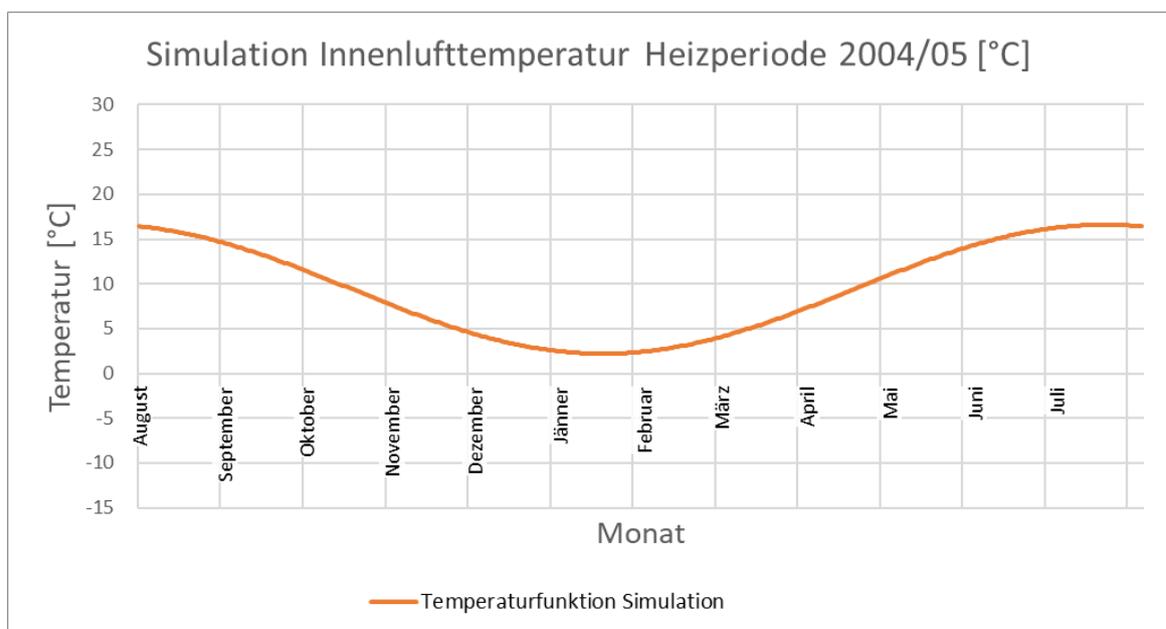


Abb. 3.43: Tunnelinnenlufttemperatur in der Heizperiode 2004/05

Aus diesen Berechnungen ergibt sich für das Modell eine Temperaturverteilung, die als Anfangswerte für die Heizperiode 2005/06 herangezogen werden. In den folgenden Abbildungen sind die Temperaturen für diesen Zeitpunkt dargestellt. Es ist in Abb. 3.44 erkennbar, dass nach einem Jahr Heizbetrieb die Temperaturverteilung Anfang August, wo kein Heizbetrieb stattfindet, etwas anders ist als in Abb. 3.41, wo es keinerlei Nutzung gab. Der Boden ist rund um den Energiepfahl etwas kälter als in weiterer Entfernung.

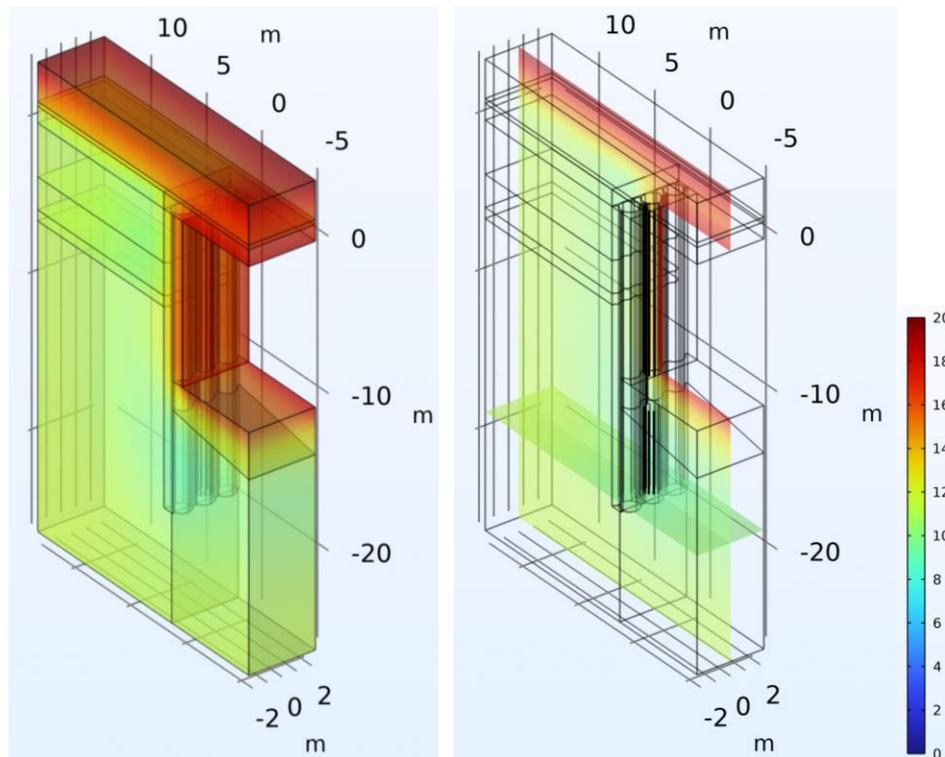


Abb. 3.44: Temperatur-Anfangswerte für die Heizperiode 2005/06

3.7.1.3 Tunnelinnenlufttemperatur

Die Tunnelinnenlufttemperatur beeinflusst wesentlich das Temperaturverhalten im Pfahl. Ausgehend von der Temperatur des Verteilerraums und den theoretischen Überlegungen in Kapitel 3.7.1.3 wurde für die Heizperiode 2005/06 folgende Funktion durch Kalibrierung ermittelt, die die gemessenen Pfahltemperaturen bestmöglich abbildet.

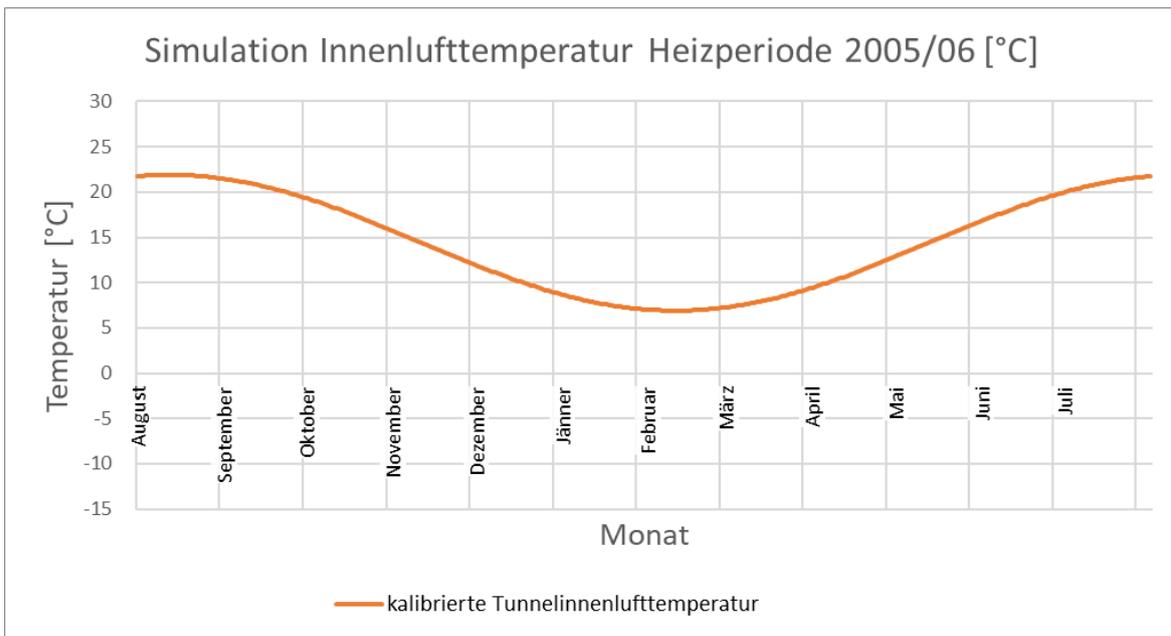


Abb. 3.45: Tunnelinnenlufttemperatur für die Heizperiode 2005/06

Durch den Vergleich der kalibrierten Tunnelinnenlufttemperatur mit der Außenlufttemperatur der Heizperiode 2005/06 wird deutlich, dass die eingangs getroffene Annahme (Tunnelinnenlufttemperatur verhält sich ähnlich zur Außenlufttemperatur) bestätigt. Es ist erkennbar, dass sie den jahreszeitlichen Schwankungen folgt, allerdings im Winter weniger stark abkühlt wie die Außenluft. Des Weiteren wird gezeigt, dass die Innenlufttemperatur phasenverschoben ist – etwa 3 Wochen – und eine etwas geringere Amplitude hat und sich somit gedämpft zur Außenlufttemperatur verhält.

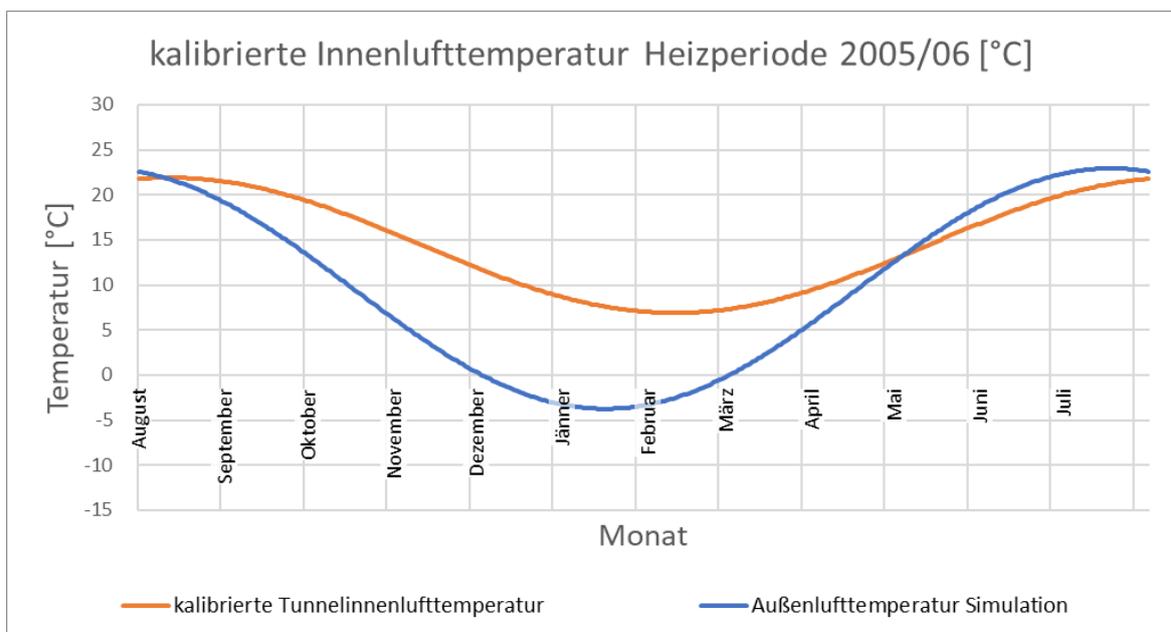


Abb. 3.46: Außenlufttemperatur und (kalibrierte) Tunnelinnenlufttemperatur

3.7.1.4 Strömungsgeschwindigkeit Absorberflüssigkeit

Wie bereits in Kapitel 3.4.7 ausführlich dargelegt, gibt es zwei Absorberkreise, für die unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten anzusetzen sind. In Abb. 3.47 sind die Strömungsgeschwindigkeiten der beiden Kreise gezeigt. Für die Modellierung wird zu Beginn und Ende des Heizbetriebs jeweils ein linearer Übergang angenommen (um den steigenden/fallenden Heizbedarf zu simulieren); während des eigentlichen Heizbetriebs wird eine konstante Strömungsgeschwindigkeit angesetzt. Der Strömungsbeginn ist in der Modellierung ist etwa eine Woche nach dem Beginn zufolge der Messungen angesetzt. Dadurch konnten die an den Auswertpunkten berechneten Pfahltemperaturen über die gesamte Heizperiode hinweg am besten angenähert werden.

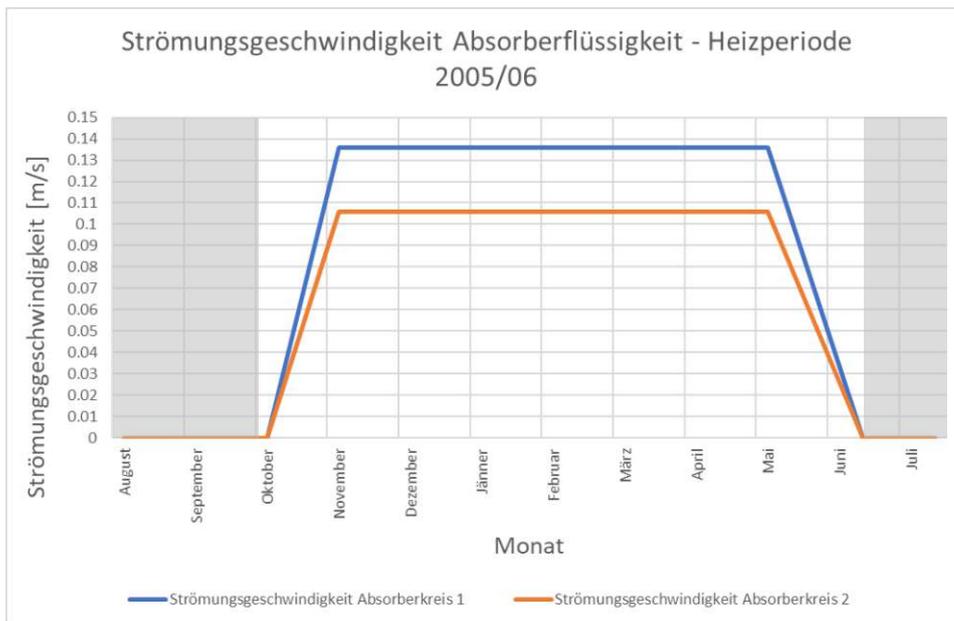


Abb. 3.47: Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit in der Heizperiode 2005/06

3.7.1.5 Vorlauftemperatur

Die Vorlauftemperatur wurde – ausgehend von jener aus Abb. 3.30 – in einem iterativen Prozess variiert, um die gemessenen Pfahltemperaturen bestmöglich nachzusimulieren. Abb. 3.48 zeigt die letztlich kalibrierte Funktion. Grau markiert sind wiederum jene Bereiche, in denen es keine Strömung in den Absorberleitungen gibt (kein Heizbetrieb).

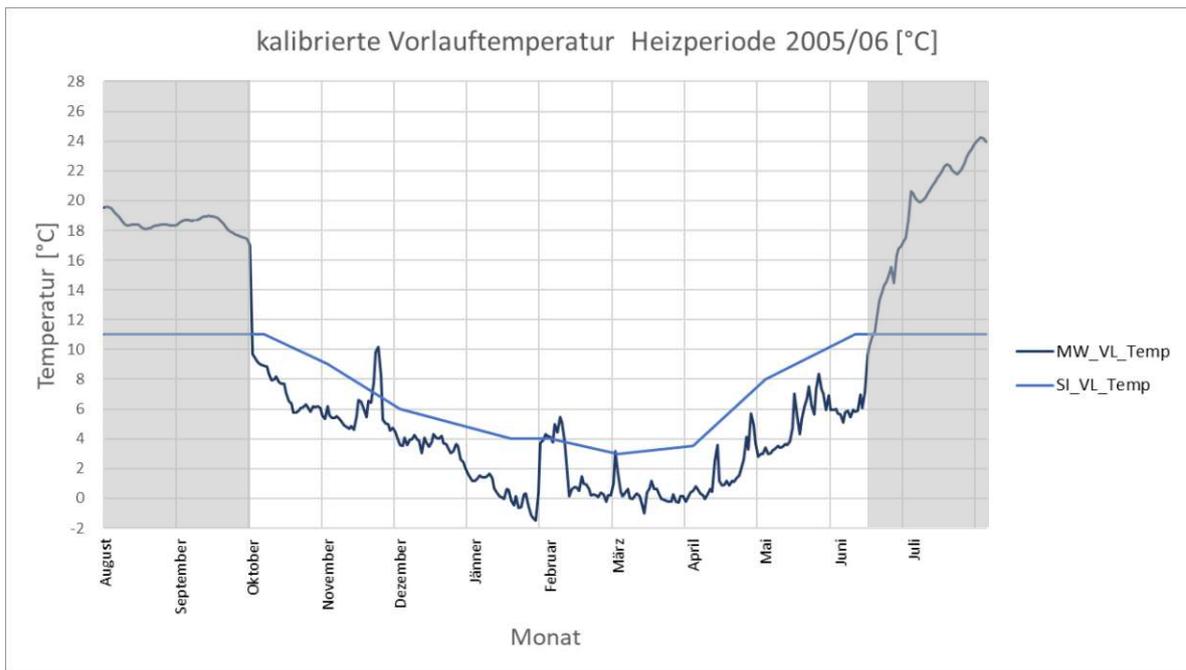


Abb. 3.48: Kalibrierte (SI_VL_Temp) und gemessene (MW_VL_Temp) Vorlauftemperatur in der Heizperiode 2005/06

3.7.2 Berechnungsergebnisse des kalibrierten Modells und Gegenüberstellung mit den Messdaten

3.7.2.1 Temperaturverlauf im Energiepfahl

Die folgenden Abbildungen zeigen das Resultat der Kalibrierung. Es wird der Verlauf der Temperaturen der Simulation (SI) – anhand der gewählten Auswertpunkte – jenen der Messwerte (MW) gegenübergestellt. Dabei sind in der Abb. 3.49 alle Werte gezeigt. Daran anschließend folgt eine getrennte Darstellung für den Bereich des Absorberkreises 1 – unter der Bodenplatte (Messtiefen -14 und -18 m) sowie für den Bereich des Absorberkreises 2 – oberhalb der Bodenplatte (Messtiefen -1 m, -5 m und -9 m).

Auf Basis der Abb. 3.49, Abb. 3.50 und Abb. 3.51 wird klar ersichtlich, dass der generelle Trend des gemessenen Temperaturverhaltens sehr gut mit dem Berechnungsmodell abgebildet werden kann. In Abb. 3.52 wird zusätzlich zu dem Temperaturverhalten im Energiepfahl die Vorlauftemperatur (sowohl die Messwerte als auch der in der Simulation vorgegebene Verlauf) dargestellt. Damit können auch die Spitzen in den gemessenen Temperaturverläufen des Energiepfahls aus dem Verhalten der Vorlauftemperatur erklärt werden. Eine solche Spitze findet sich beispielsweise Anfang Februar, zu der Zeit der Semesterferien, zu der kein voller Heizbetrieb notwendig ist.

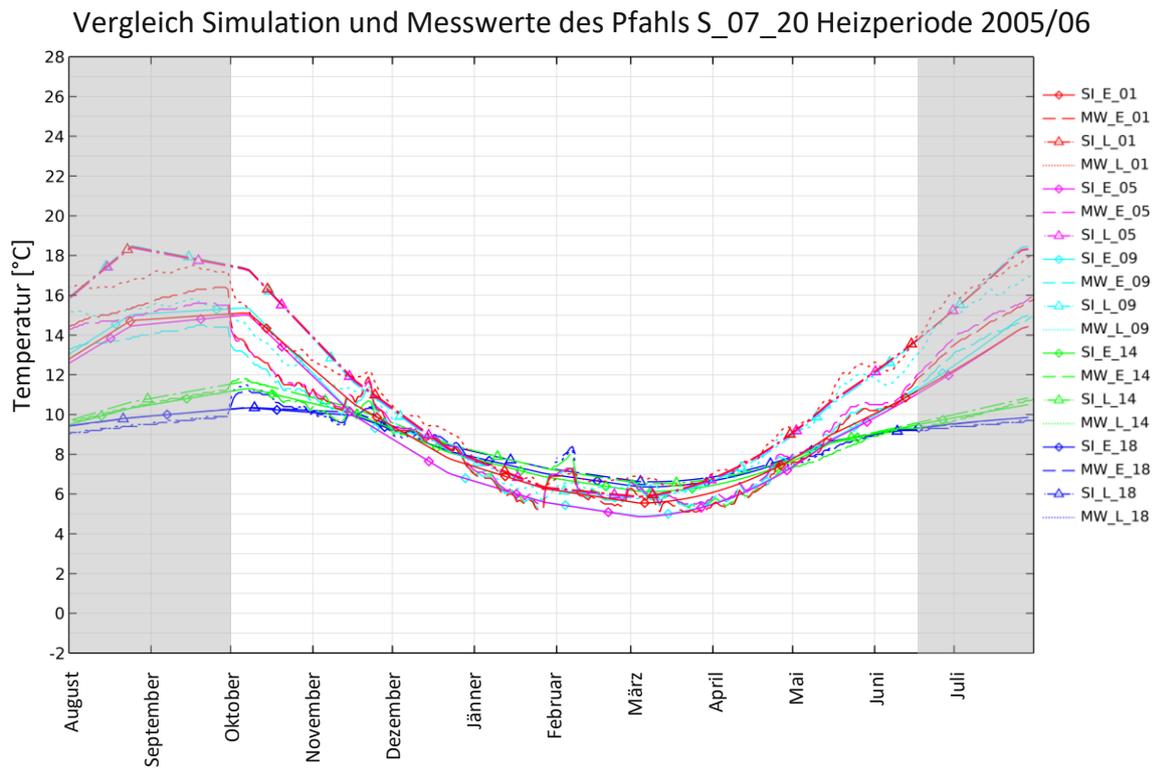


Abb. 3.49: Pfahltemperaturen im Energiepfahl, Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation (SI) mit den Messwerten (MW) für die Heizperiode 2005/06

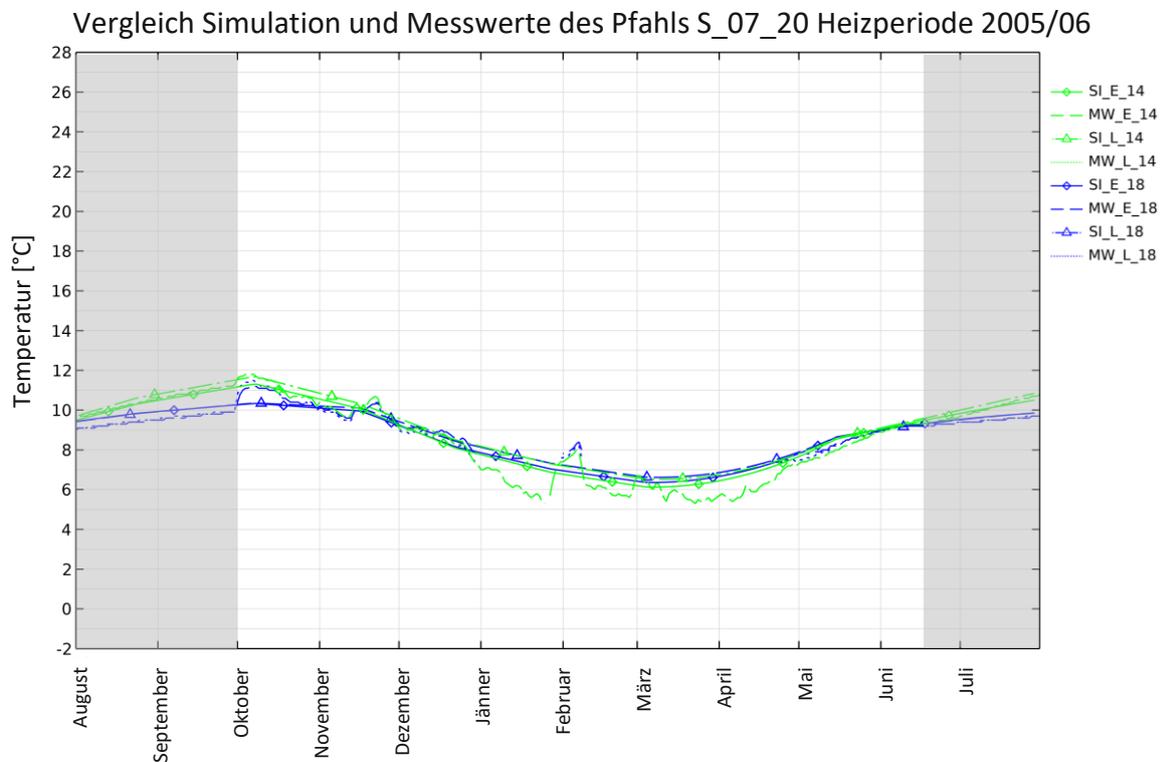


Abb. 3.50: Pfahltemperaturen unterhalb der Bodenplatte (im Bereich des Absorberkreises 1), Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation (SI) mit den Messwerten (MW) für die Heizperiode 2005/06

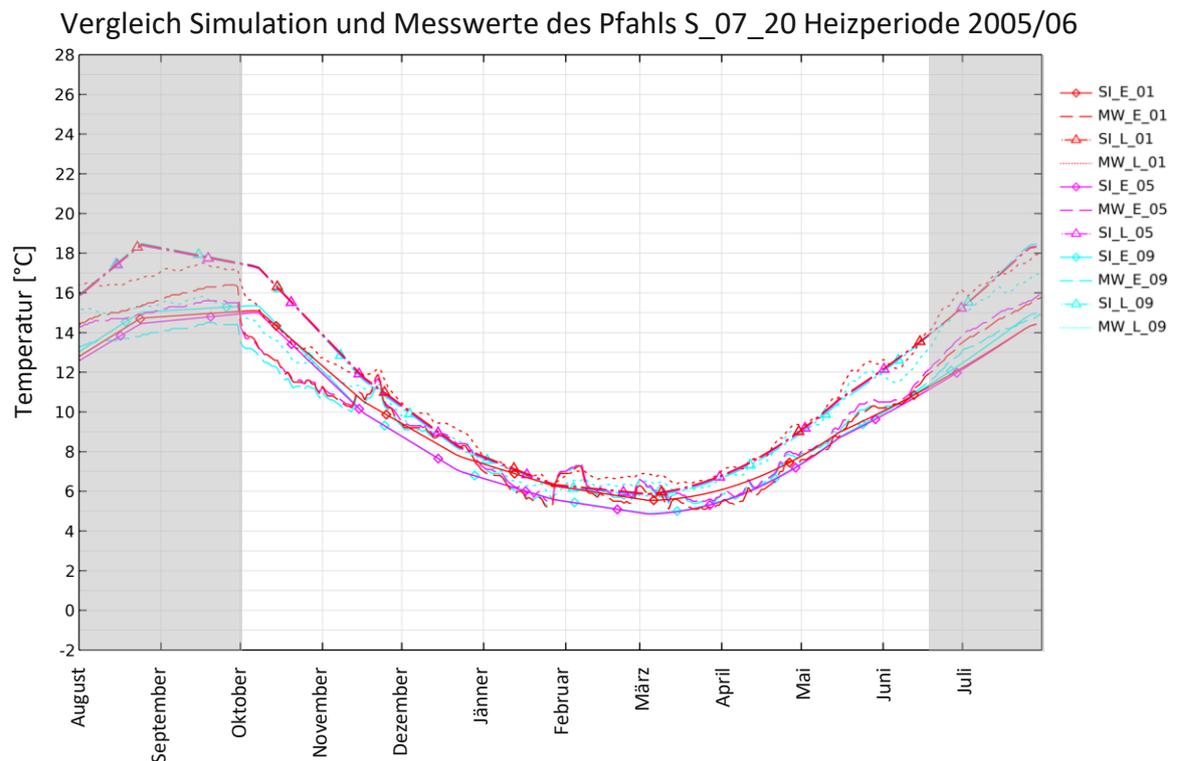


Abb. 3.51: Pfahltemperaturen oberhalb der Bodenplatte (im Bereich des Absorberkreises 2), Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation (SI) mit den Messwerten (MW) für die Heizperiode 2005/06

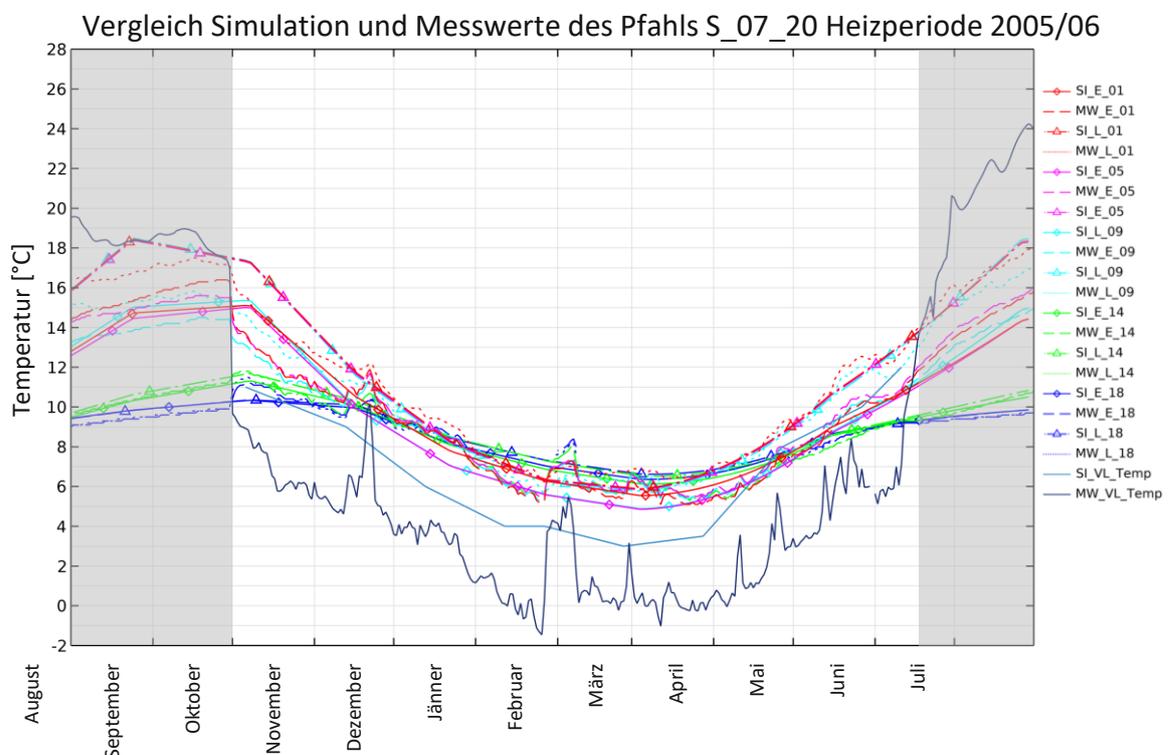


Abb. 3.52: Pfahltemperaturen im Energiepfahl für die Heizperiode 2005/06; Zusätzlich zur Abb. 3.49 - Darstellung der gemessenen Vorlauftemperatur (MW) sowie jener der Simulation (SI)

3.7.2.2 Temperaturverteilung im gesamten Modell

In den folgenden Abbildungen wird das detaillierte Temperaturverhalten anhand von Schnitten für Ende September der Heizperiode 2005/06 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt findet kein Betrieb der Wärmepumpe statt, und es zirkuliert somit keine Flüssigkeit in den Absorberleitungen. Es ist ersichtlich, dass innerhalb des Pfahlquerschnitts auf selbiger Höhe ein sehr ähnliches Temperaturverhalten vorherrscht, wenn der Pfahl beidseitig erdberührt ist. Es wird deutlich, welchen Einfluss die Tunnelinnenluft auf die Temperaturverteilung im Pfahl hat und wie weit in das Erdreich sich diese Temperaturrandbedingung auswirkt. Auch zeigt sich, dass das Erdreich um den Pfahl etwa um 0,3 °C kälter ist als im Boden, der sich weiter entfernt davon befindet, obwohl die Anlage außer Betrieb steht.

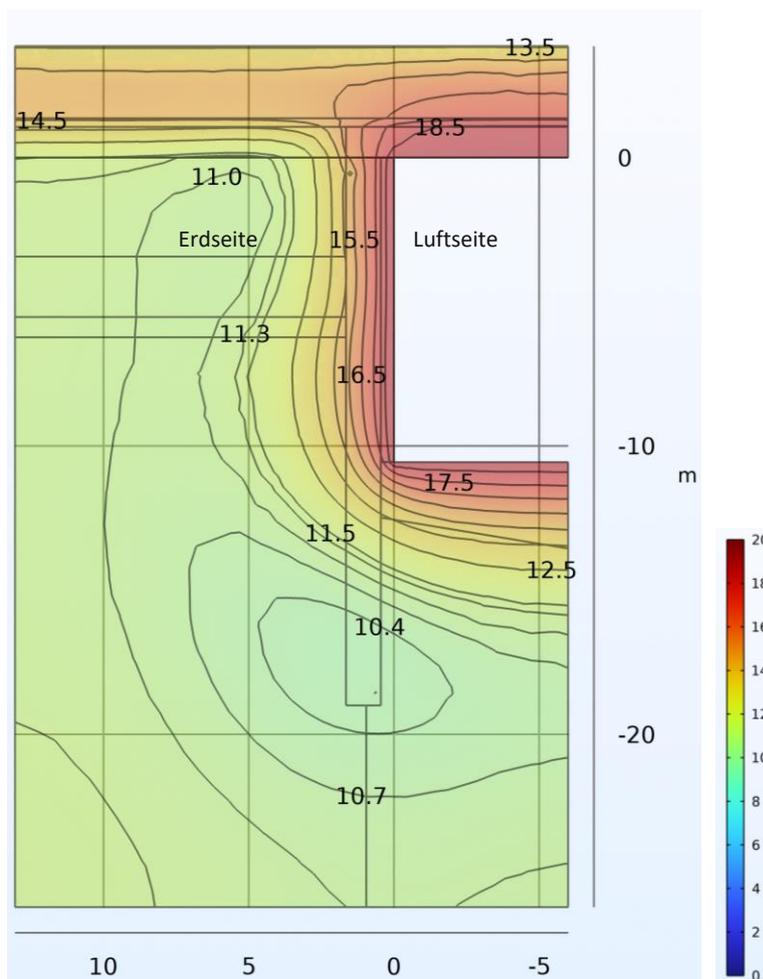


Abb. 3.53: Schnitt durch das Modell (in Modellmitte) mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Ende September – (kein Heizbetrieb) in der Heizperiode 2005/06 [°C]

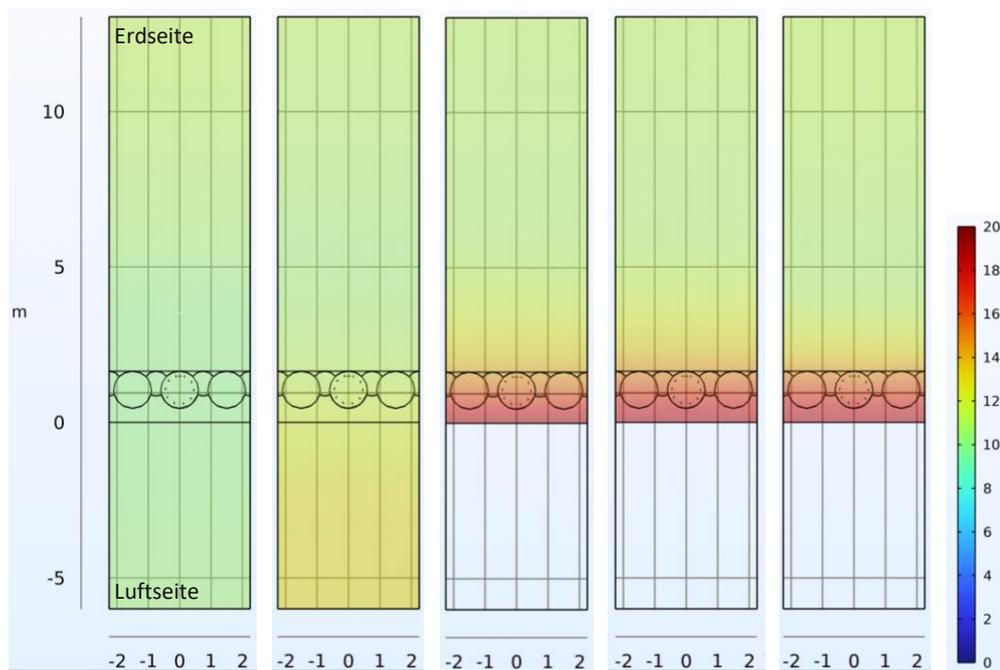


Abb. 3.54: Schnitt durch das Modell in unterschiedlichen Tiefen mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Ende September – (kein Heizbetrieb) der Heizperiode 2005/06; von links nach rechts: -18 m, -14 m, -9 m, -5 m, -1 m, [°C]

Im Vergleich zu diesem Anfangsstadium wird nachfolgend das Verhalten des Pfahls Anfang März abgebildet. Dabei handelt es sich um einen Zeitpunkt im Heizbetrieb. Die Abb. 3.55 verdeutlicht die grundsätzliche Temperaturverteilung in Modellmitte. In den nachfolgenden Schnitten wird zunächst überblicksmäßig ein Schnitt für den Heizbetrieb gezeigt. Daran anschließend wird das Verhalten fokussiert auf den Querschnitt des Bohrpfahls, analysiert.

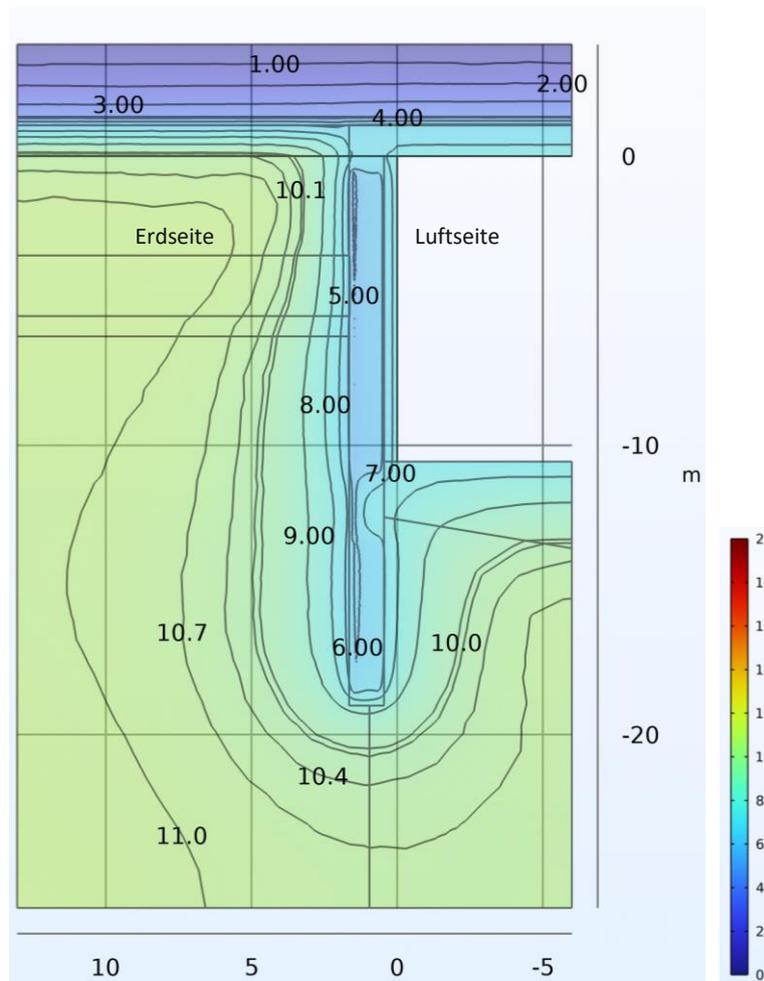


Abb. 3.55: Schnitt durch das Modell (in Modellmitte) mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Anfang März – (Heizbetrieb) in der Heizperiode 2005/06, [°C]

In der obigen Abbildung ist deutlich erkennbar, dass sich die Temperatur des gesamten Energiepfahls absenkt. Die Absenkung im Pfahl scheint auf den ersten Blick sehr regelmäßig zu sein. Das detaillierte Verhalten im Pfahl wird anschließend ausführlich beschrieben. Auch ist zu erkennen, wie weit sich die Temperaturveränderung in das Erdreich auswirkt. Der kleine Knick in der Pfahltemperatur knapp unter der Bodenplatte lässt sich dadurch erklären, dass sich an dieser Stelle nur einseitig Absorberleitungen befinden. Dies sind der Vor- sowie Rücklaufleitungen des Absorberkreises 1. Luftseitig gibt es auf dieser Höhe keine Absorberleitungen, weshalb dort die Temperatur nicht so stark abgesenkt wird. Die folgende Abbildung veranschaulicht den Wärmestrom mittels Pfeile.

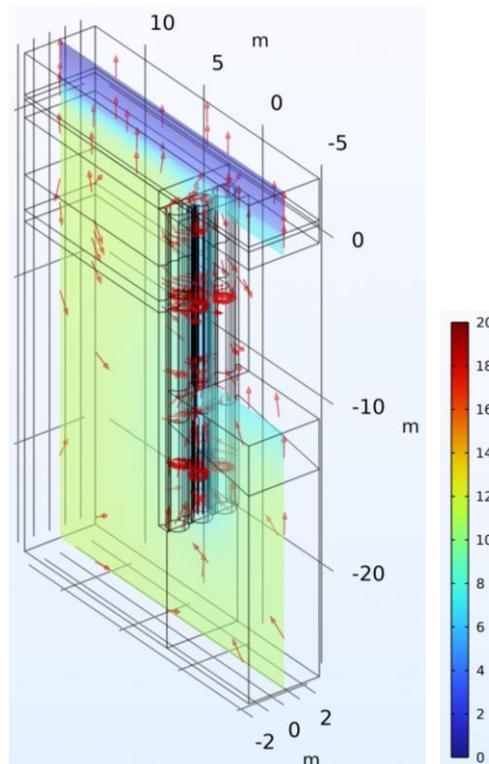


Abb. 3.56: Wärmestrom im Modell mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Anfang März – (Heizbetrieb) in der Heizperiode 2005/06, [°C]

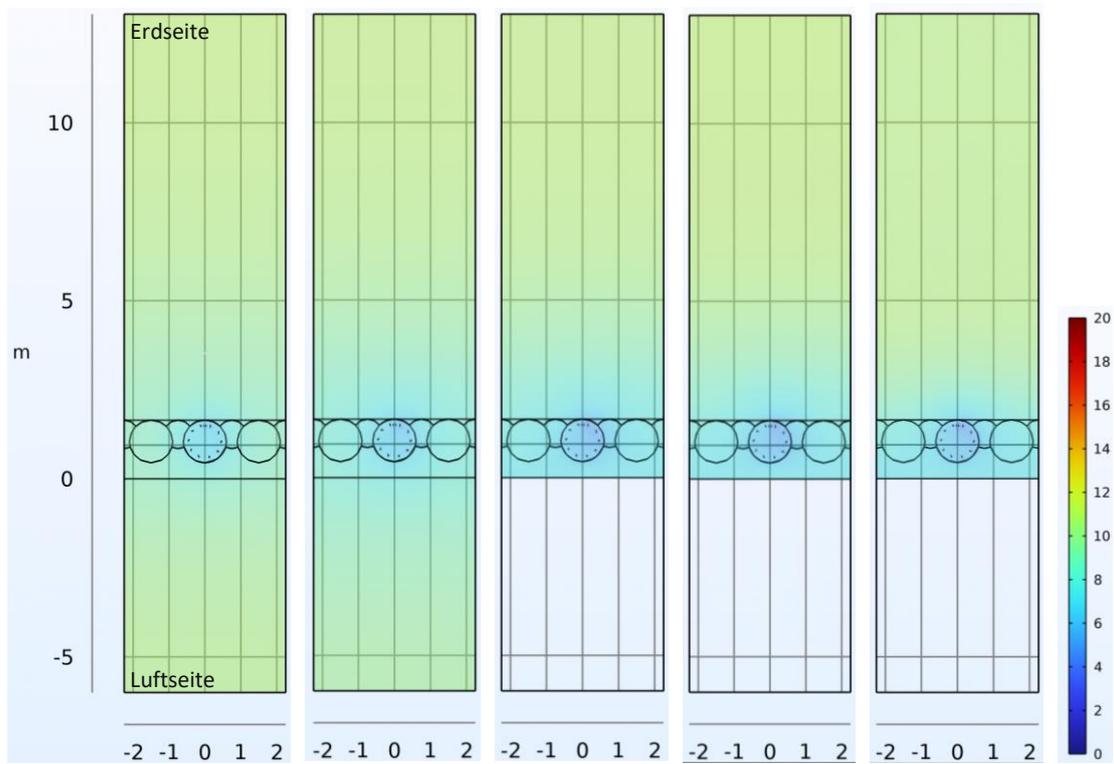


Abb. 3.57: Schnitt durch das Modell in unterschiedlichen Tiefen mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Anfang März – (Heizbetrieb) der Heizperiode 2005/06; von links nach rechts: -18 m, -14 m, -9 m, -5 m, -1 m, [°C]

Es werden für jede der 5 Tiefenlagen der Messsensoren jeweils zwei Abbildungen mit Heizbetrieb Anfang März dargestellt. Die erste Abbildung zeigt den Einfluss des Energiepfahls auf den umliegenden Boden und die Energiewand im Detail. Bei der zweiten Abbildung liegt der Fokus darauf, das Geschehen im Energiepfahl abzubilden. In den Detailabbildungen des Energiepfahls wurde die Farbskala im Vergleich zu jener in Abb. 3.57 angepasst, um die Temperaturdifferenzen noch stärker zu verdeutlichen. Es ist klar erkennbar, dass die Flüssigkeit am Eingangspunkt des Vorlaufs am kältesten ist und in der ersten Absorberleitung bis zu dem Messpunkt bei -18 m deutlich zunimmt.

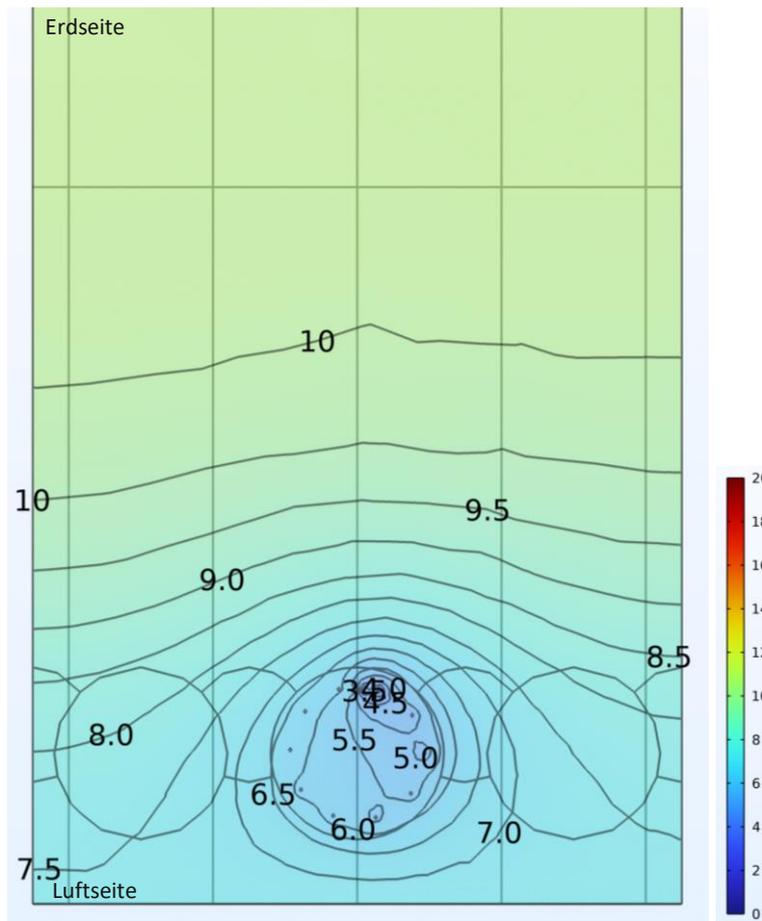


Abb. 3.58: Übersicht Schnitt in -1 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]

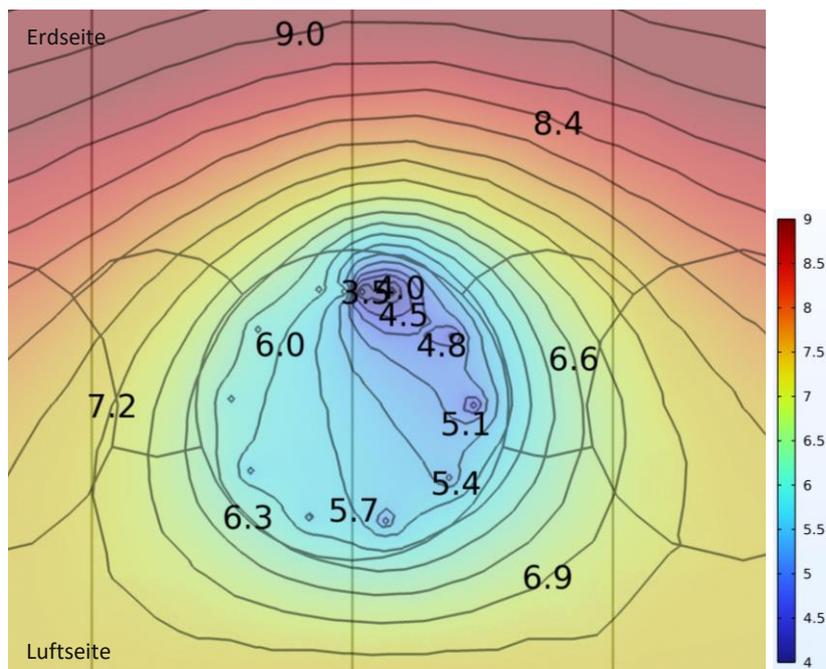


Abb. 3.59: Detailschnitt zu Abb. 3.58, [°C]

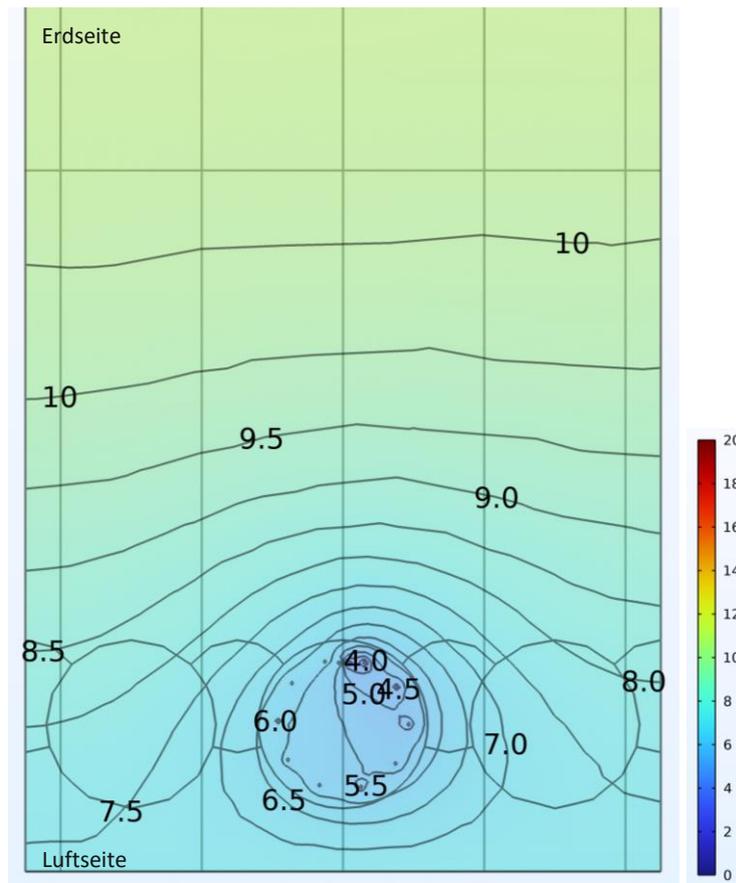


Abb. 3.60: Übersicht Schnitt in -5 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]

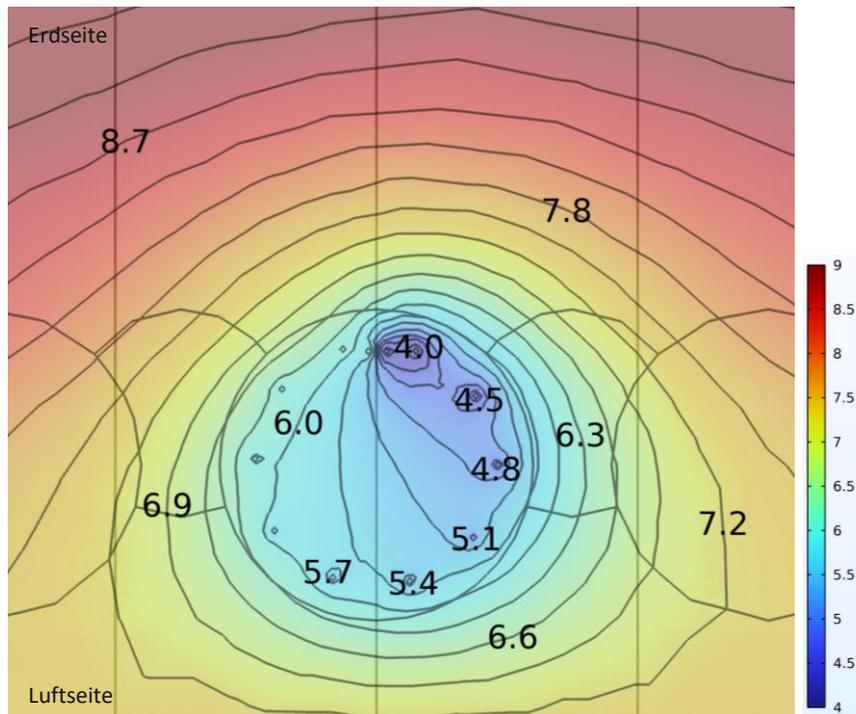


Abb. 3.61: Detailschnitt zu Abb. 3.60, [°C]

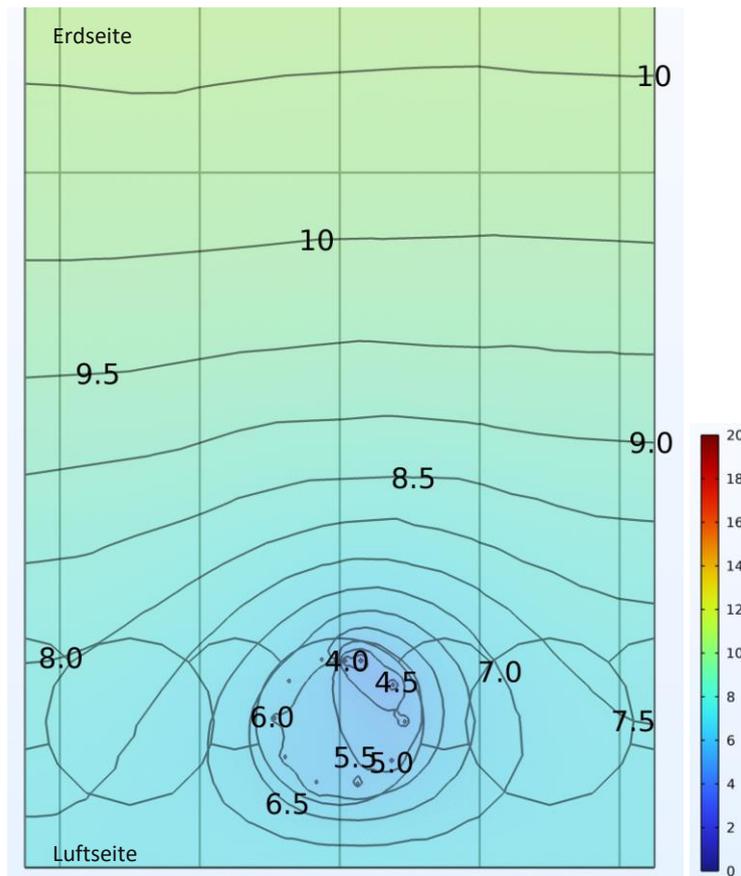


Abb. 3.62: Übersicht Schnitt in -9 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]

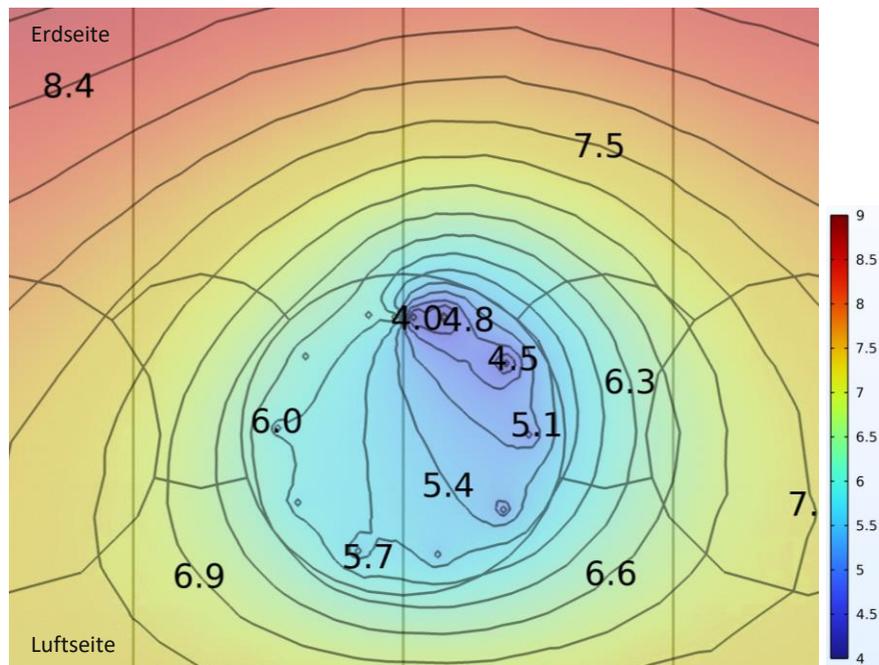


Abb. 3.63: Detailschnitt zu Abb. 3.62, [°C]

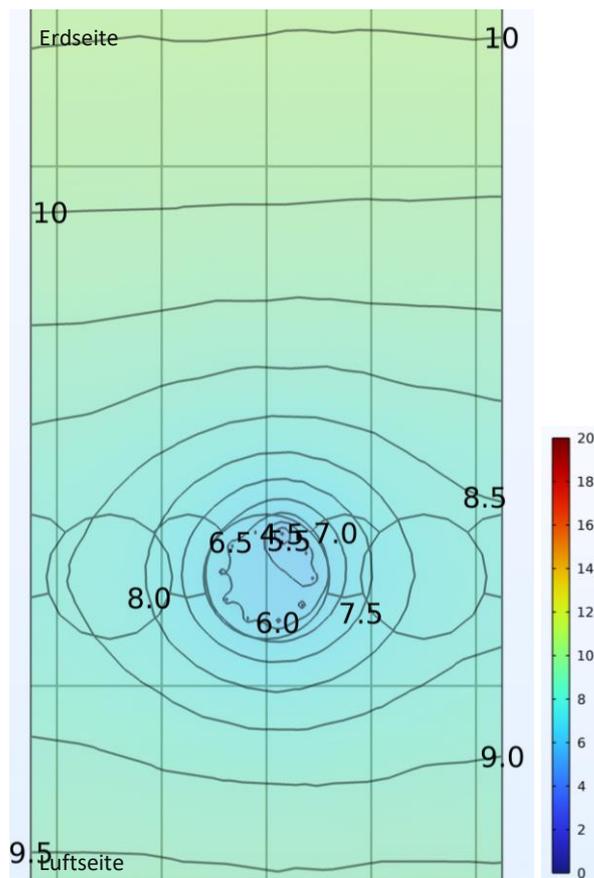


Abb. 3.64: Übersicht Schnitt in -14 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]

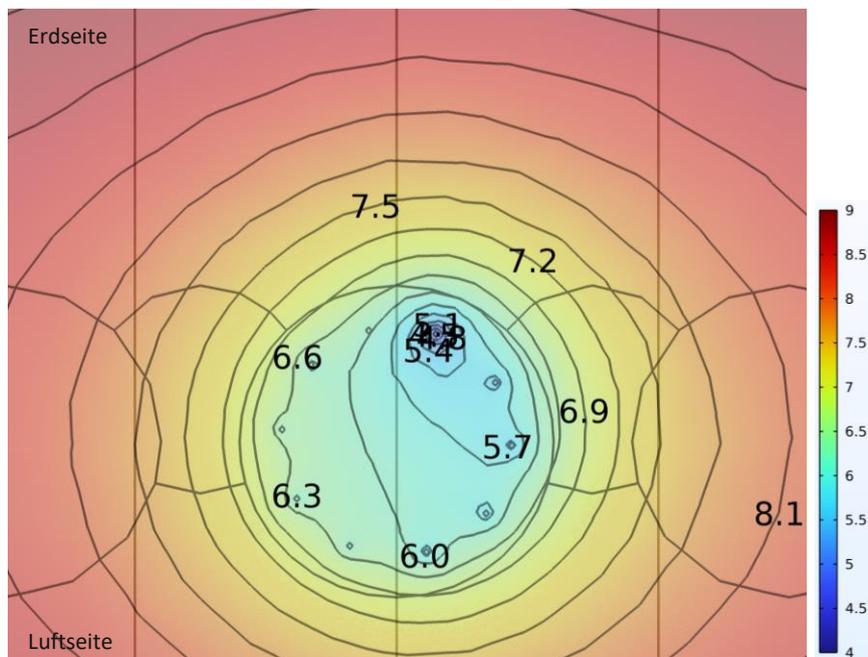


Abb. 3.65: Detailschnitt zu Abb. 3.64, [°C]

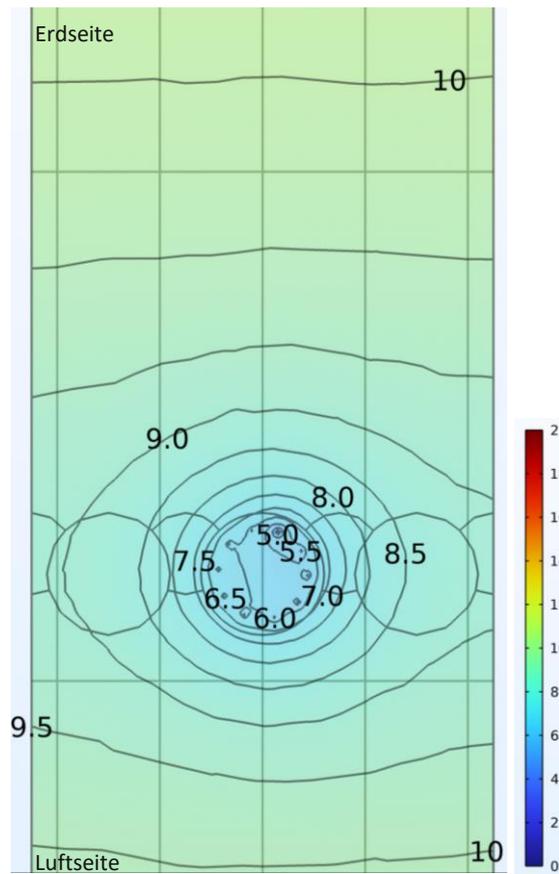


Abb. 3.66: Übersicht Schnitt in -18 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]

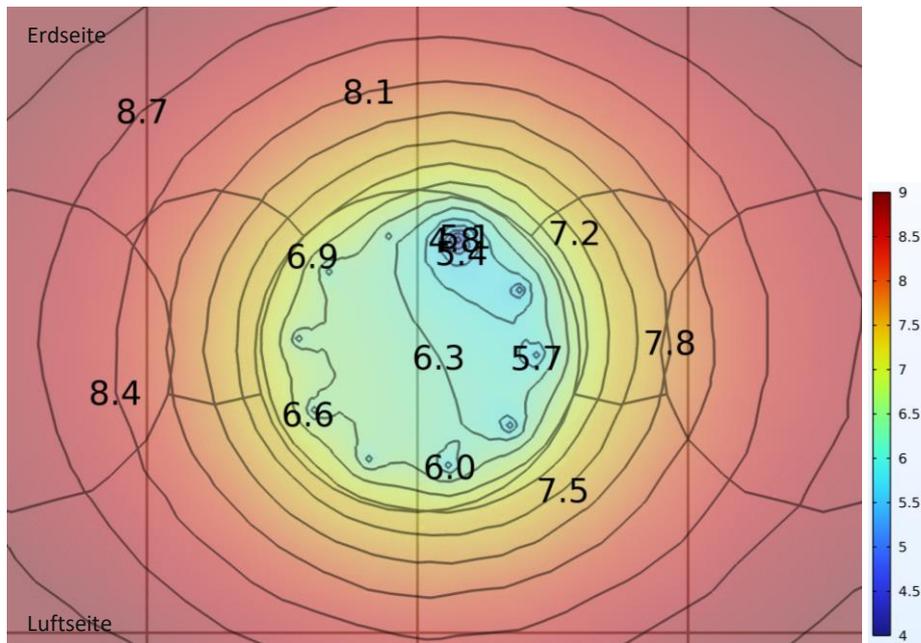


Abb. 3.67: Detailschnitt zu Abb. 3.66, [°C]

3.7.2.3 Temperaturverlauf des Vorlaufs und des Rücklaufs

Die nachstehenden Grafiken zeigen das Temperaturverhalten des Vorlaufs sowie des Rücklaufs der beiden Absorberkreise (Abb. 3.68) Zusätzlich ist die sich daraus ergebende Temperaturdifferenz abzulesen. Es wird deutlich, dass die Vorlautemperatur annähernd gleich der Rücklauftemperatur ist, wenn die Anlage nicht in Betrieb ist. Sofern „kalte“ Absorberflüssigkeit von der Wärmepumpe zuströmt, wird diese in den Absorberleitungen erwärmt, und es ergibt sich eine höhere Rücklauftemperatur. Auch kann ein leicht unterschiedliches Temperaturverhalten der beiden Rückläufe der Absorberkreise beobachtet werden. Dies wird in Abb. 3.69 detailliert dargestellt. Anfang Oktober gibt es keine Temperaturdifferenz, da der Heizbetrieb in der Simulation erst eine Woche später startet.

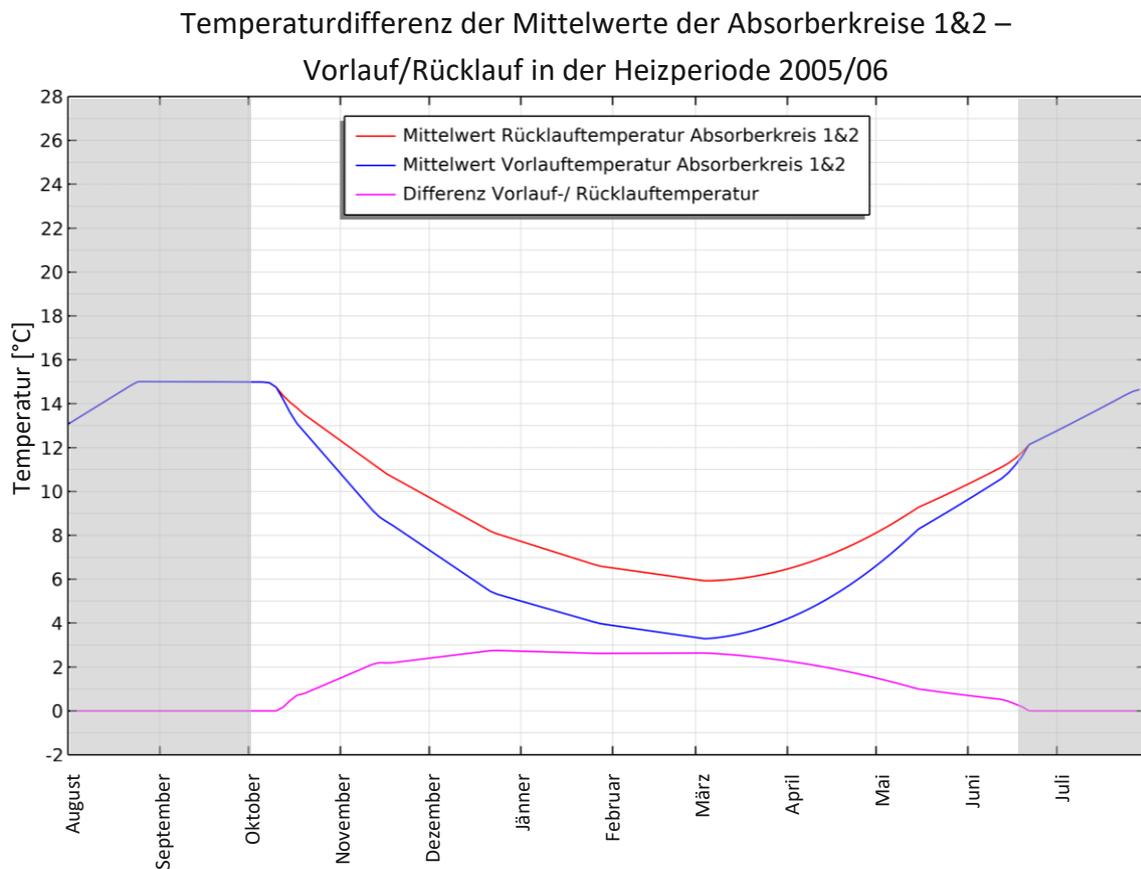


Abb. 3.68: Berechnete Vorlauf- und Rücklauftemperatur sowie Differenz für die Absorberkreise 1 und 2 beim Energiepfahl S_07_20 in der Heizperiode 2005/06

Temperaturdifferenz der beiden Rückläufe des Pfahls S_07_20 in der Heizperiode 2005/06

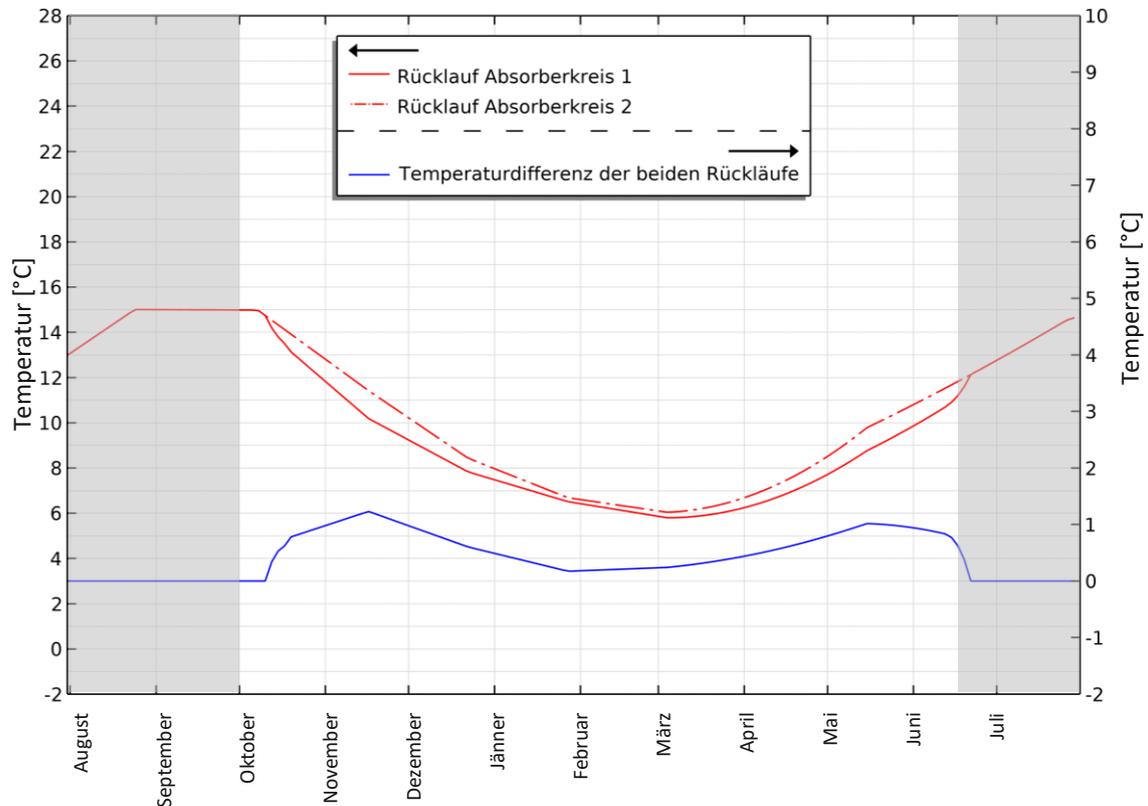


Abb. 3.69: Berechnete Rücklauftemperaturen des Absorberkreises 1 sowie des Absorberkreises 2 und Differenz beim Energiepfahl S_07_20 in der Heizperiode 2005/06

Die niedrigere Temperatur des Rücklaufs des ersten Absorberkreises ist durch die Geometrie zu erklären. Da hier der Vorlauf sehr nahe am Rücklauf liegt, wird zweiterer wieder etwas abgekühlt („Kurzschlusseffekt“), bis er aus dem Pfahl in die Anbindeleitung strömt. Die rechte Skala der Abb. 3.69 zeigt die Temperaturdifferenz der beiden Absorberkreise. Die linke bildet die absolute Temperatur der Absorberkreise ab.

3.7.2.4 Wärmeleistung

Die Berechnung der Entzugsleistung erfolgt über die bekannten Flüssigkeitsparameter sowie die Temperaturdifferenz aus der Simulation. Letztere ist in Abb. 3.68 dargestellt. Da die Temperaturdifferenz im Vollbetrieb relativ konstant bei zwischen 2,4-2,8 °C liegt, werden diese Werte für die Vergleichsberechnung herangezogen. Dabei wird berücksichtigt, dass der Rücklauf des zweiten Absorberkreises in der Regel etwas wärmer ist als jener des ersten Absorberkreises. Wichtig zu erwähnen ist, dass es sich hierbei um eine Dauerleistung handelt, da einzelne Leistungsspitzen in der Modellierung nicht abgebildet sind. Der Energieertrag wird gesondert für die beiden Kreisläufe berechnet, da diese im Pfahl klar getrennt sind.

$$Q = m_{ABS} \cdot c_{ABS} \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

$$Q_{Pfahl} = Q/M_{Pfahl} \quad (3.6)$$

Berechnung der Entzugsleistung für den Absorberkreis 1			
c	spezifische Wärmekapazität Absorberflüssigkeit	3810	[J/(kg·K)]
A _{ABS1}	Querschnittsfläche der Absorberleitung	0.0004	[m ²]
V _{ABS1}	Ist - Strömungsgeschwindigkeit	0.1360	[m/s]
V _{ABS1}	Volumenstrom	5.50E-05	[m ³ /s]
ρ _{ABS1}	Dichte Absorberflüssigkeit	1036	[kg/m ³]
m _{ABS1}	Massenstrom Absorberflüssigkeit	5.70E-02	[kg/s]
ΔT	Temperaturdifferenz	2.4	[K]
M _{Pfahl1}	Manteloberfläche Pfahl	20.0	[m ²]
Q ₁	gesamte Wärmemenge	521.4	[W]
Q _{Pfahl1}	Wärmemenge bezogen auf die Mantelfläche des Pfahls	26.10	[W/m ²]

Tab. 3.14: Berechnung der Entzugsleistung für den Absorberkreis 1 in der Heizperiode 2005/06

Berechnung der Entzugsleistung für den Absorberkreis 2			
c	spezifische Wärmekapazität Absorberflüssigkeit	3810	[J/(kg·K)]
A _{ABS2}	Querschnittsfläche der Absorberleitung	0.0004	[m ²]
V _{ABS2}	Ist - Strömungsgeschwindigkeit	0.1060	[m/s]
V _{ABS2}	Volumenstrom	4.29E-05	[m ³ /s]
ρ _{ABS2}	Dichte Absorberflüssigkeit	1036	[kg/m ³]
m _{ABS2}	Massenstrom Absorberflüssigkeit	4.44E-02	[kg/s]
ΔT	Temperaturdifferenz	2.8	[K]
M _{Pfahl2}	Manteloberfläche Pfahl	37.7	[m ²]
Q ₂	gesamte Wärmemenge	474.1	[W]
Q _{Pfahl2}	Wärmemenge bezogen auf die Mantelfläche des Pfahls	12.58	[W/m ²]

Tab. 3.15: Berechnung der Entzugsleistung für den Absorberkreis 2 in der Heizperiode 2005/06

Es ergibt sich aus der Bemessung eine Entzugsleistung von etwa 38 W/m² als Dauerleistung im Vollbetrieb. Dies ist ein Wert, der in der Größenordnung anderer Forschungsergebnisse liegt [23].

3.7.3 Abschließende Erkenntnisse zur Modellkalibrierung

Das wesentliche Ergebnis der Kalibrierung ist, dass das gemessene Temperaturverhalten im Pfahl nachmodelliert werden konnte. Dabei wird deutlich, an welchen Stellen im Pfahl die Erwärmung der Absorberflüssigkeit erfolgt. Vor allem die für den Energiegewinn entscheidenden Temperaturen an den Stellen der Messsensoren lassen sich anhand der Auswertungspunkte in der Simulation gut nachbilden. Für eine weitere Forschung an ähnlichen

Systemen empfiehlt es sich – sofern möglich – einen Temperatursensor im Tunnel anzubringen, um die Tunnelinnenlufttemperatur messen zu können, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Temperatur im Pfahl hat.

Es werden zusammenfassend alle variierten Parameter angegeben:

- Materialparameter: verhältnismäßig geringer Einfluss
- Anfangstemperatur Boden: großer Einfluss, wenn kein Heizbetrieb stattfindet, während des Heizbetriebs nur ein geringer Einfluss
- Tunnelinnenlufttemperatur: großer Einfluss sowohl während des Heizbetriebs als auch in Zeiträumen ohne Heizbetrieb
- Strömungsgeschwindigkeit Absorberflüssigkeit: großer Einfluss
- Vorlauftemperatur: großer Einfluss
- Die Grundwasserfließgeschwindigkeit wurde im kalibrierten Modell nicht angesetzt.

Das erstellte und kalibrierte Simulationsmodell kann als Grundlage für weitere Projekte dienen. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich Vordimensionierungen weiterer Anlagen zu erstellen. Im Kapitel 3.8 werden die Parameter mit einem großen Einfluss im Rahmen einer Parameterstudie variiert, um die Bedeutung der einzelnen Parameter hervorzuheben und ihren Einflussbereich zu zeigen.

3.8 Parameterstudie – Einfluss einzelner Variablen

Ausgehend von dem in Kapitel 3.7 vorgestellten, kalibrierten Modell werden in diesem Kapitel einzelne, wesentliche Variablen verändert, um deren Einfluss auf die Temperaturverteilung zu verdeutlichen. Dadurch wird ihre jeweilige Auswirkung auf das Verhalten des Gesamtsystems veranschaulicht. Es wird immer nur eine Variable verändert, um das Verhalten hervorzuheben. Die in den Grafiken grau hinterlegten Bereiche markieren wiederum die Zeiträume ohne Heizbetrieb. Der grundlegende Trend des Temperaturverhaltens wird durch verhältnismäßig wenige Faktoren bestimmt. Demzufolge werden die folgenden Variablen im Rahmen der Parameterstudie variiert:

- Tunnelinnenlufttemperatur (Kapitel 3.8.1)
- Vorlauftemperatur (Kapitel 3.8.2)
- Anfangstemperatur des Bodens (Kapitel 3.8.3)
- Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit (Kapitel 3.8.4)

3.8.1 Tunnelinnenlufttemperatur

Bei der Tunnelinnenlufttemperatur ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die Sinusfunktion von drei Variablen bestimmt wird. Dem Mittelwert, der Amplitude sowie der Phasenverschiebung. Das Abändern aller 3 Parameter hat unterschiedliche Auswirkungen. In dieser Arbeit wird ausgehend von der kalibrierten Sinusfunktion der Tunnelinnenlufttemperatur einerseits der Mittelwert und andererseits die Amplitude variiert. Es wird jeweils ein Beispiel folgen, bei dem der Wert verringert wird und eines bei dem selbiger erhöht wird, um die Veränderung im Temperaturverhalten des Pfahls zu veranschaulichen. Die nachfolgenden Abbildungen verdeutlicht die Ergebnisse dieser Parameterstudie.

3.8.1.1 Variation des Mittelwerts

Variation der Tunnelinnenlufttemperatur des Pfahls S_07_20 Heizperiode 2005/06

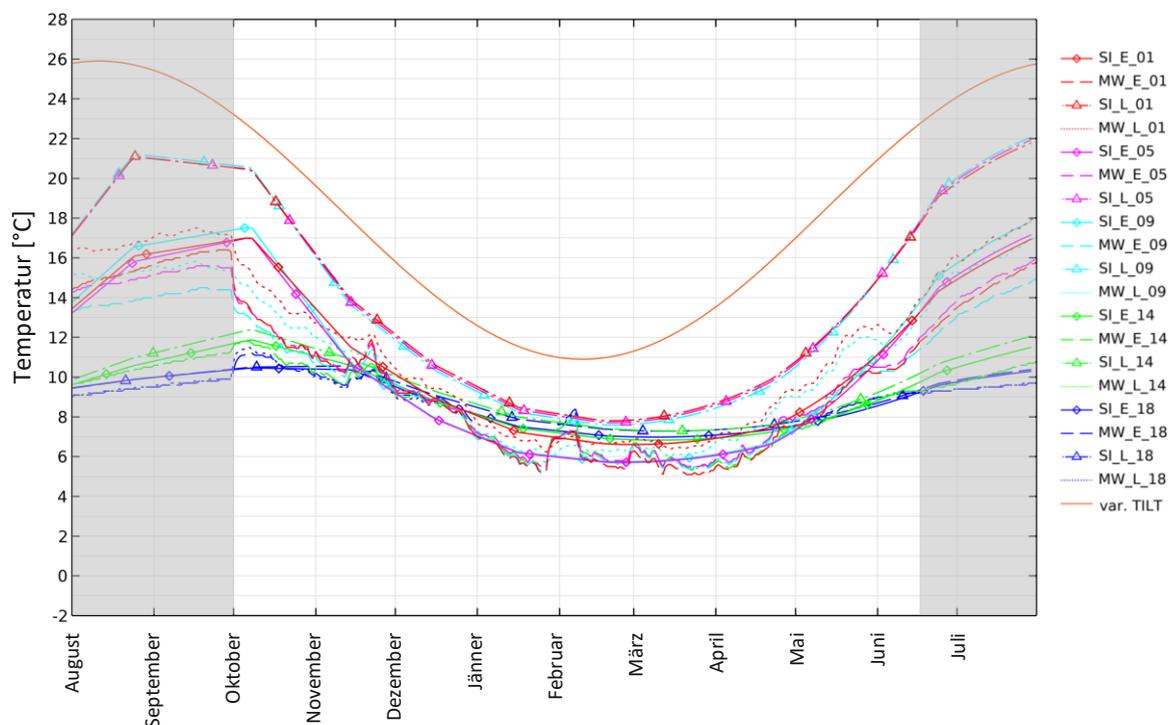


Abb. 3.70: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation der Mittelwert der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – erhöht wurde

Anhand von Abb.3.70 wird deutlich, dass die Veränderung des Mittelwerts der Temperaturfunktion einen deutlich geringeren Einfluss auf die Pfahltemperatur im Bereich unterhalb der Bodenplatte (Pfahl beidseitig erdberührt) hat, wenn die Anlage nicht in Betrieb ist. Speziell die luftseitigen Pfahltemperaturen zeigen zum Zeitpunkt ohne Wärmepumpenbetrieb bei einem erhöhten Mittelwert gestiegene Temperaturen an. Bei Heizbetrieb ist deutlich zu erkennen, dass sich die Variation des Mittelwerts stärker auf die Auswertpunkte oberhalb der Bodenplatte auswirkt als auf jene die beidseitig erdberührt sind. Es kann gezeigt werden, dass bei einer Erhöhung des Mittelwerts der

Tunnelinnenlufttemperatur die Temperaturen an den Auswertpunkten oberhalb der Bodenplatte um etwa 2 °C steigen und unterhalb um etwa 1 °C.

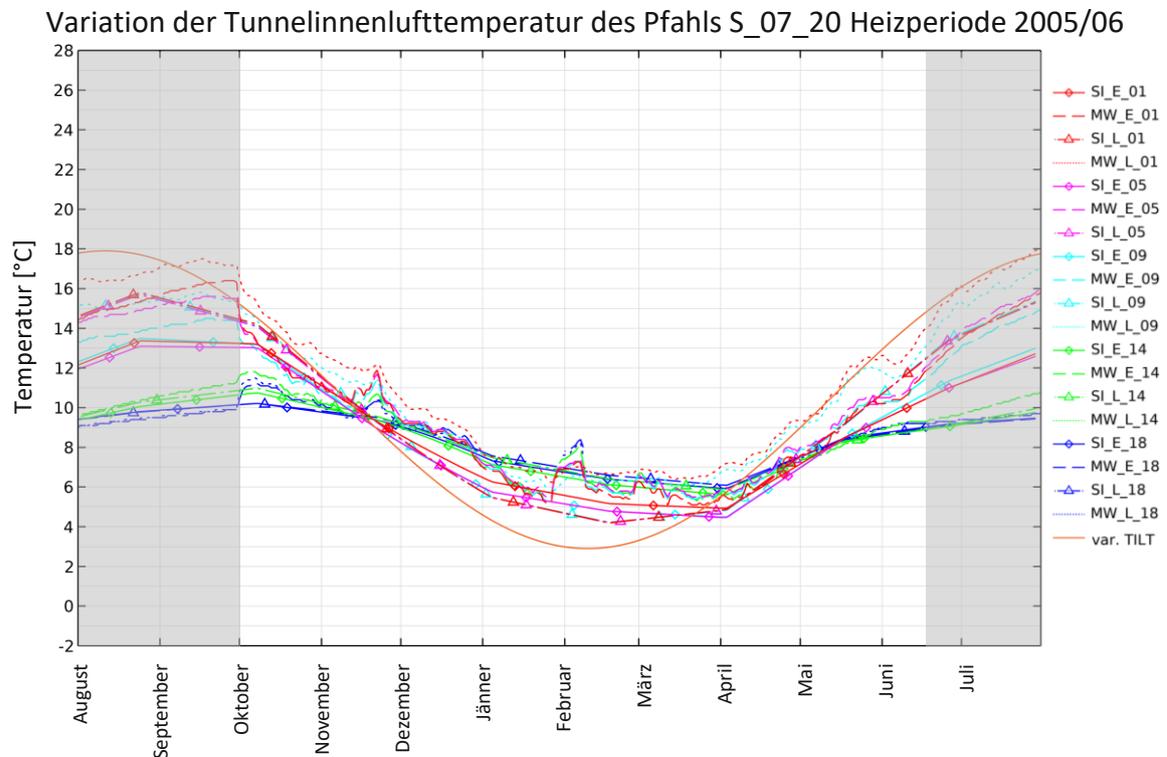


Abb. 3.71: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation der Mittelwert der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – verringert wurde

Anhand von Abb. 3.71 wird dargestellt, dass die Verringerung des Mittelwerts der Tunnelinnenlufttemperatur die Pfahltemperatur im Bereich unterhalb der Bodenplatte (Pfahl beidseitig erdberührt) nur minimal beeinflusst, wenn die Anlage außer Betrieb ist. Speziell die Pfahltemperaturen des zweiten Absorberkreises – oberhalb der Bodenplatte – zeigen zum Zeitpunkt ohne Wärmepumpenbetrieb gesunkene Temperaturen an. Auch bei Heizbetrieb ist ersichtlich, dass sich die Variation des Mittelwerts stärker auf die Auswertpunkte oberhalb der Bodenplatte auswirkt, vor allem auf die luftseitigen. Es kann gezeigt werden, dass bei einer Verringerung des Mittelwerts der Tunnelinnenlufttemperatur die Temperaturen an den Auswertpunkten oberhalb der Bodenplatte erd- und luftseitig in einer sehr ähnlichen Größenordnung sind.

3.8.1.2 Amplitude

Die folgenden beiden Abbildungen beschreiben das Verhalten zufolge einer angepassten Amplitude. In Abb. 3.72 wird die Amplitude der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C erhöht und in Abb. 3.73 um 4 °C verringert.

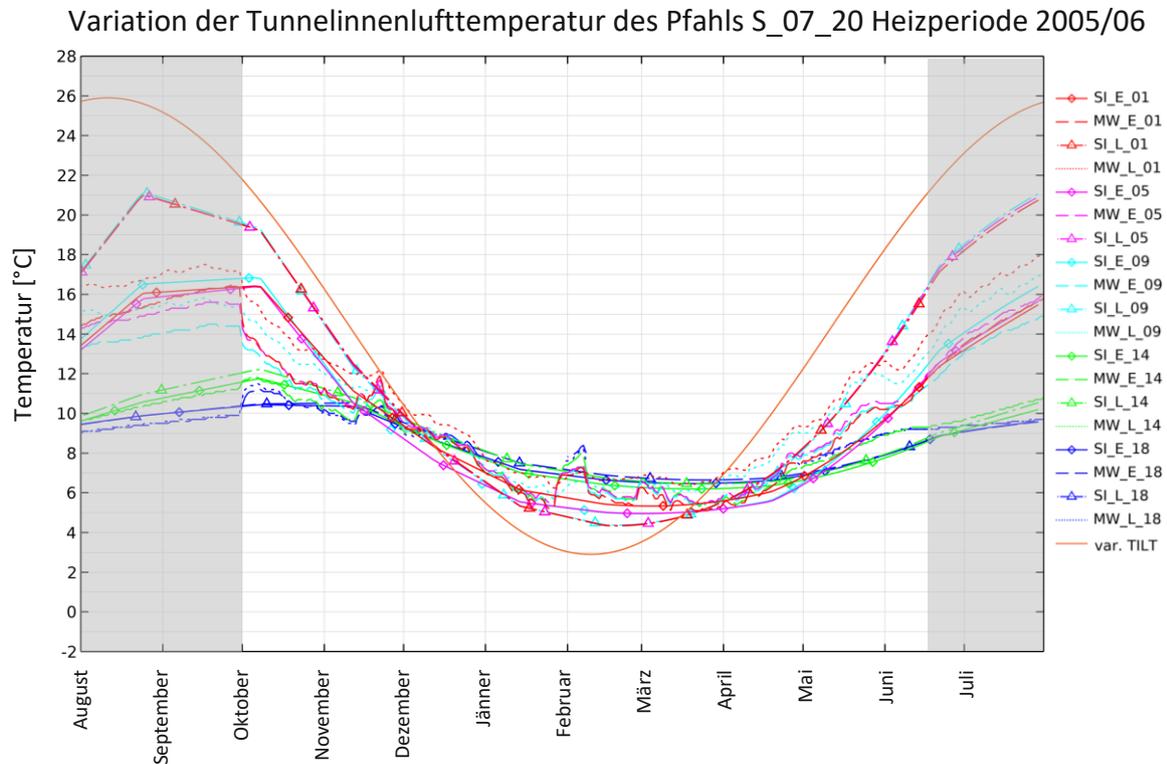


Abb. 3.72: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Amplitude der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – erhöht wurde

Dabei ist in Abb. 3.72 zu erkennen, dass es bei der Erhöhung der Amplitude zu einer stärkeren Abkühlung kommt, die sich bis zum Ende des Heizbetriebs auswirkt, sich jedoch bis Ende Juli regenerieren kann. Dies wird durch die Auswertpunkte unterhalb der Bodenplatte gezeigt. An den luftseitigen Auswertpunkten oberhalb der Bodenplatte wirkt sich die Vergrößerung der Amplitude durch deutlich größere Temperaturschwankungen im Vergleich zu dem kalibrierten Modell aus. Die erdseitigen Auswertpunkte oberhalb der Bodenplatte werden außerhalb der Heizperiode deutlich weniger durch die Veränderung beeinflusst.

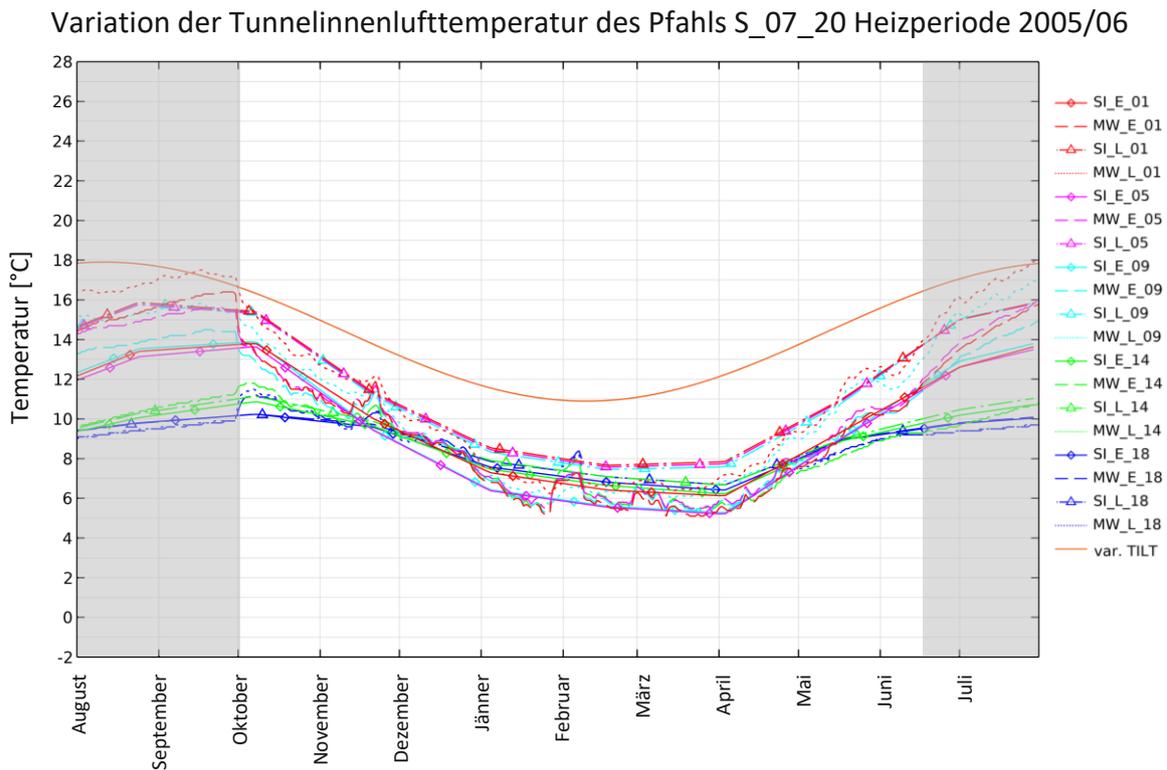


Abb. 3.73: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Amplitude der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – verringert wurde

Die Verringerung der Amplitude in Abb.3.73 führt zu einer geringeren Auswirkung der jahreszeitlichen Schwankungen auf das Temperaturverhalten im Pfahl. Nur an den Auswertpunkten unterhalb der Bodenplatte verändert es sich zu den Zeitpunkten ohne Heizbetrieb kaum. Die Temperaturen an den anderen Auswertpunkten verhalten sich im Vergleich zu dem kalibrierten Modell abgeschwächt.

3.8.2 Vorlauftemperatur

Auch für die Vorlauftemperatur werden ausgehend von dem kalibrierten Modell zwei Vergleichsberechnungen durchgeführt. In der Ersten in Abb. 3.74 wird die Vorlauftemperatur um 3 °C angehoben. Bei der Zweiten in Abb. 3.75 wird analog die Vorlauftemperatur um 3 °C verringert.

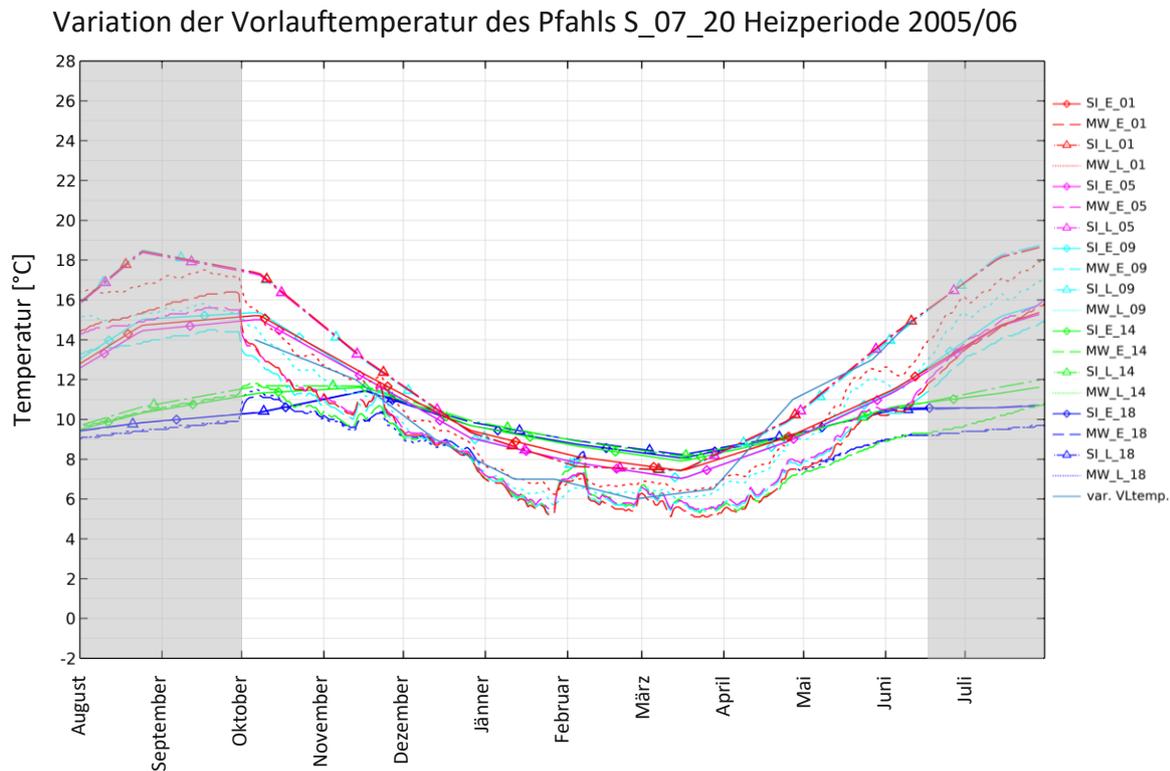


Abb. 3.74: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Vorlauftemperatur um 3 °C – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.5 – erhöht wurde

In Abb. 3.74 zeigt sich, dass eine höhere Vorlauftemperatur die größte Auswirkung während des Heizbetriebs hat. Sie wirkt sich gleichermaßen auf die Auswertpunkte unterhalb wie oberhalb der Bodenplatte sowie luft- und erdseitig aus.

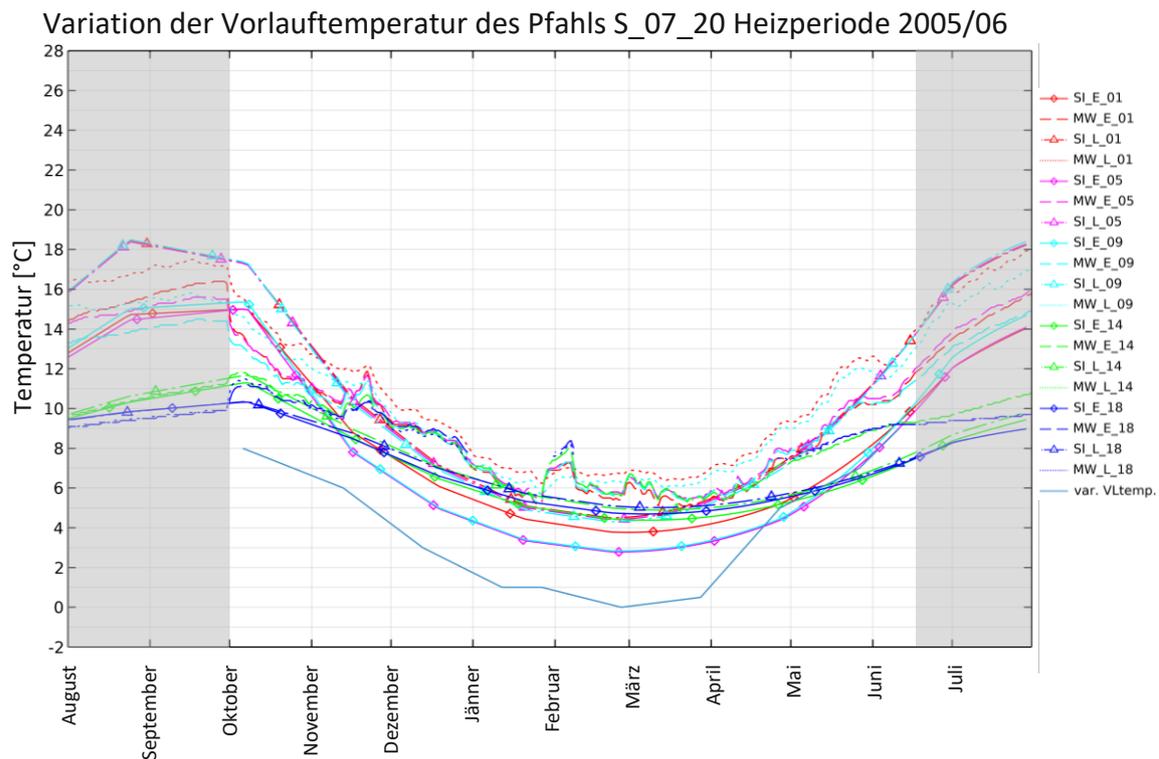


Abb. 3.75: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Vorlauftemperatur um 3 °C – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.5 – verringert wurde

Anhand Abb. 3.75 kann gezeigt werden, dass eine Verringerung der Vorlauftemperatur eine sehr starke Auswirkung auf das Temperaturverhalten im Pfahl hat, das über die Dauer des Heizbetriebs hinausreicht. Vor allem bei den Auswertpunkten unterhalb der Bodenplatte kommt es zu einer nachhaltigen Abkühlung, die sich nicht bis zum Ende der Heizperiode regenerieren kann. An den Auswertpunkten oberhalb der Bodenplatte können vor allem luftseitig nach Ende des Heizbetriebs ähnliche Temperaturen wie im kalibrierten Modell erzielt werden. Dies ist auf den Einfluss der Tunnelinnenlufttemperatur in diesem Bereich zurückzuführen. Die erdseitigen Auswertpunkte weisen deutlich geringere Temperaturen auf, was auf deren Lage in der Nähe der Vorlauf-Absorberleitung zurückzuführen ist.

3.8.3 Anfangstemperatur des Bodens

Wird die Anfangstemperatur des Bodens von 10,5 °C auf 13 °C erhöht, zeigt sich in Abb. 3.76 vor allem an den Auswertepunkten unterhalb der Bodenplatte (Pfahl beidseitig erdberührt) eine Änderung des Temperaturverhaltens, durch einen Temperaturanstieg. Auf die Auswertepunkte des Modells, die nur einseitig erdberührt sind, hat die veränderte Anfangstemperatur eine geringere Auswirkung. Es zeigt sich, dass die höhere Anfangstemperatur hauptsächlich während der Zeit ohne Heizbetrieb Einfluss auf das Temperaturverhalten im Pfahl oberhalb der Bodenplatte hat. Der Absorberkreis 1 – unterhalb der Bodenplatte – weist hingegen auch während des Betriebs höhere Temperaturen auf.

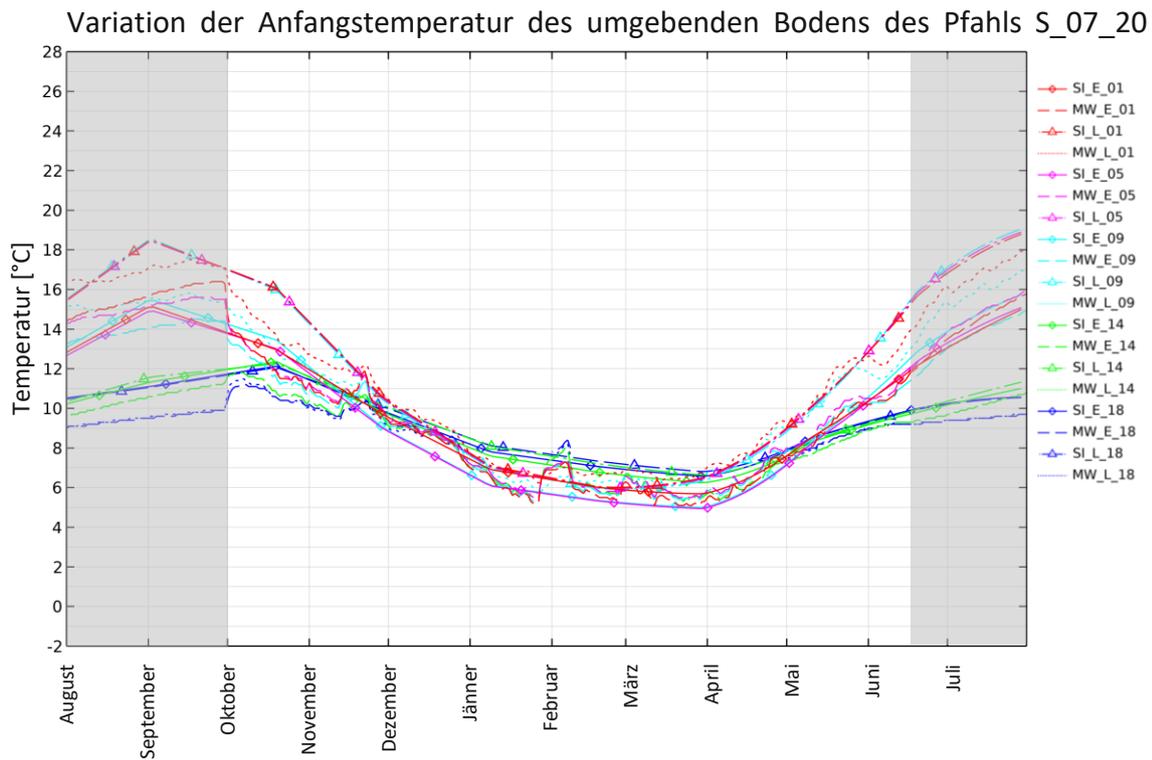


Abb. 3.76: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Anfangstemperatur des Bodens auf 13 °C – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.2 – erhöht wurde

3.8.4 Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit

Die folgenden beiden Abbildungen beschreiben das Verhalten zufolge einer angepassten Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit. In Abb. 3.77 wird sie halbiert und in Abb. 3.78 verdoppelt.

Variation der Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit des Pfahls S_07_20

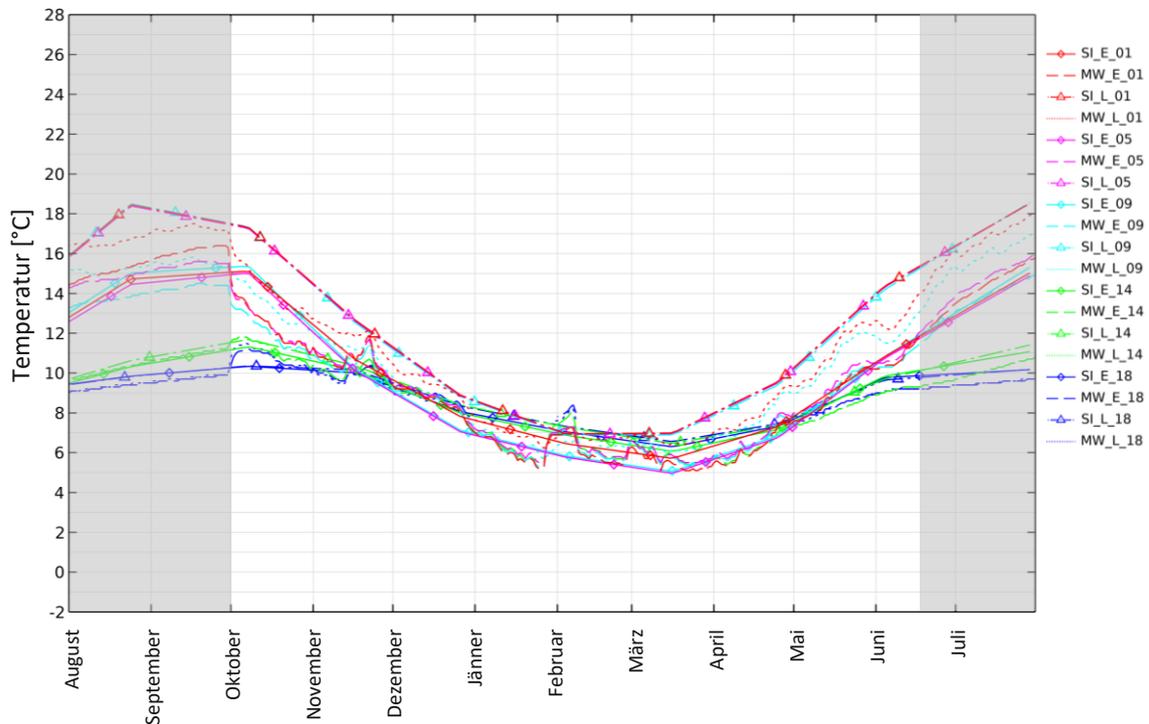


Abb. 3.77: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation eine Halbierung der Absorberströmungsgeschwindigkeit – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.4 – erfolgte

Abb. 3.77 zeigt, dass je langsamer die Flüssigkeit während des Heizbetriebs zirkuliert, umso größer sind die gemessenen Temperaturdifferenzen im Pfahl, vor allem im Absorberkreis 2 – oberhalb der Bodenplatte. Es wird gezeigt, dass sich die Temperatur bereits oberhalb der Bodenplatte stärker erhöht und somit unterhalb der Bodenplatte auf einem höheren Niveau ist als in dem kalibrierten Modell. Dies wirkt sich auf den Absorberkreis 1 aus, der somit eine höhere Temperatur und geringere Schwankungen aufweist.

In Abb. 3.78 wird deutlich, dass eine höhere Strömungsgeschwindigkeit eine stärkere Abkühlung des Pfahls während des Heizbetriebs hervorruft. Des Weiteren führt eine höhere Strömungsgeschwindigkeit zu einem homogeneren Temperaturverlauf im Pfahl. Das heißt, die Temperaturen an den unterschiedlichen Auswertpunkten unterscheiden sich deutlich weniger. Diese Temperaturveränderung wirkt sich an den Auswertpunkten unterhalb der Bodenplatte stark bis zum Ende des Heizbetriebs aus, lässt sich allerdings bis zum Ende der Heizperiode regenerieren.

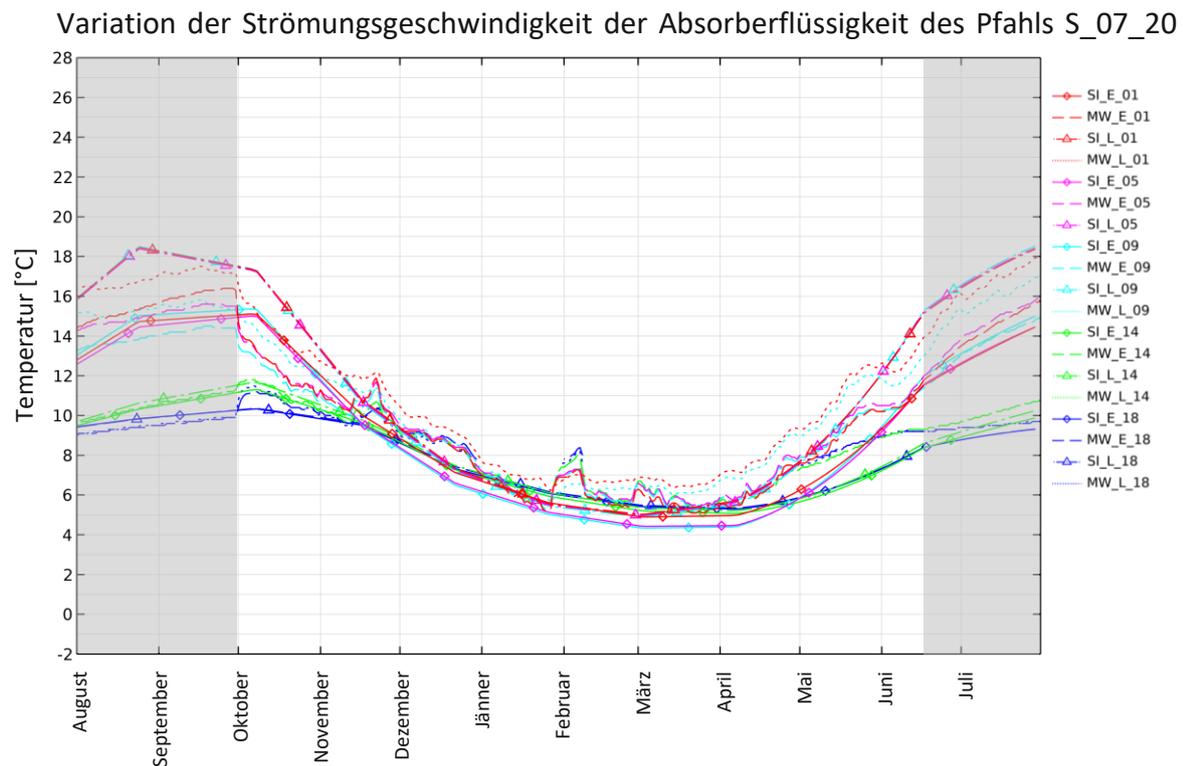


Abb. 3.78: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation eine Verdoppelung der Absorberströmungsgeschwindigkeit – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.4 – erfolgte

Zusammenfassend ist festzustellen, dass je höher die Absorberströmungsgeschwindigkeit ist, desto niedriger wird die Temperatur an den tiefer gelegenen Auswertpunkten. Dies ergibt sich aus der Überlegung, dass je schneller die Absorberflüssigkeit strömt, desto länger ist die Strecke, die benötigt wird, damit die eingebrachte Vorlauftemperatur ansteigt.

3.9 Erkenntnisse aus der Parameterstudie

Die Parameterstudie ermöglicht eine Veranschaulichung, welche Auswirkungen die einzelnen Parameter auf das Temperaturverhalten haben und wo sich die Absorberflüssigkeit im Pfahl erwärmt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Innenlufttemperatur sowie die Vorlauftemperatur den größten Einfluss auf das Temperaturverhalten der Absorberkreise haben. Die Parametervariation des kalibrierten Modells verdeutlicht, dass bereits Temperaturveränderungen von wenigen Grad Celsius einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz des Systems und das Temperaturverhalten im Pfahl haben.

4 Einfluss einer geothermischen Nutzung von Bohrpfählen auf deren statisch-konstruktive Bemessung

4.1 Einleitung

Im Kapitel 4.2 wird die theoretische Bemessung eines Bohrpfahls ohne geothermische Einbauten beleuchtet. Es werden die notwendigen Regelwerke und Bemessungsnachweise angeführt. Darüber hinaus werden die Eingangswerte zur Bemessung der Bohrpfähle des LT24 Block 7 dargestellt. Etwaig dargestellte Grenzwerte beziehen sich immer auf diesen Pfahl. Im Anschluss daran werden die wesentlichen Formeln zur allgemeinen Bemessung angeführt. In weiterer Folge wird in Kapitel 4.3 gezeigt, auf welche Parameter und Nachweise die geothermische Nutzung einen Einfluss haben kann. In Kapitel 4.4 werden letztlich Ansätze zur Bemessung eines Bohrpfahls mit geothermischer Nutzung diskutiert.

4.2 Bemessung eines Bohrpfahls ohne geothermische Nutzung

4.2.1 In Österreich relevante Normen, Richtlinien und Regelwerke

ÖNORM EN 1991-1-1	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, 2015 02 15
ÖNORM B 1991-1-1	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen 2018 01 01
ÖNORM EN 1991-1-2	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke, 1991-1-2
ÖNORM B 1991-1-2	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-2 und nationale Ergänzungen 2003 12 01
ÖNORM EN 1991-1-5	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen, 2010 12 00
ÖNORM EN 1992-1-1	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine

	Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung); 2015 02 15
ÖNORM B 1992-1-1	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2018 01 01
ÖNORM EN 1997-1	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln (konsolidierte Fassung); 2014 11 15
ÖNORM B 1997-1-1	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen; 2013 09 01
ÖNORM B 1997-1-3	Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Pfahlgründungen; 2015 08 01
ÖNORM EN 1997-2	Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds (konsolidierte Fassung); 2010 08 15
ÖNORM B 1997-2	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-2 und nationale Ergänzungen; 2017 01 01
ÖNORM B 4710-1	Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton, 2018 01 01
ÖNORM B 4707	Bewehrungsstahl - Anforderungen, Klassifizierung und Prüfung, 2017 06 01
ÖNORM EN 1536	Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle; 2015 12 01
ÖNORM EN 206-1	Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, 2021 07 01
ÖNORM EN 10080	Stahl für die Bewehrung von Beton – schweißgeeigneter – Betonstahl – Allgemeines, 2005 09 01
ÖBV-Richtlinie	Bohrpfähle, 2019 08
ÖBV-Richtlinie	Wasserundurchlässige Betonbauwerke — Weiße Wanne; 2018 02
RVS 09_01_41	Tunnel — Tunnelbau - Konstruktive Ausführung - Offene Bauweise; 2013 04
EA-Pfähle	Empfehlungen des Arbeitsausschusses Pfähle der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, 2. Auflage, 2012 01

Tab. 4.1: Aufzählung relevanter Normen, Richtlinien sowie Regelwerke zur Bemessung von Bohrpfählen

4.2.2 Grundlagen sowie Lastangaben aus der Originalstatik des LT24

Die wesentlichen geometrischen Abmessungen der aufgelösten Bohrpfahlwand sind aus Kapitel 3.2.2 bekannt. In der folgenden Tabelle werden die Parameter der Bohrpfähle hervorgehoben. Die Lastannahmen und der Schichtaufbau können der Statik des Ingenieurbüros Pauser entnommen werden und sind in den darauffolgenden Tabellen dargestellt. Die Statik wurde im Jahr 2001 nach den damals gültigen Normen erstellt [56].

wesentliche Parameter	
Pfahldurchmesser	1,2 m
Pfahlabstand	1,5 m
effektive Einbindetiefe	5,5 m

Tab. 4.2: Wesentliche Parameter des Bohrpfahls im LT24, Block 7

Tiefe absolut [m]	Schichtdicke [m]	Schichtkomplex	Kurzbeschreibung
230,90	3,8	A	künstliche Anschüttung, Mutterboden
227,10			
222,10	5,0	B ₁	Kies , geringer bis mäßig hoher Feinkornanteil
	19,0	F ₄	Tonstein, Tonmergel, Mergel stark bis vollständig zerschert und zerlegt

Tab. 4.3: Tabelle Schichtaufbau gemäß Statik Pauser [56]

Die zugehörigen Bodenkennwerte dieser Schichten sind der Tab. 3.5 des Kapitels 3.4.3 zu entnehmen. Zusätzlich werden nachfolgend in diesem Kapitel die Bettungsmodule und die anzusetzenden Lasten angeführt [56].

Erddruck	
Bezeichnung	Kommentar
horiz. Bettungsmodul $k_{S,h,B1}$	um 15 MN/m ³ je Meter linear ansteigend, max. 70 MN/m ³
horiz. Bettungsmodul $k_{S,h,B2}$	um 10 MN/m ³ je Meter linear ansteigend, max. 55 MN/m ³
horiz. Bettungsmodul $k_{S,h,B3}$	um 5 MN/m ³ je Meter linear ansteigend, max. 70 MN/m ³
horiz. Bettungsmodul $k_{S,h,F3}$	max. 150 MN/m ³
horiz. Bettungsmodul $k_{S,h,F4}$	max. 100 MN/m ³

Tab. 4.4: Horizontaler Bettungsmodul [56]

Verkehrslasten	
befahrte Flächen	16,7 kN/m ³
Schienenfahrzeuge (Klasse +2)	63,0 kN/m ³
	Σ 742,35 kN/Pfahl
Eigengewichte	
Träger - Stahlbeton	253,5 kN/Pfahl
Rost - Stahlbeton	213,3 kN/Pfahl
Platte - Stahlbeton	292,5 kN/Pfahl
Überschüttung - Bodenschicht A	1365,0 kN/Pfahl

Tab. 4.5: Einwirkungen Bohrpfahl [56]

Tragfähigkeit des Pfahls	
Biegesteifigkeit EI	3053,0 MNm ²
Biegesteifigkeit EI/l _{fm}	2035,0 MNm ² /m
Mantelreibung	1742,0 kN
Spitzendruck	1641,0 kN
Grenztragfähigkeit Q _m	3383,0 kN

Tab. 4.6: Tragfähigkeit Bohrpfahl [56]

Somit ist die maximale Vertikalbelastung des Pfahls, welche sich aus der Summe der Verkehrslasten und der Eigengewichte ergibt, mit 2866,65 kN kleiner als die Grenztragfähigkeit des Pfahls mit 3383,0 kN. Mit Hilfe dieser Eingangswerte wurden die maßgebenden Kräfte, die auf die Bohrpfahlwand einwirken, ermittelt. In der Statik werden zwei Bemessungssituationen anhand des Grundwasserniveaus unterschieden. Innerhalb dieser werden die Kräfte für zwei unterschiedliche Aushubniveaus (A&B) berechnet.

Aus der ersten Bemessungssituation, in der das Grundwasserniveau auf 0,0 m festgelegt wurde, folgt das maßgebende Moment zur Biegebemessung. In den folgenden beiden Abbildungen sind die Ergebnisse dieser Bemessungssituation abgebildet. Das maßgebende Moment wurde markiert.

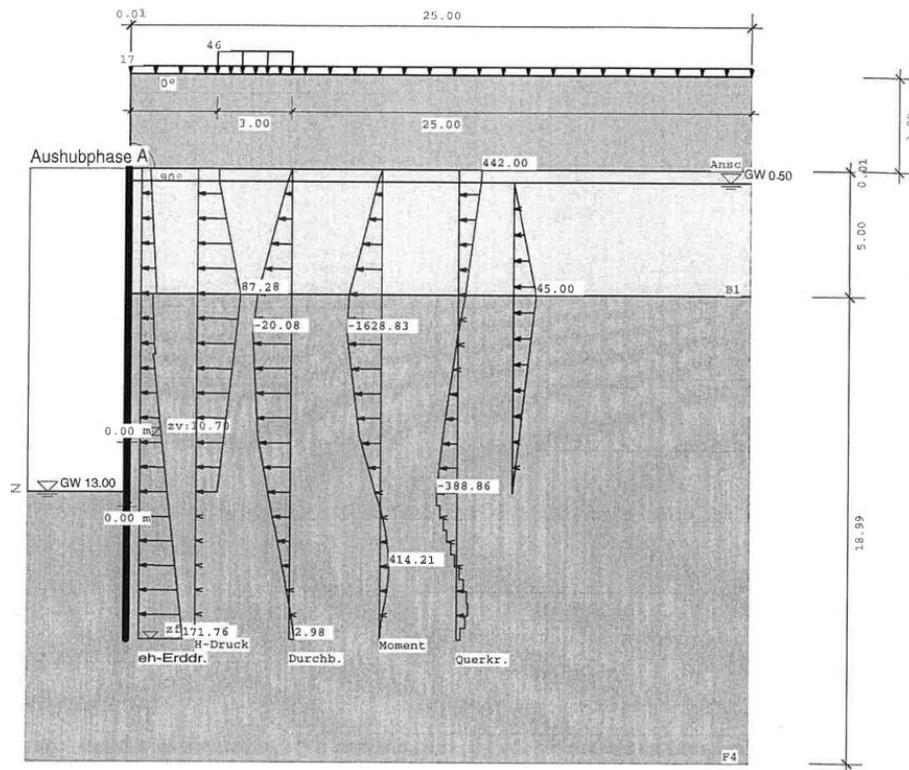


Abb. 4.1: Bemessungssituation 1 – Aushubphase A – GW 0,0 m [56]

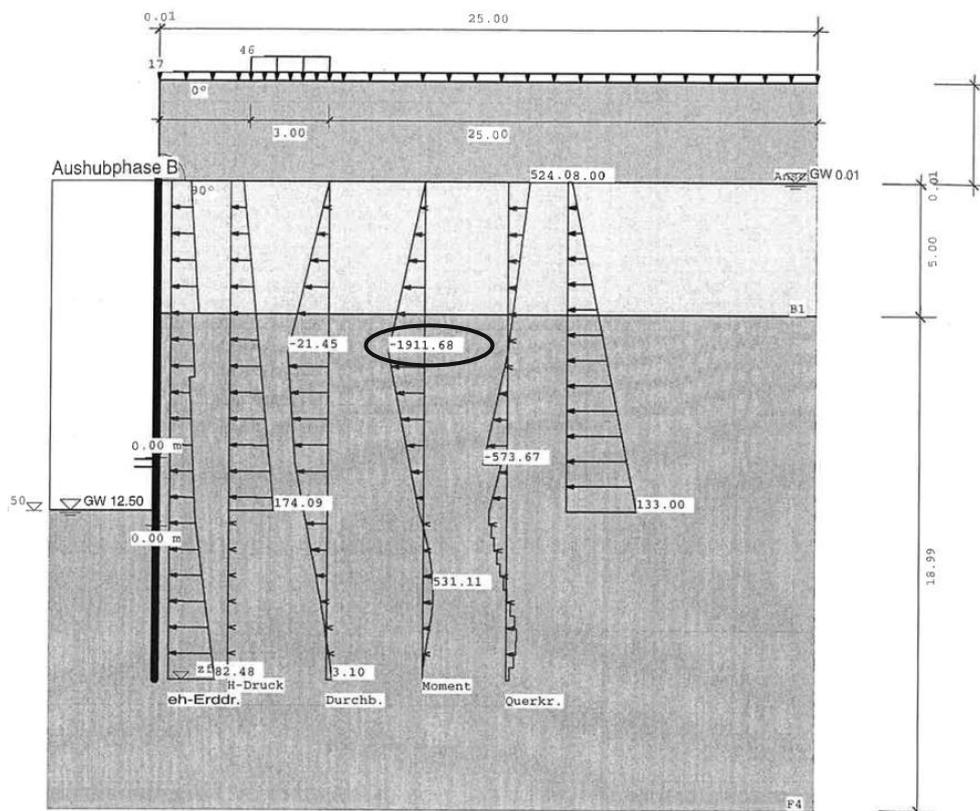


Abb. 4.2: Bemessungssituation 1 – Aushubphase B – GW 0,0 m [56]

4.2.3 Dauerhaftigkeit

4.2.3.1 Expositionsklassen

In der ÖNORM EN 206-1 sind – abhängig von den Umgebungseinflüssen – die Expositionsklassen genannt. Zugehörig zu diesen Expositionsklassen werden in der ÖNORM EN 206-1 im Anhang F Mindestanforderungen an die Betongüte gestellt [57]. In der folgenden Tabelle werden diese Zusammenhänge exemplarisch für den Bohrpfahl des LT24 dargestellt. Es lässt sich daraus schlussfolgern, dass die Betongüte C30/37 in dem vorliegenden Beispiel nicht unterschritten werden darf.

Korrosion ausgelöst durch Karbonatisierung		
XC2	Nass, selten trocken	für langfristig wasserbenetzte Oberflächen, vielfach bei Gründungen
-> mind. Druckfestigkeit C25/30		
Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel		
XF1	Mäßige Wassersättigung ohne Taumittel	senkrechte Betonoberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind
-> mind Druckfestigkeit C30/37		

Tab. 4.7: Expositionsklassen nach ÖNORM EN 206-1 bzw. ÖNORM EN 1992-1-1 [57, 58],

4.2.3.2 Betondeckung

Die Betondeckung beschreibt den minimalen Abstand der Bewehrungsoberfläche zur Betonoberfläche [58]. In der ÖNORM EN 1992-1-1 ist die Berechnungsformel für dieses Nennmaß (c_{nom}) angegeben [58].

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (4.1)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
c_{nom}	Nennmaß der Betondeckung	4.4.1.1	[mm]
c_{min}	Mindestbetondeckung	4.4.1.2	[mm]
Δc_{dev}	Vorhaltemaß	4.4.1.3	[mm]

Tab. 4.8: Parameter zur Bemessung der Betondeckung [58]

$$c_{min} = \max (c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10mm) \quad (4.2)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
$c_{min,b}$	Mindestbetondeckung aus der Verbundanforderung	4.4.1.2 (3)	[mm]
$c_{min,dur}$	Mindestbetondeckung aus der Dauerhaftigkeitsanforderung	4.4.1.2 (5)	[mm]
$\Delta c_{dur,y}$	additives Sicherheitselement	4.4.1.2 (6)	[mm]
$\Delta c_{dur,st}$	Verringerung der Mindestbetondeckung bei Verwendung nichtrostenden Stahls	4.4.1.2 (7)	[mm]
$\Delta c_{dur,add}$	Verringerung der Mindestbetondeckung auf Grund zusätzlicher Schutzmaßnahmen	4.4.1.2 (8)	[mm]

Tab. 4.9: Parameter zur Bemessung von c_{min} [58]

Darüberhinausgehend muss entsprechend ÖNORM EN 1536, Kapitel 7.7.2 und 7.7.3 für Bohrpfähle mit einem Durchmesser größer als 0,6 m eine Betondeckung von 60 mm eingehalten werden. Bei kleineren Pfählen sind 50 mm ausreichend. Weitere Bedingungen sind genannt, die eine Erhöhung auf 75 mm Betondeckung erfordern. Dazu zählt beispielsweise nachträglich in den frischen Beton eingebrachte Bewehrung oder der Einbau unverrohrter Pfähle in weichem Baugrund [59].

4.2.3.3 Rissbreitennachweis

Die Grenzwerte der maximal zulässigen Rissbreiten sind der ÖNORM EN 1992-1-1 zu entnehmen [58]. Bei Bauwerken, die mit dem Grundwasser in Berührung kommen können, oder einem feuchten Milieu ausgesetzt sind, ist bei der Rissbreitenbemessung im Besonderen die Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wanne“ des ÖBVs zu beachten. Dort werden von Anforderungsklassen abhängige Konstruktionsklassen festgelegt. Diese reglementieren den Wert der maximal zulässigen Rissbreite, welcher in der Regel geringer ist als jener aus der ÖNORM EN 1992-1-1 [60].

Die konkrete Bemessung der Rissbreiten kann nach ÖNORM EN 1992-1-1 Abschnitt 7.3.4 erfolgen. Sofern eine Festlegung der Rissbreite ohne direkter Berechnung erforderlich ist, kann dies nach Abschnitt 7.3.3 erfolgen [60]. Zusätzlich dazu bietet die RVS „Offene Bauweise“ Hilfestellungen zur Ermittlung der Rissbreiten von Bohrpfählen unter Lastbeanspruchung im Speziellen bei der Bestimmung der effektiven Betonfläche sowie der anrechenbaren effektiven Bewehrungsfläche von Kreisquerschnitten.

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (4.3)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
w_k	Charakteristischer Wert der Rissbreite	7.3.4	[mm]
$s_{r,max}$	Maximaler Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild	7.3.4	[mm]
ϵ_{sm}	Mittlere Dehnung der Bewehrung unter Dauerlast	7.3.4	[-]
ϵ_{cm}	Mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen unter Dauerlast	7.3.4	[-]

Tab. 4.10: Parameter zur Bemessung von w_k [58]

$$s_{r,max} = \frac{\phi}{3,6 \cdot \rho_{eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot \phi}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad (4.4)$$

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\left[\sigma_s - \left(\frac{0,4 \cdot f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} \right) \cdot \left(1 + \frac{\rho_{eff} \cdot E_s}{E_{cm}} \right) \right]}{E_s} \geq \frac{0,60 \cdot \sigma_s}{E_s} \quad (4.5)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
ϕ	Stabdurchmesser Betonstahl	7.3.2	[mm]
ρ_{eff}	Effektiver Bewehrungsgrad	-	[-]
$f_{ct,eff}$	Wirksame Betonzugfestigkeit = f_{ctm}	7.3.2 (2)	[N/mm ²]
σ_s	Stahlspannung im Riss unter Dauerlast	7.3.2/ 7.7.3	[N/mm ²]
E_s	E-Modul Stahl	3.2.7	[N/mm ²]
E_{cm}	Mittlerer E-Modul Beton	3.1.3	[N/mm ²]

Tab. 4.11: Parameter zur Bemessung von $s_{r,max}$ [58]

Um diese Werte berechnen zu können, muss zunächst der effektive Bewehrungsgrad ρ_{eff} ermittelt werden. Er wird über das Verhältnis der effektiven Betonfläche ($A_{c,eff}$) zur Bewehrungsfläche ($A_{s,eff}$) ermittelt. ρ_{eff} ergibt sich wiederum aus den nachfolgenden Formeln:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s,eff}}{A_{c,eff}} \quad (4.6)$$

$$A_{s,eff} = 0,3 \cdot A_s \quad (4.7)$$

$$A_{c,eff} = f \cdot k_c \cdot k \cdot A_{ct} \quad (4.8)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
$A_{s,eff}$	effektive Bewehrungsfläche	laut RVS 09_01-41	[cm ²]
$A_{c,eff}$	effektive Betonfläche im Wirkungsbereich der Bewehrung	7.3.2 (3)	[cm ²]
A_s	Gesamte Bewehrung des Kreisquerschnitts	laut RVS 09_01-41	[cm ²]
f	Korrekturfaktor abhängig von der Pfahlanordnung	laut RVS 09_01-41	[-]
k_c	Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung	7.3.2 (2)	[-]
k	Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Eigenspannungen $h > 0,8m$	7.3.2 (2)	[-]
A_{ct}	Fläche der Betonzugzone	7.3.2 (2)	[cm ²]

Tab. 4.12: Parameter zur Bemessung des effektiven Bewehrungsgrades [58, 61]

$$k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \left(\frac{h}{h^*} \right) \cdot f_{ct,eff}} \right] \quad (4.9)$$

$$\sigma_c = N_{ed} / (b \cdot h) \quad (4.10)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
k_1	1,5 bei Druckkräften	7.3.2 (2)	[-]
A_c	Betonfläche	-	[cm ²]
h^*	1,0 für $h \geq 1,0\text{m}$	7.3.2 (2)	[m]
h	Querschnittshöhe	7.3.2 (2)	[m]
N_{ed}	Bemessungsnormalkraft	7.3.2 (2)	[kN]
σ_c	mittlere Betonspannung	7.3.2 (2)	[N/mm ²]

Tab. 4.13: Parameter zur Bemessung von k_c [58]

$$A_{ct} = r^2 \cdot \varphi - r^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \quad (4.11)$$

A_{ct} bezeichnet die Fläche der effektiven Betonzugzone und ergibt sich aus den nachstehenden Formeln. Die Bedeutung der einzelnen Symbole kann der folgenden Skizze entnommen werden, die aus der RVS zum Thema Offene Bauweise stammt [61].

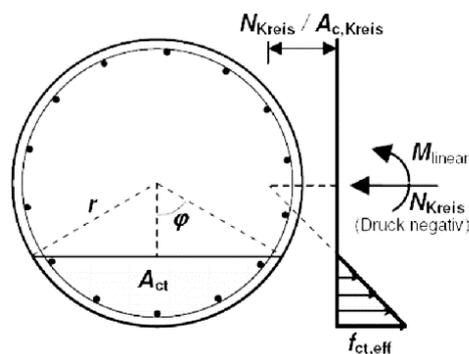


Abb. 4.5: Querschnitt eines Einzelpfahls bei Biegung und Normalkraft [61]

$$\varphi = \pi - \cos^{-1}(c/r) \quad (4.12)$$

$$c = r \cdot N_{Kreis} \cdot W_{c,Kreis} / (M_{linear} \cdot A_{c,Kreis}) \quad (4.13)$$

$$W_{c,Kreis} = r^3 \cdot \pi / 4 \quad (4.14)$$

$$A_{c,Kreis} = r^2 \cdot \pi \quad (4.15)$$

$$M_{linear} = (f_{ct,eff} - N_{Kreis} / A_{c,Kreis}) \cdot W_{c,Kreis} \quad (4.16)$$

Abkürzung	Beschreibung	laut RVS 09_01-41	Einheit
r	Radius des Querschnitts	laut RVS 09_01-41	[cm]
φ	Öffnungswinkel Zugzone	laut RVS 09_01-41	[°]
c	Zonenhöhe	laut RVS 09_01-41	[cm]
$W_{c,Kreis}$	Widerstandsmoment des Kreises	laut RVS 09_01-41	[cm ³]
$A_{c,Kreis}$	Betonquerschnittsfläche	laut RVS 09_01-41	[cm ²]
M_{linear}	Moment unter Dauerlast, das die Betonzugfestigkeit erreicht	laut RVS 09_01-41	[kNm]

Tab. 4.14: Parameter zur Bemessung der Fläche der Betonzugzone [61]

4.2.4 Materialkennwerte

4.2.4.1 Beton

Auf Grund der Expositionsclassen zufolge dem Kapitel 4.2.3.1 kann die Betongüte festgelegt werden. Hier sind die Materialparameter für die häufig verwendete Betongüte C30/37 angeführt. In der folgenden Tabelle werden die Materialkennwerte für diesen Werkstoff zusammengefasst.

Betonfestigkeitsklasse laut ÖNORM EN 1992-1-1 Tabelle 3.1			
Abkürzung	Beschreibung		Wert
f_{ck}	Zylinderdruckfestigkeit		30,0 [N/mm ²]
$f_{ck,cube}$	Würfeldruckfestigkeit		37,0 [N/mm ²]
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons	$f_{cm}=f_{ck}+8$	38,0 [N/mm ²]
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons	$f_{ctm}=0,3 \cdot f_{ck}^{(2/3)} ; \leq C50/60$	2,9 [N/mm ²]
$f_{ctk;0,05}$	char. Wert der zentrischen Betonzugfestigkeit 5%Quantil	$f_{ctk;0,05}=0,7 \cdot f_{ctm}$	2,0 [N/mm ²]
$f_{ctk;0,95}$	char. Wert der zentrischen Betonzugfestigkeit 95%Quantil	$f_{ctk;0,95}=1,3 \cdot f_{ctm}$	3,8 [N/mm ²]
$E_{cm} \cdot 10^{-3}$	mittlerer Elastizitätsmodul als Sekante	$E_{cm}=22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3}$	33,0 [N/mm ²]
ϵ_{c1}	Dehnung des Betons unter der Maximalspannung f_c	$\epsilon_{c1}=0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$	2,2 [‰]
ϵ_{cu1}	rechnerische Bruchdehnung	$\leq C50/60$	3,5 [‰]
ϵ_{c2}	Dehnung des Betons unter der Maximalspannung f_c	$\leq C50/60$	2,0 [‰]
ϵ_{cu2}	rechnerische Bruchdehnung	$\leq C50/60$	3,5 [‰]

Tab. 4.15: Übersicht zu den wesentlichen Materialparametern von C30/37 [58]

4.2.4.2 Betonstahl

Die folgende Tabelle listet die wesentlichen Parameter des verwendeten Bewehrungsstahls auf. Es wurde die in Österreich häufig verwendete Bewehrungsstahlsorte B550B gewählt.

Betonstahl laut ÖNORM EN 10080 und ÖNORM B 4707		
Abkürzung	Beschreibung	Wert
E_s	Elastizitätsmodul Stahl	200.000 [N/mm ²]
ρ	Rohdichte	7.850 [kg/m ³]
R_e, f_{yk}	Streckgrenze	550 [N/mm ²]
R_m, f_{tk}	Zugfestigkeit	594 [N/mm ²]
R_m/R_e	Verhältnis der zugfestigkeit zur Streckgrenze	1,08 [-]
ϵ_{ud}	Dehngrenze	45 [‰]
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient	$10 \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]

Tab. 4.16: Übersicht zu den wesentlichen Stahlparametern [62, 63]

4.2.4.3 Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe bei Gründungen

In ÖNORM EN 1992-1-1 sind die Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe, die bei Gründungen verwendet werden, geregelt. Der Unterpunkt 2.4.2.5(2) bestimmt den Teilsicherheitsbeiwert für Beton. Er definiert, dass bei Ortbeton-Bohrpfählen mit wiedergewonnener Verrohrung der Teilsicherheitsbeiwert γ_c mit dem Beiwert k_f zu multiplizieren ist [58]. Dieser ist im nationalen Anhang geregelt [64]. Laut dem Zusatz in der ÖNORM B1992-1-1 ist k_f mit 1,0 zu wählen, sofern der Pfahl nach der ÖNORM EN1536 ausgeführt wird. Ansonsten gilt: k_f gleich 1,1 [64]. Alle anderen Teilsicherheitsbeiwerte können dem Abschnitt 2.4.2.4(1) entnommen werden [58] und sind in nachfolgender Tabelle angegeben

Teilsicherheitsbeiwerte Grenzzustand der Tragfähigkeit		
Bemessungssituation	γ_c Beton	γ_s Betonstahl
ständig und vorübergehend	1,5	1,15
außergewöhnlich	1,2	1,0

Tab. 4.17: Teilsicherheitsbeiwerte [58]

4.2.5 Knicknachweis

Der Nachweis auf Knicken ist laut Eurocode 7 nur in wenigen ausgewählten Situationen zu untersuchen. Zu diesen zählen schlanke Pfähle, die in Wasser oder sehr weichen Sedimenten größerer Dicke hergestellt werden. Darüberhinausgehend kann ein Knicknachweis einfallen, wenn die charakteristische Scherfestigkeit des Bodens 10 kPa überschreitet [65]. Im gegenständlichen Fall ist dieser Nachweis nicht maßgebend und wird auf Grund dessen hier nicht detailliert ausgeführt.

4.2.6 Erforderliche Einbindelänge

Damit die ÖNORM EN 1536 angewandt werden darf, gibt es in ihrem Abschnitt 1.3 einige Forderungen. Für Bohrpfähle ist relevant, dass ihr Durchmesser zwischen 0,3 und 3,0 m liegt. Darüber hinaus darf das Verhältnis L/D_s , 5,0 nicht unterschreiten. Dies bedeutet, dass bei einem Durchmesser von 1,2 m die Pfahllänge mindestens 6,0 m betragen muss [59]. Darüberhinausgehend soll laut EA-Pfähle eine Mindesteinbindetiefe von 2,5 m keinesfalls

unterschritten werden. Mögliche größere Einbindetiefen sind entsprechend den Baugrundgutachten zu planen [66].

Die Ermittlung der erforderlichen Mindesteinbindetiefe kann über die Berechnung eines Kräftegleichgewichts erfolgen. Ziel dabei ist, die Summe der Momente sowie die Summe der Horizontalkräfte gleich null zu ermitteln. Dies geschieht in einem iterativen Prozess, bei dem t sowie Δt variiert werden.

$$\sum M_A = 0 = \frac{E_{pgh,1} \cdot t}{3} - M_{0,d} - H_{0,d} \cdot t \quad (4.17)$$

$$\sum H = 0 = H_{0,d} + E_{pgh,2} - E_{pgh,1} \quad (4.18)$$

$$e_{pgh} = (z \cdot \gamma'_k \cdot K_{pgh} + c'_k \cdot K_{pch}) / \gamma_{R,e} \quad (4.19)$$

$$E_{pgh,1} = 0,5 \cdot e_{pgh} \cdot t \cdot D_s \cdot \eta \quad (4.20)$$

$$E_{pgh,2} = e_{pgh} \cdot 2 \cdot \Delta t \cdot D_s \quad (4.21)$$

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
$E_{pgh,1}$	horizontaler Erddruck, Begrenzungsfaktor	[kN]
$E_{pgh,2}$	horizontaler Erddruck	[kN]
t	Mindesteinbindelänge	[m]
$M_{0,d}$	Bemessungsmoment	[kNm]
$H_{0,d}$	Bemessungshorizontalkraft	[kN]
e_{pgh}	passiver Erdwiderstand	[kN/m ²]
z	Abstand	[m]
γ'_k	Wichte	[kN/m ³]
K_{pgh}	passiver Erddruckbeiwert	[-]
c'_k	Kohäsion	[kN/m ²]
K_{pch}	passiver Erddruckbeiwert	[-]
$\gamma_{R,e}$	Teilsicherheitsbeiwert Erdwiderstand gemäß ÖNORM EN 1997-1	[-]
D_s	Pfahlschaftdurchmesser	[m]
η	Einflussfaktor e_{aph}/e_{pgh}	[-]
Δt	Zuschlag Einbindelänge	[m]

Tab. 4.18: Parameter zur Bemessung der Mindesteinbindelänge

4.2.7 Längsbewehrung

In Österreich gibt es zwei Regelwerke, mit Hilfe derer die erforderliche Längsbewehrung ermittelt werden kann. Einerseits ist dies die ÖNORM EN 1536, in der die Ermittlung der Bewehrung rein nach konstruktiven Kriterien erfolgt, andererseits die ÖNORM EN 1992-1-1+NA, in der die Bewehrungsermittlung belastungsabhängig ist [58, 59, 64].

Die Längsbewehrung kann mittels Interaktionsdiagrammen ermittelt werden. Dazu sind nachfolgende Formeln notwendig. Dabei gibt es unterschiedliche Diagramme – abhängig vom Verhältnis der statischen Höhe zum Durchmesser des Pfahls. Mit Hilfe der Formel (4.27) kann die erforderliche Bewehrungsfläche ermittelt werden.

$$v_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \quad (4.22)$$

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c \cdot D \cdot f_{cd}} \quad (4.23)$$

$$A_c = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.24)$$

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4.25)$$

$$d_1 = c_{nom} + \phi_{Quer} + \phi_{Längs}/2 \quad (4.26)$$

Abkürzung	Beschreibung		Einheit
v_{Ed}	Eingangwert bezogene Normalkraft		[-]
μ_{Ed}	Eingangwert bezogenes Moment		[-]
N_{Ed}	Normalkraft am Pfahlkopf		[kN]
M_{Ed}	Moment am Pfahlkopf		[kNm]
A_c	Betonquerschnittsfläche		[cm ²]
D	Durchmesser		[m]
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit	ÖNORM EN 1992-1-1	[N/mm ²]
α_{cc}	Beiwert Berücks. v. Langzeitauswirkungen	ÖNORM B 1992-1-1/NA	[-]
f_{ck}	Würfeldruckfestigkeit	ÖNORM EN 1992-1-1	[N/mm ²]
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert Beton	ÖNORM EN 1992-1-1	[-]
d_1	statische Höhe	ÖNORM EN 1992-1-1	[cm]
c_{nom}	Betondeckung	ÖNORM EN 1992-1-1	[cm]
ϕ_{Quer}	Stabdurchmesser Querbewehrung	ÖNORM EN 1992-1-1	[cm]
$\phi_{Längs}$	Stabdurchmesser Längsbewehrung	ÖNORM EN 1992-1-1	[cm]
$d1/D$	Verhältnis für Interaktionsdiagramm	gerundet	[-]

Tab. 4.19: Parameter zur Bemessung der Längsbewehrung [58, 64]

$$A_{s,tot} = \rho_{0,tot} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{cd25/30}} \cdot A_c \quad (4.27)$$

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
$A_{s,tot}$	notwendige Bewehrungsfläche	[cm ²]
$\rho_{0,tot}$	notwendiger Bewehrungsgrad	[-]
$f_{cd}/f_{cdC25/30}$	Verhältnis der Betondruckfestigkeiten	[-]

Tab. 4.20: Parameter zur Ermittlung der erforderliche Bewehrungsfläche der Längsbewehrung

Anschließend ist zu prüfen, ob die rechnerisch erforderliche Längsbewehrung größer ist als die notwendige Mindestbewehrung ($A_{s,min}$) nach ÖNORM EN 1536. Der Mindestbewehrungsgehalt ist abhängig vom Nennquerschnitt des Bohrpfahls. Dies erfolgt mit den folgenden Formeln [59].

Nennquerschnitt des Bohrpfahls A_C	Querschnittsfläche der Längsbewehrung A_S
$A_C \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_S \geq 0,5 \% A_C$
$0,5 \text{ m}^2 \leq A_C \leq 1,0 \text{ m}^2$	$A_S \geq 0,0025 \text{ m}^2$
$A_C \geq 1,0 \text{ m}^2$	$A_S \geq 0,25 \% A_C$

Tab. 4.21: Mindestlängsbewehrung nach ÖNORM EN 1536 [59]

4.2.8 Querkraftbewehrung

Es ist zunächst zu prüfen, ob ohne zusätzliche Schubbewehrung ausreichend Querkrafttragfähigkeit gegeben ist. Dabei wird als Eingangswert der vorhandenen Bewehrung jene der Biegebemessung angesetzt. Die Bemessung erfolgt nach der ÖNORM EN 1992-1+NA [58, 64].

$$V_{Rd,c} = \left(C_{Rd,c} \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d \quad (4.28)$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (4.29)$$

$$k = 1 + \sqrt{(200/d)} \leq 2,0 \quad (4.30)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{(b_w \cdot d)} \leq 0,02 \quad (4.31)$$

$$A_{sl} = \text{vorh. } A_{s,tot} \cdot \frac{\alpha_s}{360} \quad (4.32)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_C} \leq 0,2 \cdot f_{cd} \quad (4.33)$$

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + 0,12 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (4.34)$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck} \quad (4.35)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
$V_{Rd,s}$	Bemessungswert durch Fließgrenze der Querkraftbewehrung begrenzten Querkraft	6.2.3 (3)	[kN]
$V_{Rd,max}$	Bemessungswert der durch die Druckstrebenfestigkeit begrenzten maximal aufnehmbaren Querkraft	6.2.3 (3)	[kN]
A_{SW}	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung	6.2.3 (3)	[cm ²]
s	Abstand der Bügel untereinander	6.2.3 (3)	[cm]
z	innerer Hebelsarm	6.2.3 (1)	[cm]
f_{ywd}	Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung	6.2.3 (3)	[N/mm ²]
θ	Winkel zwischen Betondruckstreben und der rechtwinklig zur Querkraft verlaufenden Bauteilachse	6.2.3 (1)	[°]
α_{cw}	Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt	6.2.3 (3)	[-]
b_w	kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts	6.2.3 (1)	[cm]
v_1	Festigkeitsabminderungsbeiwert für unter Querkraft gerissenen Beton	6.2.3 (3)	[-]
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit	3.1.3 (2)	[N/mm ²]

Tab. 4.22: Parameter zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit ohne zusätzliche Schubbewehrung [58, 64]

Sofern Schubbewehrung erforderlich ist, kann diese gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 bemessen werden [58]. Nachstehend finden sich die notwendigen Formeln zur Berechnung.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{SW}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (4.36)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{(\cot\theta + \tan\theta)} \quad (4.37)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
$V_{Rd,s}$	Bemessungswert durch Fließgrenze der Querkraftbewehrung begrenzten Querkraft	6.2.3 (3)	[kN]
$V_{Rd,max}$	Bemessungswert der durch die Druckstrebenfestigkeit begrenzten maximal aufnehmbaren Querkraft	6.2.3 (3)	[kN]
A_{SW}	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung	6.2.3 (3)	[cm ²]
s	der Abstand der Bügel untereinander	6.2.3 (3)	[cm]
z	innerer Hebelsarm	6.2.3 (1)	[cm]
f_{ywd}	Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung	6.2.3 (3)	[N/mm ²]
θ	Winkel zwischen Betondruckstreben und der rechtwinklig zur Querkraft verlaufenden Bauteilachse	6.2.3 (1)	[°]
α_{cw}	Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt	6.2.3 (3)	[-]
b_w	kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts	6.2.3 (1)	[cm]
v_1	Festigkeitsabminderungsbeiwert für unter Querkraft gerissenen Beton	6.2.3 (3)	[-]
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit	3.1.3 (2)	[N/mm ²]

Tab. 4.23: Parameter zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit mit Schubbewehrung [58]

4.2.9 Verankerungslänge

Der Nachweis der Verankerungslänge der Längsbewehrung ist in der ÖNORM EN1992-1-1 geregelt. Er erfolgt mit den nachstehend angegebenen Formeln [58].

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \leq l_{b,min} \quad (4.38)$$

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\phi}{4}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{sd}}{l_{bd}}\right) \quad (4.39)$$

Abkürzung	Beschreibung	ÖNORM EN 1992-1-1	Einheit
l_{bd}	Bemessungswert der Verankerungslänge	8.4.4 (1)	[mm]
α_1	Berücksichtigung der Biegeform	8.4.4 (1)	[-]
α_2	Berücksichtigung der Mindestbetondeckung	8.4.4 (1)	[-]
α_3	Berücksichtigung der Querbewehrung	8.4.4 (1)	[-]
α_4	Berücksichtigung angeschweißter Querstäbe	8.4.4 (1)	[-]
α_5	Berücksichtigung von Druck quer zur Spaltzug-Rissebene	8.4.4 (1)	[-]
$l_{b,rqd}$	erforderlicher Grundwert der Verankerungslänge	8.4.3 (2)	[mm]
$l_{b,min}$	Mindestverankerungslänge	8.4.4 (1)	[mm]
f_{bd}	Bemessungswert der Verbundfestigkeit	8.4.2 (2)	[N/mm ²]
η_1	Beiwert, berücksichtigt die Verbundbedingung und die Lage der Stäbe während des Betonierens	8.4.2 (2)	[-]
η_2	Beiwert, berücksichtigt die Verbundbedingung und die Lage der Stäbe während des Betonierens	8.4.2 (2)	[-]
f_{ctd}	Bemessungswert der Betonzugfestigkeit	8.4.2 (2)	[N/mm ²]
σ_{sd}	Bemessungsspannung des Stabs, von wo aus die Verankerung gemessen wird	8.4.3 (2)	[N/mm ²]

Tab. 4.24: Parameter zur Bemessung der Verankerungslänge [58]

4.2.10 Lichte Mindestabstände der Bewehrungsstäbe

Für diesen Abstand ist das Größtkorn des Pfahlbetons, das sich nach dem Pfahldurchmesser richtet, maßgebend und darf in keinem Querschnittsbereich unterschritten werden [67]. Die ÖBV RL zum Thema Bohrpfähle begründet die höheren Anforderungen mit einem anderen Betonstandard als in der ÖNORM EN 1536, welcher in der ÖBV RL Bohrpfähle, Kapitel 5, festgelegt ist.

Größtkorn D_{max}	Pfahldurchmesser D	Lichter Mindestabstand der Bewehrungsstäbe ÖBV RL Bohrpfähle	Lichter Mindestabstand der Bewehrungsstäbe gemäß ÖNORM EN 1536
[mm]	[cm]	[mm]	[mm]
GK 16	≥ 30	50	80 bei \leq GK 20
GK 22	> 40		
GK 32	> 65	80	Sonst 100

Tab. 4.25: Zusammenhang zwischen Größtkorn der Gesteinskörnung, Pfahldurchmesser und lichtem Mindestabstand der Bewehrungsstäbe [59, 67]

4.3 Grundlegendes zur Bemessung eines Bohrpfahls mit geothermischer Nutzung

Die Schweizer Norm SIA D 0190 „Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen“ gibt an, dass die geothermische Nutzung der statischen

unterzuordnen ist und lediglich ein „willkommenes Nebenprodukt darstellt“ [50]. Laut der Richtlinie [50] ist darüber hinaus Folgendes geregelt:

Keinesfalls dürfen die statischen Eigenschaften der Pfähle durch ihre Funktion als Wärmetauscher beeinträchtigt werden. Dieses Kriterium setzt die Grenzen für die Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit, welche in den Rohren der Energiepfähle zirkuliert.

Dieser kurze Auszug des Schweizer Regelwerks verdeutlicht den Stellenwert von geothermischen Einbauten bei der statischen Bemessung. Es ist jedoch nicht konkret geregelt, wie erreicht werden soll, dass die geothermische Nutzung keine negative Auswirkung auf die Gesamtsicherheit der Tragkonstruktion hat.

Im Unterkapitel 4.3.4 dieser Arbeit werden Anstöße geliefert, auf welche Parameter der statischen Nachweisführung eine geothermische Nutzung Einfluss haben kann. In den vorhergehenden Unterkapiteln erfolgen theoretische Überlegungen, welche Aspekte einen Einfluss auf die Nachweisführung haben können und mit welcher Relevanz diese einzustufen sind. Dabei werden internationale Normen und Richtlinien sowie wissenschaftliche Forschungsergebnisse herangezogen. An dieser Stelle wird auch auf das Kapitel 4.4 verwiesen werden, in dem unterschiedliche Bemessungsansätze vorgestellt werden.

4.3.1 Zwang zufolge Temperaturveränderung

Durch die thermische Aktivierung der Bauteile werden zusätzliche thermische Lasten induziert. Es gilt zu untersuchen, in welcher Größenordnung sich diese befinden, wie groß ihr Einfluss ist und ob sich das Verhalten mit jenen anderer Temperatureinwirkungen vergleichen lässt.

Laut SIA entsteht der größte Einfluss durch Temperaturänderungen im ersten Jahr, da es zum ersten Erwärmungsprozess kommt und die Tragkonstruktion hier der größten sprunghaften Temperaturdifferenz ausgesetzt wird [50].

Aber auch schon während des Errichtens ist der Beton hohen Temperaturen ausgesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass thermische Zwänge zufolge der Temperaturinduktion der Absorberleitungen wesentlich kleiner sind als jene zufolge der Hydratationsabwärme, die während des Erhärtungsprozesses des Betons Temperaturen bis zu 70 °C entstehen lässt. Dies setzt voraus, dass Temperaturen im Minusgradbereich während des Heizbetriebs verhindert werden [68]. Wichtig zu erwähnen ist, dass während des Errichtens die Lagerungsbedingungen oftmals anders sind, als die des fertiggestellten Bauwerks und die Lasten der aufgehenden Gebäude in der Regel noch nicht vorhanden sind. Somit verändert sich die Lastverteilung von dem Errichtungsbeginn bis zur Fertigstellung des Bauwerks.

Des Weiteren wurde in Studien erforscht, dass die Veränderung der Tunnellufttemperatur einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit der Pfähle hat als die Temperaturänderungen zufolge der geothermischen Nutzung. Darüber hinaus verkleinert die thermische Aktivierung des Pfahls die Temperaturdifferenzen zwischen Pfahlkopf und Fuß. Daraus wurde geschlossen,

dass sich keine signifikante Steigerung der Lasten durch die thermische Aktivierung ergibt [43].

Auch gilt es zu untersuchen, ob die wiederholte Längenänderung der Pfähle durch zyklische thermische Belastung einen Einfluss auf die Pfahl-Bodeninteraktion hat. Laut dem französischen Regelwerk, dem eine Simulation dieser Belastung zugrunde liegt, konnte gezeigt werden, dass die zusätzliche Belastung unter der maximal zulässigen Last liegt. Somit muss keine Erhöhung in der weiteren Berechnung berücksichtigt werden, da die Längenänderungen sowohl experimentell als auch durch statische Überlegungen vernachlässigbar klein sind [69].

Es gibt jedoch auch Ansätze aus der Forschung die aufzeigen, dass thermische Zwänge zufolge der Einbauten maßgebend sein können. Hierbei wird zwischen abkühlenden Temperaturalasten und erwärmenden Temperaturalasten unterschieden [70]. Eine nähere Beschreibung dieses Ansatzes befindet sich in Kapitel 4.4.3.

4.3.2 Verringerung der aufnehmbaren Kräfte zufolge von Einbauten

Die folgende Aussage der SIA [50] zeigt wiederum die untergeordnete Rolle der Absorberleitungen, enthält aber keine Bemessungs- oder Abschätzungsansätze.

Die Randbedingungen (Position, Befestigung, Menge usw.) sind jeweils mit dem Statiker zu klären. Er bestimmt z.B. bei Energiepfählen auch den Pfahltyp, die Lage und die Anzahl der Pfähle. Die Energienutzung bei Geostrukturen ist sekundär und muss sich den Gegebenheiten der Statik anpassen.

Aus geothermischen Verhaltensanalysen geht hervor, dass die Betondeckung nur einen untergeordneten Einfluss auf die Energieeffizienz hat [36]. Auf Grund dessen scheint es sinnvoll, die Absorberleitungen auf der Innenseite des Bewehrungskorbes anzubringen, da dies den Einbau erleichtert und das Risiko von Beschädigungen einer Absorberleitung verringert. Somit wird die Betondeckung nicht reduziert und es kann die Verbundwirkung gewährleistet werden. Das Thema, welchen Einfluss die Anbringung der Absorberleitungen auf die Verbundwirkung zwischen dem Stahl und dem Beton hat, bedarf weiterer Forschung.

Die VDI 4640 Blatt 2 empfiehlt, keine Leitungsdurchmesser größer als 25x2,3 mm zu verwenden, da solch kleine Durchmesser keine nennenswerte Verringerung der Tragfähigkeit von Tunnelschalen hervorrufen [27]. Allerdings trifft die VDI keine konkrete Aussage über den Einfluss beim Einbau von Absorberleitungen in andere Massivabsorber.

4.3.3 Einfluss auf das Verhalten der Böden

Durch die geothermische Nutzung von Massivabsorbern befindet sich die mögliche Temperatur des Bodens zwischen rund 1 und 35 °C. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass Minusgrade verhindert werden, was in der Regel der Fall ist. Somit sind die Temperaturschwankungen gering genug, um das viskose Verhalten von Böden nicht zu beeinflussen und die Volumenänderung muss nicht berücksichtigt werden [69].

4.3.4 Schlussfolgerungen – Möglicherweise abhängige Parameter

Auf Basis der vorangegangenen Kapitel können folgende Schlussfolgerungen in Bezug auf eine geothermische Nutzung gezogen werden:

- Hinsichtlich des durch Temperaturdifferenzen entstehenden Zwangs kann festgestellt werden, dass es in der Forschung Uneinigkeit gibt, ob dieser Lastfall maßgebend sein kann und wenn ja, wie dieser zu berücksichtigen ist.
- Es geht klar hervor, dass die Temperaturänderungen im Boden hinsichtlich des Lastabtragungsverhaltens der Böden vernachlässigbar sind.
- Hinsichtlich des Einflusses der Lage der Absorberleitungen auf das Tragverhalten der Bohrpfähle besteht Bedarf an weiterer Forschung.

In der folgenden Tabelle sind jene Parameter der Bohrpfahlbemessung aus Kapitel 4.2 angegeben, mit Hilfe derer eine geothermische Nutzung in der Statik berücksichtigt werden könnte.

Variable	Art der Beeinflussung	Formeln, in denen sie Verwendung findet
N_{Ed}	Berücksichtigung zusätzlichen Zwangs	(4.10), (4.22), (4.33)
M_{Ed}	Berücksichtigung zusätzlichen Zwangs	(4.17), (4.23)
V_{Ed}	Berücksichtigung zusätzlichen Zwangs	(4.17), (4.18)
A_c	Verringerung der Betonfläche durch die Einbauten	(4.22), (4.23), (4.24), (4.27), (4.33)
$A_{c,eff}$	Effektive Betonfläche im Wirkungsbereich der Bewehrung	(4.8)
γ	Beibehalten der Gesamtsicherheit der Bemessung durch Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte	Tab. 4.17, (4.25), (4.29)
$C_{min, b}$	Verbundanforderung in der Betondeckung	(4.2), (4.26)
A_{ct}	Mögliche Verringerung der Betonzugzone durch die Fläche der Absorberleitungen	(4.11)
l_{bd}	Verankerungslänge – Verbundwirkung der Längsbewehrung gewährleisten	(4.38)
D_{max}	Größtkorn	Tab. 4.25
ψ_0, ψ_1, ψ_2	Kombinationswerte	Zur Bemessung der Einwirkungskombinationen

Tab. 4.26: Übersicht der Parameter, in die eine geothermische Nutzung eingehen könnte

4.4 Ansätze zur Bemessung eines Bohrpfahls mit geothermischer Nutzung

4.4.1 Regelwerke in Österreich

Im Entwurf des Eurocodes 7 aus dem Jahr 2022 wird im Anhang H das Thema „Thermoaktive Geostrukturen“ angeführt [71]. Dies ist eine Neuerung im Vergleich zu den Vorgängerversionen, mit der erstmals geothermische Systeme im Eurocode 7 Berücksichtigung finden. Es sind demnach folgende Bemessungsszenarien zu untersuchen:

- wärmeinduzierte Verschiebung der Geostruktur
- zusätzliche Kräfte in der Geostruktur durch die Bewegung zwischen dem Boden und dem gestützten Tragwerk
- Schwankung des Tragwiderstands von Pfählen sowie des Erddrucks auf die Stützkonstruktion

Als typische wärmeinduzierte Effekte auf Bohrpfähle werden folgende Aspekte hervorgehoben:

- zusätzliche Stützenkopferschiebung
- zusätzliche Normalkraft
- mobilisierter axialer Widerstand (potenziell mobilisierter Zugwiderstand für auf Zug beanspruchte Pfähle)

Des Weiteren werden zwei alternative Verfahren zur Berücksichtigung der mechanischen Effekte, die durch die geothermische Nutzung von Bauteilen entstehen, vorgeschlagen:

- Temperaturschwankungen aus der thermischen Berechnung werden direkt in der mechanischen Bemessung berücksichtigt
- Temperaturschwankungen und mechanische Auswirkungen werden in einer gemeinsamen gekoppelten Analyse berechnet

Wichtig ist laut dem Entwurf des Eurocode 7 auch, dass das Modell zur Bemessung der mechanischen Effekte zufolge Temperaturschwankungen die Boden-Bauwerk-Interaktion berücksichtigt [71].

In der Richtlinie „Erdwärmennutzung mit Massivabsorbern“ der österreichischen Bautechnik Vereinigung sind keine Angaben enthalten, wie die Zusatzbelastung in der Bemessung zu berücksichtigen ist. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass diese Belastungen von der Statik einzubeziehen sind [51].

4.4.2 Regelwerke im Ausland

Auch im Ausland gibt es einige Regelwerke zur Erdwärmenutzung mit dem Fokus auf oberflächennahe Massivabsorber. In diesem Kapitel wird eine Auswahl dieser Regelwerke angeführt sowie beschrieben, ob eine statische Betrachtung des Themas inkludiert ist.

VDI 4640-2:

Die deutsche VDI 4640-2 setzt sich vor allem mit der Funktionsweise und der Möglichkeit des Einbaus von Massivabsorbern auseinander, allerdings ist die statische Berücksichtigung nicht erwähnt [27]. Herausgeber ist der Verein Deutscher Ingenieure (VDI).

SIA D 0190:

In der Schweiz gibt es eine SIA, des schweizerischer Ingenieur- und Architektenvereins, mit dem Titel „Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen“. Sie ist relativ umfangreich, setzt sich allerdings hauptsächlich mit der Seite der Energiegewinnung auseinander, Einflüsse auf die Statik werden nur am Rande erwähnt. Es gibt keinerlei Bemessungsansätze [50].

GSHPA:

Auch die britische Regelung „Thermal Pile – Design, Installation & Material Standards“ verweist darauf, dass die Lasten von Statikern zu prüfen sind. Sie wird von der Ground Source Heat Pump Association (GSHPA) herausgegeben. Es wird hierbei zwischen zusätzlichen Lasten zufolge der thermischen Aktivierung im Grenzfall der Tragfähigkeit (ULS) und im Grenzfall der Gebrauchstauglichkeit (SLS) unterschieden [72].

Demzufolge sind im ULS-Zustand die Festigkeitseigenschaften des Bodens unter Berücksichtigung von Wärme- und Kühleffekten zu beachten. Es wird erwähnt, dass thermische Zwänge klein sind und keine Änderungen am Nachweis zu erwarten sind.

Im SLS-Zustand gilt es Folgendes zu berücksichtigen:

- die axiale und radiale Pfahlausdehnung bzw. Verkürzung sowie die Festigkeit
- thermisch induzierte axiale Spannungen
- zyklische Wirkung der thermischen Last
- Temperatur an der Schnittstelle zwischen Boden und Pfahl einschließlich täglicher und saisonaler Schwankungen

Detaillierte Ausführungen der Überlegungen zum ULS-Zustand sind in Anhang D dieser Regelung zu finden. Der Anhang E setzt sich mit dem SLS-Zustand auseinander. Es wird darauf hingewiesen, dass keine signifikanten Änderungen der Bodeneigenschaften bei mitteldicht bis dicht gelagerten nicht kohäsiven Böden erwartet wird. Hingegen kann es bei feinkörnigen Böden zu Änderungen der Festigkeit, Steifigkeit oder des Vorkonsolidierungsdrucks kommen.

Darüberhinausgehend müssen in diesen Böden die möglichen Effekte einer negativer Mantelreibung beachtet werden [72]. Auch wird empfohlen, die Bodentemperatur bei über 0 °C zu halten, damit sich die Eigenschaften der Pfahl-Boden-Schnittstelle nicht ändern. Das britische Regelwerk empfiehlt zusammenfassend eine genaue Bemessung der möglichen Lasten und ein Ansetzten dieser und rät davon ab, die Sicherheitsbeiwerte abzuändern [72].

CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP:

Das französische Regelwerk „Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques“ ist aus dem Jahr 2017 und wird von CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP veröffentlicht. Sie schlägt hingegen eine Anpassung der Kombinationsbeiwerte vor, um den Einfluss durch Temperaturveränderungen zu berücksichtigen und somit die Gesamtsicherheit des Tragwerks zu erhalten. Sie sind in der folgenden Tabelle angeführt.

Kombinationsbeiwert	Beschreibung	Faktor
ψ_0	seltene Einwirkungskombination	0,6
ψ_1	häufiger Wert dominierende Einwirkung	0,5
ψ_2	quasi ständiger Wert begleitende Einwirkung	0,2

Tab. 4.27: Tabelle der Kombinationsbeiwerte [69]

Auch in dieser Empfehlung wird festgestellt, dass die Änderung der Bodeneigenschaften nicht berücksichtigt werden muss [69]. Grundsätzlich wird dabei empfohlen, drei Konsequenzen der thermischen Aktivierung zu beachten, die durch die Anpassung der Kombinationsbeiwerte erfolgen soll:

- Kräfte in den Strukturelementen
- Verformungen
- Veränderung der geotechnischen Sicherheit

Es wird darüber hinaus festgehalten, dass der empfohlene Abstand der Absorberleitungen zueinander mindestens 15 cm beträgt. Des Weiteren sind die Anzahl der U-Schlaufen über die Größe des Pfahldurchmessers geregelt, die geltenden Bandbreiten werden in der folgenden Tabelle angeführt [69].

Pfahldurchmesser [cm]	Anzahl der U-Schlaufen
< 40	1
40-60	2
60-80	3
80-100	4
>100	Pro 20cm Durchmesserzunahme kann eine Schlaufe hinzugefügt werden

Tab. 4.28: Anzahl der empfohlenen U-Schlaufen, abhängig vom Durchmesser nach dem französischen Regelwerk [69]

Es wird empfohlen, als Abstand $4 \cdot D_{\max}$ (maximale Größe des Zuschlagkorns) zwischen den Längsbewehrungseisen und den Absorberleitungen einzuhalten. Dies ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Befestigung der Absorberleitung an der Längsbewehrung möglich ist, sofern dies mit der Statik vereinbar ist. Auch sollen die Schlaufen der Absorberleitungen mindestens 25 cm vom unteren Ende des Bewehrungskorbs entfernt sein [69].

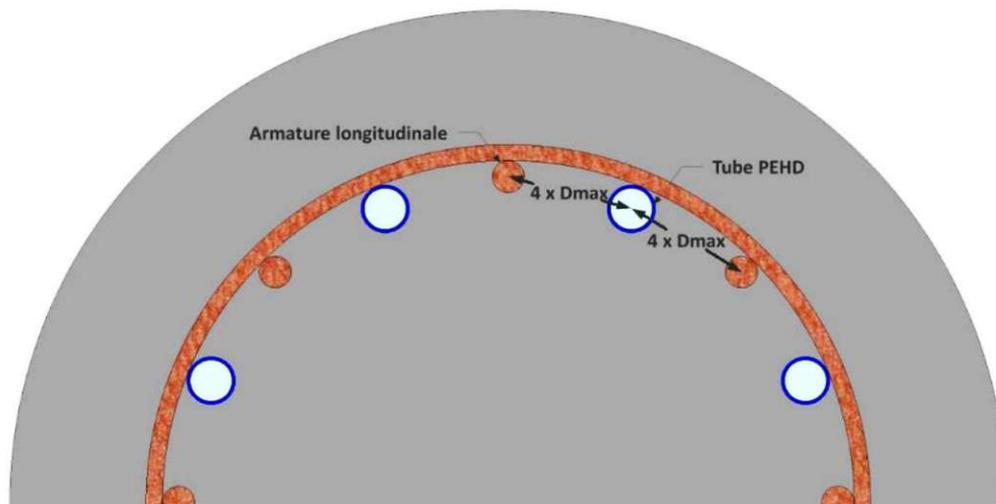


Abb. 4.6: Abstand der Längsbewehrung zu den Absorberleitungen [69]

4.4.3 Bemessungsansätze gemäß Forschung

Eine weitere Möglichkeit zur Berücksichtigung der thermischen Belastung in der Statik ist, die Betongüte und den Bewehrungsgehalt zu erhöhen, um allfällige Mehrbelastungen zu kompensieren [70]. Es wird auch eine minimale Längsbewehrung festgelegt, die ein duktiles Verhalten bei thermischer Nutzung sicherstellen soll [70].

$$\rho_r = \rho_{r,min} \geq \frac{f_{ct}}{f_y} \quad (4.40)$$

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
ρ_r	resultierender minimaler Längsbewehrungsgehalt	[-]
$\rho_{r,min}$	minimaler Längsbewehrungsgehalt	[-]
f_{ct}	kann mit f_{ctm} angenommen werden - Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons	[N/mm ²]
f_y	Streckgrenze von Stahl	[N/mm ²]

Tab. 4.29: Minimaler Längsbewehrungsgehalt nach Rotta Loria [70]

Auch werden in dieser wissenschaftlichen Veröffentlichung konkrete Vorschläge gebracht, wie thermische Lasten in den Designkombinationen zu berücksichtigen sind. Rotta Loria beschreibt, dass es – sofern es sich um einen Heizbetrieb handelt – einerseits eine Kombination geben muss, in der die thermische Last die dominierende Variable ist und andererseits einen Lastfall, bei dem die Temperaturlast nicht dominierend ist, sondern mit anderen Lasten überlagert wird. Im Kühlfall muss lediglich die Temperaturlast als dominierend angesetzt werden [70].

Auch soll der Energiepfahl in zwei Grenzfällen betrachtet werden – einerseits, wenn Bewegungen am Pfahlkopf möglich sind andererseits, wenn Bewegungen, beispielsweise aufgrund einer Bodenplatte, verhindert sind. Damit soll die maximale Last auf den Pfahl ermittelt werden [70].

4.5 Bewertung der Ansätze und Schlussfolgerung

Abschließend kann festgestellt werden, dass es zu dem Thema der statischen Berücksichtigung der geothermischen Nutzung von Betonelementen einige wenige konkrete Ansätze gibt, wie sie berücksichtigt werden können. Die vorhandenen Ansätze setzen sich vor allem mit der zusätzlichen Last zufolge der thermischen Aktivierung auseinander. Hierfür finden sich in der britischen sowie der französischen Richtlinie konkrete Vorschläge zur Bemessung [69, 72]. Daraus geht hervor, dass die thermische Aktivierung hauptsächlich einen Einfluss auf die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit hat. Der Aspekt der Positionierung der Absorberleitungen sowie deren Einfluss auf die Verbundwirkung der Tragstruktur ist in dem französischen Regelwerk in Ansätzen festgehalten. Dabei sind die Absorberleitungen zwischen den Längseisen zu montieren, wodurch die Verbundwirkung zwischen dem Stahl und dem Beton kaum eingeschränkt wird [69]. Zu diesem Thema besteht allerdings Bedarf an zusätzlicher Forschung.

5 Zusammenfassung

Die gegenständliche Diplomarbeit behandelt die geothermische Nutzung einer Bohrpfahlwand im Lainzer Tunnel. Insbesondere wurde die numerische Modellierung eines Abschnitts des Lainzer Tunnels mit dem Programm COMSOL Multiphysics sowie der Vergleich mit Messdaten durchgeführt. Auch erfolgte eine grundlegende Betrachtung der Einflüsse einer geothermischen Nutzung auf die statische-konstruktive Bemessung eines Bohrpfahls.

Im Kapitel 2 „Grundlagen der Geothermie“ wurden ausgehend von der Bedeutung der Geothermie in Österreich zur Energieversorgung und ihrem Potential auf die Funktionsweise eingegangen. Es wurden die Aspekte der oberflächennahen Geothermie dargelegt, wobei der Fokus auf Massivabsorberanlagen, insbesondere Wände mit einer Luftseite, lag. Die detaillierte Betrachtung letzterer war von besonderer Bedeutung, da es zu diesem Thema bislang verhältnismäßig wenig Forschung gab.

Zu Beginn des Kapitels 3 „Lainzer Tunnel (LT24 – Hadersdorf-Weidlingau)“ wurde ein Projektüberblick des Lainzer Tunnels gegeben. Er ist das Verbindungsbauwerk zwischen der Weststrecke und dem Wiener Hauptbahnhof und somit einer der am stärksten frequentierten Bahnstrecken in Österreich. Der Tunnel wurde Anfang der 2000er Jahre fertiggestellt. Nach einer kurzen Beschreibung des Bauwerks und der installierten geothermischen Anlage wurde auf die bisherige Forschungsarbeit zum Lainzer Tunnel eingegangen. Insbesondere war die geothermische Nutzung der Bohrpfahlwand im Bereich des LT24 (Art und Positionierung der Messensoren) von Interesse. Darüberhinausgehend erfolgte eine Aufbereitung der Messdaten aus der Heizperiode 2005/06.

Es wurden die erforderlichen Parameter zur Modellierung eines Tunnelabschnitts mit COMSOL Multiphysics festgelegt. Einerseits konnten bekannte Werte aus dem Bodengutachten, aus Messungen und Planunterlagen herangezogen werden. Dazu zählten der Bodenaufbau, die Außenlufttemperatur und die geometrischen Randbedingungen. Andererseits konnten einige Parameter auf Grundlage bekannter Werte mittels Literaturrecherche sowie theoretischen Überlegungen angenommen werden, waren dadurch jedoch mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Dazu zählten die Tunnelinnenlufttemperatur, die Vorlauftemperatur sowie die Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit. Eine detaillierte Aufzählung aller Parameter sowie deren Kenntnisstand wurde in Kapitel 3.4 angeführt. Auf diese wurde in den folgenden Unterkapiteln im Detail eingegangen.

Anhand dieser Parameter wurde das Modell in einem iterativen Prozess kalibriert. Dabei dienten die Messdaten der Pfahltemperaturen der Modellvalidierung. Im Unterkapitel 3.7 „Modellkalibrierung“ wurden die finalen Ergebnisse der variierten Parameter dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Temperaturverhalten im Pfahl sehr gut durch die Modellierung abbilden ließ. Das kalibrierte Modell kann somit zur Vordimensionierung weiterer Projekte herangezogen werden.

Eine wesentliche Erkenntnis der Simulationsberechnungen war das unterschiedliche Temperaturverhalten des Absorberkreises 1 (unter der Bodenplatte, Bohrpfahlwand auf beiden Seiten erdberührt) zu jenem des Absorberkreises 2 (oberhalb der Bodenplatte, Bohrpfahlwand mit Luft- und Erdseite). Der Absorberkreis 1 war außerhalb des Heizbetriebs deutlich weniger von den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen abhängig. Auch unterschieden sich die Temperaturen an den erdseitigen und den luftseitigen Auswertpunkten deutlich weniger als im Bereich des Absorberkreises 2. Anhand der Berechnungen ergab sich für den betrachteten Pfahl ein Energieertrag von etwa 38 W/m^2 als Dauerleistung im Vollbetrieb.

Der Kalibrierung nachfolgend wurde eine Parameterstudie (Kapitel 3.8) durchgeführt, in der durch Variation einzelner Parameter (Tunnelinnenlufttemperatur, Vorlauftemperatur, Anfangstemperatur des Bodens, Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit) deren Einfluss auf das Gesamtsystem gezeigt werden konnte. Es sei an dieser Stelle die Tunnelinnenlufttemperatur sowie die Vorlauftemperatur hervorgehoben, da diese den verhältnismäßig größten Einfluss auf das Temperaturverhalten hatten.

Im letzten Kapitel 4 „Einfluss einer geothermischen Nutzung von Bohrpfählen auf deren statisch-konstruktive Bemessung“ wurden eingangs alle in Österreich relevanten Normen und Richtlinien angeführt, die zur Bemessung eines Bohrpfahls ohne geothermischer Nutzung zu beachten sind. Anschließend erfolgten grundlegende Überlegungen zur Bemessung eines Bohrpfahls mit geothermischer Nutzung.

Abschließend wurden internationale Regelwerke betrachtet, die eine geothermische Nutzung von Massivabsorbern behandeln. Zusammenfassend ging aus diesen hervor, dass sich die geothermische Nutzung vornehmlich im Gebrauchstauglichkeitszustand auf die Statik auswirkt. Insbesondere sind an dieser Stelle die französische und die britische Richtlinie hervorzuheben, die die detailliertesten Ansätze zur statischen Berücksichtigung beinhalten. In Ersterer erfolgt ein Einfließen in die Bemessung über angepasste Kombinationsbeiwerte. In der Zweiten wird stattdessen ein exaktes Ansetzen der induzierten Temperaturen empfohlen. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass zu diesem Thema noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

6 Literaturverzeichnis

- [1] R. Markiewicz, „Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau,“ TU Wien, Wien, 2004.
- [2] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme : Technologie – Berechnung – Klimaschutz, Bd. 11. Auflage, München: Hanser, 2022, p. 472.
- [3] M. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi und T. Neu, Handbuch Oberflächennahe Geothermie, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 819.
- [4] I. Stober und K. Bucher, Geothermie, Bd. 3. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2020, p. 390.
- [5] D. Adam und R. Makiewicz, „Nutzung der Geothermie mittels Erdwärmeabsorber und Grundwasserbrunnen,“ *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Nr. vol. 62, p. 85, 2010.
- [6] M. Lösch, J. Streitner, W. Gary und B. Petra, „Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2020.
- [7] P. Biermayr, „Erneuerbare Energien 2020,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2022.
- [8] P. Biermayr et al., „Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2021,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2022.
- [9] Greenhouse Media GmbH, „Optimierung der Quellentemperatur zur Steigerung der Arbeitszahl,“ 12 11 2018. [Online]. Available: <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/leistung/quellentemperatur>. [Zugriff am 23 10 2022].
- [10] Bundesministerium für Finanzen, „Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Wasserrechtsgesetz 1959, Fassung vom 23.10.2022,“ Bundesministerium für Finanzen, Wien, 2022.
- [11] Bundesministerium für Finanzen, „Gesamte Rechtsvorschrift für Mineralrohstoffgesetz, Fassung vom 23.10.2022,“ Bundesministerium für Finanzen, Wien, 2022.

- [12] Bundesministerium für Finanzen, „Mineralrohstoffgesetz (MinroG),“ [Online]. Available: <https://www.bmf.gv.at/themen/bergbau/rechtsangelegenheiten-im-bergbau/mineralrohstoffgesetz.html>. [Zugriff am 11 04 2023].
- [13] GeoSphere Austria, „Technologien in der Oberflächennahen Geothermie,“ [Online]. Available: <https://www.erdwaerme-wien.info/technologie/>. [Zugriff am 26 10 2022].
- [14] RIS- Rechtsinformationssystem des Bundes, „Gesamte Rechtsvorschrift für Wasserrechtsgesetz 1959,“ [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010290>. [Zugriff am 04 11 2022].
- [15] „Projekt WC-33 - Potenzialkarte für die integrative Planung thermischer Grundwassernutzungen in Aspern Nord,“ Geologische Bundesanstalt, Wien, 2016.
- [16] Bundesverband Geothermie e.V., „Stand der Forschung und Forschungsbedarf in der Geothermie,“ Bundesverband Geothermie e. V, Berlin, 2020.
- [17] C. Moormann, P. Buhmann, S. Homuth, W. Friedemann und P. Norbert, „Tunnel geothermics – International experience with renewable energy concepts in tunnelling,“ *Geomechanics and Tunnelling*, Nr. No. 5, pp. 467-479, 2016.
- [18] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., „Wie funktioniert die Wärmepumpe?,“ [Online]. Available: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>. [Zugriff am 20 11 2022].
- [19] S. Kürten, „Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen am Beispiel thermo-aktiver Abdichtungselemente,“ Aachen, 2014.
- [20] T. Laasch und L. Erhard, *Haustechnik Grundlagen-Planung-Ausführung*, Wiesbaden, Deutschland: Springer Science+Business Media, 2013.
- [21] Verein Energiepfad Grabs, „Energiepfähle,“ [Online]. Available: <https://www.energiepfad.ch/wiki/energiepfaehle/>. [Zugriff am 26 10 2022].
- [22] iC consulenten ZT GmbH, „Wirtschaftliche Optimierung von TunnelThermie®-Absorberanlagen Grundlagenuntersuchung und Planungsleitfaden,“ MAGISTRATSABTEILUNG 27 EU STRATEGIE UND WIRTSCHAFTSENTWICKLUNG DEZERNAT ENERGIE, Wien, 2005.
- [23] D. Adam und A. Oberhauser, „Kosten und Nutzen der Geothermie für die Verkehrsinfrastruktur,“ *EI-Eisenbahningenieur*, Nr. 3, pp. 6-12, 2008.
- [24] J. Kuhlmann, B. Oldorf und K. Jens-Uwe, „Optimierungspotenzial für thermisch aktivierte Gründungspfähle (Energiepfähle),“ *Bautechnik*, pp. 177-180, Heft 2 2015.
- [25] A. Schernhammer, „Schritt für Schritt zur Wärmepumpe: Teil 1,“ 12 02 2014. [Online]. Available: <https://www.energieleben.at/schritt-fur-schritt-zur-waermepumpe-teil-1/>. [Zugriff am 07 03 2023].

- [26] Umwelt Bundesamt, „Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung,“ Umwelt Bundesamt, Dessau-Roßlau, 2014.
- [27] Verein deutscher Ingenieure, „VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen,“ VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), Deutschland, 2019.
- [28] Engeo AG, „Geocooling Upgrade ihrer Geothermie Heizung,“ [Online]. Available: <https://engeo.ch/geo-freecooling.html>. [Zugriff am 01 11 2022].
- [29] A. Zauner, „Oberflächennahe Erdwärmenutzung in Österreich – Überblick und Stuserhebung,“ Technische Universität Wien, Wien, 2009.
- [30] D. Adam, R. Markiewicz und A. Brunner, *Eröffnungsvortrag Geotechnik in der Geothermie*, 11. Oberösterreichischer Geotechniktag: BAUAkademie Österreich, 2022.
- [31] EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, „Free - Cooling gute Lösungen brauchen Köpfchen,“ EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2019.
- [32] H.S.W. Ingenieurbüros - Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH. , „Erdwärmenutzung in Hamburg,“ [Online]. Available: http://www.hamburg-erdwaerme.de/erdwaerme_Hamburg.html. [Zugriff am 01 11 2022].
- [33] A. Brunner, R. Markiewicz, J. Pistor und D. Adam, „Langzeiterfahrungen zur geothermischen Nutzung der U-Bahn-Station Taborstraße in Wien,“ *Bauingenieur*, Bd. 97, Nr. 07-08, pp. 248-261, 2022.
- [34] H. Brandl, „Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds,“ in *15th International scientific conference "Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development"*, St. Petersburg, 2016.
- [35] P. J. Bourne-Webb, T. M. Bodas Freita und R. A. d. Costa Gonçalves, „Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers,“ *Energy and Buildings*, Nr. 125, pp. 130-141, 2016.
- [36] A. Di Donna, F. Cecinato, F. Loveridge und M. Barla, „Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers,“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, Bd. 170, Nr. 3, pp. 232-245, 2017.
- [37] A. Di Donna, F. Loveridge, M. Piemontese und M. Barla, „The role of ground conditions on the heat exchange potential of energy walls,“ *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2020.
- [38] R. Stemmler, K. Menber, R. Ladislaus und B. Philipp, „Tunnel geothermics - A review,“ *Geomechanics and Tunneling*, Bd. 15, Nr. No. 1, pp. 104-111, 2022.
- [39] P. Dieter, „Lainzer Tunnel Entwurf, Planung und Realisierung des schotterlosen Oberbaus,“ FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, Wien, Österreich, 2008.

- [40] Wiener Stadt- und Landesarchiv (MA 8) / Wienbibliothek im Rathaus (MA 9), „Wien Geschichte Wiki,“ Lainzer Tunnel, 05 07 2022. [Online]. Available: https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/Lainzer_Tunnel. [Zugriff am 08 03 2023].
- [41] M. Populorum, „Thema Neubauprojekte - Der Lainzer Tunnel im Kontext des TEN 17 "Magistrale für Europa",“ 30 01 2011. [Online]. Available: https://www.dokumentationszentrum-eisenbahnforschung.org/westbahn_lainzertunnel.htm. [Zugriff am 04 11 2022].
- [42] T. Glötzl, „Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie®-Absorberanlagen am Beispiel Lainzer Tunnel, Los LT 24 – Hadersdorf-Weidlingau“, TU Wien, Wien, 2010.
- [43] H. Brandl, „Energy foundations and other thermo-active ground structures,“ *Géotechnique*, Bd. 56, Nr. no. 2, pp. 81-122, 2006.
- [44] ic Consulanten, nägelebau, „Absorberbelegung Block 10,“ HL-AG Eisenbahn-Hochleistungs-Strecken AG, Wien, 2001.
- [45] Ingenieurbüro Waibel, „Baulos LT24 - Weidlingau -Geotechnisches Gutachten Lageplan-Bodenaufschlüsse,“ HL-AG Eisenbahn Hochleistungsstrecken AG, Wien, 1998.
- [46] Ingenieurbüro Waibel, „Baulos LT24 - Weidlingau - Geotechnisches Gutachten Bohrprofile,“ HL-AG Eisenbahn Hochleistungsstrecken AG, Wien, 1998.
- [47] Ingenieurbüro Waibl, „Baulos LT24 - Weidlingau - Geotechnisches Gutachten Bodenquerprofil 2,“ HL-AG Eisenbahn Hochleistungsstrecken AG, Wien, 1998.
- [48] Ingenieurbüro Waibl, „Baulos LT24 - Weidlingau - Geotechnisches Gutachten Bodenquerprofil 3,“ HL-AG Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG, Wien, 1998.
- [49] Ingenieurbüro Waibel, „Baulos LT24 - Weidlingau - Geotechnisches Gutachten,“ Ingenieurbüro Waibel, Wien, 1998.
- [50] SIA schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „D 0190 Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen Leitfadern zu Planung, Bau und Betrieb,“ SIA schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2005.
- [51] Österreichische Bautechnik Vereinigung, „Erdwärmennutzung mit Massivabsorbern,“ Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien, 2019.
- [52] Ingenieurbüro Waibel, „Baulos LT24 - Weidlingau -Geotechnisches Gutachten Grundwasserganglinie,“ HL-AG Eisenbahn Hochleistungsstrecken AG, Wien, 1998.
- [53] T. Schlosser, M. Schmidt, M. Schneider und P. Vermeer, „Potenzial der Tunnelbaustrecke des Bahnprojektes Stuttgart 21 zur Wärme- und Kältenutzung,“ Institut für GebäudeEnergetik- Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.

- [54] N. Makasis, G. A. Narsilio, A. Bidarmaghz, I. W. Johnston und Y. Zhong, „The importance of boundary conditions on the modelling of energy retaining walls,“ *Computers and Geotechnics*, Bd. Vol. 120, 2020.
- [55] SWR Wissen, „Warum ist es im Gotthardtunnel so warm?,“ 03 06 2022. [Online]. Available: <https://www.swr.de/wissen/1000-antworten/warum-ist-es-im-gotthardtunnel-so-warm-100.html>. [Zugriff am 14 04 2023].
- [56] Ingenieurbüro A. Pauser, „Bohrpfähle Weichenhalle Block 7 bis 16 Süd, Teil 1 Standberechnung,“ HL-AG Eisenbahn Hochleistungsstrecken AG, Wien, 2001.
- [57] Europäisches Komitee für Normung, „ÖNORM EN 206-1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität,“ Austrian Standards International, Wien, 2021.
- [58] Europäisches Komitee für Normung, „ÖNORM EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2011.
- [59] Europäisches Komitee für Normung, „ÖNORM EN 1536 - Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2015.
- [60] Österreichische Bautechnik Vereinigung, „Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wanne,“ Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien, 2018.
- [61] Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „OFFENE BAUWEISE RVS 09.01.41,“ Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, Wien, 2013.
- [62] Europäisches Komitee für Normung, „ÖNORM EN 10080: Stahl für die Bewehrung von Beton - Schweißgeeigneter Betonstahl - Allgemeines,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2005.
- [63] Europäisches Komitee für Normung, „ÖNORM B 4707: Bewehrungsstahl - Anforderungen, Klassifizierung und Prüfung,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2017.
- [64] Europäisches Komitee für Normung, „Eurocode 2- Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton - und Spannbetontragwerken nationale Festlegungen,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2010.
- [65] Europäisches Komitee für Normung, „Eurocode 7 - Entwurf, berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil1: Allgemeine Regeln,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2014.
- [66] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V., „Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA-Pfähle,“ Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V., Hamburg, 2012.
- [67] Österreichische Bautechnik Vereinigung, „Richtlinie Bohrpfähle,“ Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien, 2019.

- [68] H. Brandl, „Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground,“ Laboratory of Soil Mechanics, Ghent University, Belgium, 1998.
- [69] CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP, „Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques,“ CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP, Frankreich, 2017.
- [70] A. F. Rotta Loria, „Performance-based Design of Energy Pile Foundations,“ *DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute*, Bd. 12, Nr. 2, 2018.
- [71] Europäisches Komitee für Normung, „ENTWURF: DIN EN 1997-3: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik –,“ Austrian Standards Institute, Wien, 2022.
- [72] Ground Source Heat Pump Association, „Thermal Pile - design, Installation & Material Standards,“ Ground Source Heat Pump Association, Milton Keynes, 2012.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Aufbau der Erde [2]	16
Abb. 2.2: Oberflächennahes Temperaturregime in Deutschland [9]	17
Abb. 2.3: Veranschaulichung der Systeme [13]	18
Abb. 2.4: Schema einer geothermischen Anlage [18]	19
Abb. 2.5: Massivabsorber Funktionsweise [21]	20
Abb. 2.6: Leitungsführung in einem Energiepfahl [19]	21
Abb. 2.7: Funktionsskizze Wärmepumpe [25]	22
Abb. 2.8: Energiefluss einer erdgekoppelten Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperaturen im Heizfall [1]	23
Abb. 2.9: Schema Free Cooling [28]	24
Abb. 2.10: Saisonaler Speicherzyklus des Erdbodens [32]	25
Abb. 2.11: Beispiele für Massivabsorber [19]	26
Abb. 3.1: Einordnung der Neubaustrecke in das Eisenbahnnetz [39]	29
Abb. 3.2: Abschnitte des Gesamtbauwerks [41]	30
Abb. 3.3: Gliederung der Baulosabschnitte [39]	30
Abb. 3.4: Schema der geothermischen Anlage [1]	31
Abb. 3.5: links: Bewehrungskörbe mit Absorberleitungen; rechts: Stoß der Bewehrungskörbe....	32
Abb. 3.6: Übersicht der Bohrpfähle sowie der installierten Messsensoren [1]	35
Abb. 3.7: Lage der Absorberkreise und der Temperatursensoren im Pfahl S_10_11 [44]	37
Abb. 3.8: Schnitt Bohrpfahlwand mit Lage der Temperatur- und Dehnungssensoren [1]	38
Abb. 3.9: Lage des untersuchten Messpfahls [1]	40
Abb. 3.10: Modellabmessungen	41
Abb. 3.11: links: Modellübersicht mit Energiepfahl in violett; rechts: DSV-Körper orange markiert	42
Abb. 3.12: Absorberschema im Messpfahl S_07_20 [1]	43
Abb. 3.13: Lage der Bodenaufschlüsse [45]	44
Abb. 3.14: Bodenquerprofil 2 [47]	45
Abb. 3.15: Bodenquerprofil 3 [48]	46
Abb. 3.16: Mittlerer täglicher Durchfluss Heizperiode 2005/06	50
Abb. 3.17: Außenlufttemperatur in der Heizperiode 2005/06	52
Abb. 3.18: Sinusfunktion, die die Außenlufttemperatur annähert	53
Abb. 3.19: Korrelation Messdaten Innenlufttemp./ Außenlufttemp. in der Heizperiode 2005/06	55

Abb. 3.20: Abstand des LT24 zu den Tunnelportalen [39].....	56
Abb. 3.21: Sinusfunktion, die die Innenlufttemperatur im Verteilerraum annähert	58
Abb. 3.22: Gegenüberstellung der Innenlufttemperatur und der Außenlufttemperatur in der Modellierung	58
Abb. 3.23: Vergleich Messdaten luft-/ erdseitig („L“, „E“) in unterschiedlichen Tiefenstufen (1 m, 5 m, 9 m, 14 m, 18 m) in der Heizperiode 2005/06	59
Abb. 3.24: Pfahltemperaturen im Bereich des Absorberkreises 1 in der Heizperiode 2005/06	60
Abb. 3.25: Pfahltemperaturen im Bereich des Absorberkreises 2 in der Heizperiode 2005/06	60
Abb. 3.26: Pfahltemperaturen auf der Tunnelinnenseite in der Heizperiode 2005/06	61
Abb. 3.27: Pfahltemperaturen auf der Erdseite in der Heizperiode 2005/06	62
Abb. 3.28: Vorlauf- / Rücklauftemperatur in der Heizperiode 2005/06.....	63
Abb. 3.29: Rücklauftemperatur in der Sammelleitung im Verteilerraum (MW Temp RL) im Vergleich zur Pfahltemperatur (Pfahl S_07_20) in einer Tiefe von 1 m auf der Erdseite (MW_E_01).....	64
Abb. 3.30: Erster Ansatz der Vorlauftemperatur in der Heizperiode 2005/06.....	65
Abb. 3.31: Schichtaufbau und Innenschale (blau) im Modell	66
Abb. 3.32: Bohrpfahlwand (hellblau) im Modell und DSV-Körper (blau)	67
Abb. 3.33: Längsschnitt durch das Modell mit Lage der Absorberleitungen im Energiepfahl	68
Abb. 3.34: Links: Schnitt durch den Energiepfahl mit den Absorberleitungen, rechts: Detail der PE-Rohre mit Wandstärke	68
Abb. 3.35: Links: erster Absorberkreis; Mitte: zweiter Absorberkreis; rechts: beide Absorberkreise im Energiepfahl	69
Abb. 3.36: Ansatz der Temperaturrandbedingungen	70
Abb. 3.37: Flächen mit thermischer Isolierung	70
Abb. 3.38: Darstellung des FE-Netzes	71
Abb. 3.39: Positionierung des luftseitigen Auswertpunktes in 18 m Tiefe, links: Axonometrie, rechts: Schnitt.....	72
Abb. 3.40: Positionierung der erdseitigen Auswertpunkte, links: für den Absorberkreis 1 (bei -14 und -18 m), rechts: für den Absorberkreis 2 (bei -9, -5 und -1 m)	72
Abb. 3.41: Temperatur nach fünf Jahren ohne geothermische Nutzung, links: Oberflächentemperatur vor Beginn des Heizbetriebs; rechts: Temperaturverlauf in ausgewählten Schnitten	74
Abb. 3.42: Außenlufttemperatur in der Heizperiode 2004/05	75
Abb. 3.43: Tunnelinnenlufttemperatur in der Heizperiode 2004/05	75
Abb. 3.44: Temperatur-Anfangswerte für die Heizperiode 2005/06	76
Abb. 3.45: Tunnelinnenlufttemperatur für die Heizperiode 2005/06	77
Abb. 3.46: Außenlufttemperatur und (kalibrierte) Tunnelinnenlufttemperatur.....	77
Abb. 3.47: Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit in der Heizperiode 2005/06	78

Abb. 3.48: Kalibrierte (SI_VL_Temp) und gemessene (MW_VL_Temp) Vorlauftemperatur in der Heizperiode 2005/06.....	79
Abb. 3.49: Pfahltemperaturen im Energiepfahl, Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation (SI) mit den Messwerten (MW) für die Heizperiode 2005/06	80
Abb. 3.50: Pfahltemperaturen unterhalb der Bodenplatte (im Bereich des Absorberkreises 1), Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation (SI) mit den Messwerten (MW) für die Heizperiode 2005/06	80
Abb. 3.51: Pfahltemperaturen oberhalb der Bodenplatte (im Bereich des Absorberkreises 2), Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation (SI) mit den Messwerten (MW) für die Heizperiode 2005/06	81
Abb. 3.52: Pfahltemperaturen im Energiepfahl für die Heizperiode 2005/06; Zusätzlich zur Abb. 3.49 - Darstellung der gemessenen Vorlauftemperatur (MW) sowie jener der Simulation (SI)	81
Abb. 3.53: Schnitt durch das Modell (in Modellmitte) mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Ende September – (kein Heizbetrieb) in der Heizperiode 2005/06 [°C]	82
Abb. 3.54: Schnitt durch das Modell in unterschiedlichen Tiefen mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Ende September – (kein Heizbetrieb) der Heizperiode 2005/06; von links nach rechts: -18 m, -14 m, -9 m, -5 m, -1 m, [°C].....	83
Abb. 3.55: Schnitt durch das Modell (in Modellmitte) mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Anfang März – (Heizbetrieb) in der Heizperiode 2005/06, [°C]	84
Abb. 3.56: Wärmestrom im Modell mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Anfang März – (Heizbetrieb) in der Heizperiode 2005/06, [°C]	85
Abb. 3.57: Schnitt durch das Modell in unterschiedlichen Tiefen mit Temperaturverteilung zum Zeitpunkt Anfang März – (Heizbetrieb) der Heizperiode 2005/06; von links nach rechts: -18 m, -14 m, -9 m, -5 m, -1 m, [°C].....	85
Abb. 3.58: Übersicht Schnitt in -1 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]	87
Abb. 3.59: Detailschnitt zu Abb. 3.58, [°C].....	87
Abb. 3.60: Übersicht Schnitt in -5 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]	88
Abb. 3.61: Detailschnitt zu Abb. 3.60, [°C].....	88
Abb. 3.62: Übersicht Schnitt in -9 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]	89
Abb. 3.63: Detailschnitt zu Abb. 3.62, [°C].....	89
Abb. 3.64: Übersicht Schnitt in -14 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]	90
Abb. 3.65: Detailschnitt zu Abb. 3.64, [°C].....	90
Abb. 3.66: Übersicht Schnitt in -18 m Tiefe für den Zeitpunkt Anfang März in der Heizperiode 2005/06. Pfahl S_07_20 mit Heizbetrieb, [°C]	91

Abb. 3.67: Detailschnitt zu Abb. 3.66, [°C].....	91
Abb. 3.68: Berechnete Vorlauf- und Rücklauf­temperatur sowie Differenz für die Absorberkreise 1 und 2 beim Energiepfehl S_07_20 in der Heizperiode 2005/06	92
Abb. 3.69: Berechnete Rücklauf­temperaturen des Absorberkreises 1 sowie des Absorberkreises 2 und Differenz beim Energiepfehl S_07_20 in der Heizperiode 2005/06	93
Abb. 3.70: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation der Mittelwert der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – erhöht wurde	96
Abb. 3.71: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation der Mittelwert der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – verringert wurde	97
Abb. 3.72: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Amplitude der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – erhöht wurde	98
Abb. 3.73: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Amplitude der Tunnelinnenlufttemperatur um 4 °C – im Vergleich zur Funktion aus Kapitel 3.7.1.3 – verringert wurde	99
Abb. 3.74: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Vorlauf­temperatur um 3 °C – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.5 – erhöht wurde	100
Abb. 3.75: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Vorlauf­temperatur um 3 °C – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.5 – verringert wurde	101
Abb. 3.76: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation die Anfangstemperatur des Bodens auf 13 °C – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.2 – erhöht wurde	102
Abb. 3.77: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation eine Halbierung der Absorberströmungsgeschwindigkeit – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.4 – erfolgte. 103	
Abb. 3.78: Gegenüberstellung der gemessenen (MW) Pfahltemperaturen mit dem Simulationsergebnis (SI), wobei in der Simulation eine Verdoppelung der Absorberströmungsgeschwindigkeit – im Vergleich zu jener aus Kapitel 3.7.1.4 – erfolgte. 104	
Abb. 4.1: Bemessungssituation 1 – Aushubphase A – GW 0,0 m [56].....	109
Abb. 4.2: Bemessungssituation 1 – Aushubphase B – GW 0,0 m [56].....	109
Abb. 4.3: Bemessungssituation 2 – Aushubphase A – GW 5,0 m [56].....	110

Abb. 4.4: Bemessungssituation 2 – Aushubphase B – GW 5,0 m [56].....	110
Abb. 4.5: Querschnitt eines Einzelpfahls bei Biegung und Normalkraft [61]	114
Abb. 4.6: Abstand der Längsbewehrung zu den Absorberleitungen [69].....	129



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Technische Daten der Erdwärmeanlage [1].....	33
Tab. 3.2: Anführung aller Messeinrichtungen [1].....	36
Tab. 3.3: Eingangsparameter COMSOL Multiphysics – Vergleichsmodellierung.....	39
Tab. 3.4: Schichtaufbau Modell	47
Tab. 3.5: Relevante Bodenparameter für diesen Bereich [49]	47
Tab. 3.6: Übersicht Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	48
Tab. 3.7: Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit in den Absorberleitungen.....	51
Tab. 3.8: Temperaturkenndaten Außenlufttemperatur der Heizperiode 2005/06.....	52
Tab. 3.9: Eingangsparameter Sinusfunktion Außenlufttemperatur	53
Tab. 3.10: Temperaturkenndaten Innenluft in der Heizperiode 2005/06.....	54
Tab. 3.11: Eingangsparameter Sinusfunktion Innenlufttemperatur.....	57
Tab. 3.12: Materialparameter für das kalibrierte Modell.....	73
Tab. 3.13: Übersicht der initialen Anfangstemperaturen.....	74
Tab. 3.14: Berechnung der Entzugsleistung für den Absorberkreis 1 in der Heizperiode 2005/06	94
Tab. 3.15: Berechnung der Entzugsleistung für den Absorberkreis 2 in der Heizperiode 2005/06	94
Tab. 4.1: Aufzählung relevanter Normen, Richtlinien sowie Regelwerke zur Bemessung von Bohrpfählen.....	106
Tab. 4.2: Wesentliche Parameter des Bohrpfahls im LT24, Block 7	107
Tab. 4.3: Tabelle Schichtaufbau gemäß Statik Pauser [56].....	107
Tab. 4.4: Horizontaler Bettungsmodul [56]	107
Tab. 4.5: Einwirkungen Bohrpfahl [56]	108
Tab. 4.6: Tragfähigkeit Bohrpfahl [56]	108
Tab. 4.7: Expositionsclassen nach ÖNORM EN 206-1 bzw. ÖNORM EN 1992-1-1 [57, 58],.....	111
Tab. 4.8: Parameter zur Bemessung der Betondeckung [58]	111
Tab. 4.9: Parameter zur Bemessung von c_{min} [58]	112
Tab. 4.10: Parameter zur Bemessung von w_k [58].....	112
Tab. 4.11: Parameter zur Bemessung von $s_{r,max}$ [58]	113
Tab. 4.12: Parameter zur Bemessung des effektiven Bewehrungsgrades [58, 61]	113
Tab. 4.13: Parameter zur Bemessung von k_c [58]	114
Tab. 4.14: Parameter zur Bemessung der Fläche der Betonzugzone [61].....	115
Tab. 4.15: Übersicht zu den wesentlichen Materialparametern von C30/37 [58]	115
Tab. 4.16: Übersicht zu den wesentlichen Stahlparametern [62, 63]	116

Tab. 4.17: Teilsicherheitsbeiwerte [58]	116
Tab. 4.18: Parameter zur Bemessung der Mindesteinbindelänge.....	117
Tab. 4.19: Parameter zur Bemessung der Längsbewehrung [58, 64].....	118
Tab. 4.20: Parameter zur Ermittlung der erforderliche Bewehrungsfläche der Längsbewehrung	119
Tab. 4.21: Mindestlängsbewehrung nach ÖNORM EN 1536 [59].....	119
Tab. 4.22: Parameter zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit ohne zusätzliche Schubbewehrung [58, 64]	120
Tab. 4.23: Parameter zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit mit Schubbewehrung [58].....	121
Tab. 4.24: Parameter zur Bemessung der Verankerungslänge [58]	122
Tab. 4.25: Zusammenhang zwischen Größtkorn der Gesteinskörnung, Pfahldurchmesser und lichem Mindestabstand der Bewehrungsstäbe [59, 67]	122
Tab. 4.26: Übersicht der Parameter, in die eine geothermische Nutzung eingehen könnte	125
Tab. 4.27: Tabelle der Kombinationsbeiwerte [69]	128
Tab. 4.28: Anzahl der empfohlenen U-Schlaufen, abhängig vom Durchmesser nach dem französischen Regelwerk [69]	129
Tab. 4.29: Minimaler Längsbewehrungsgehalt nach Rotta Loria [70]	130