

# Mitteltiefe Erdwärmesonde HEUBACH:



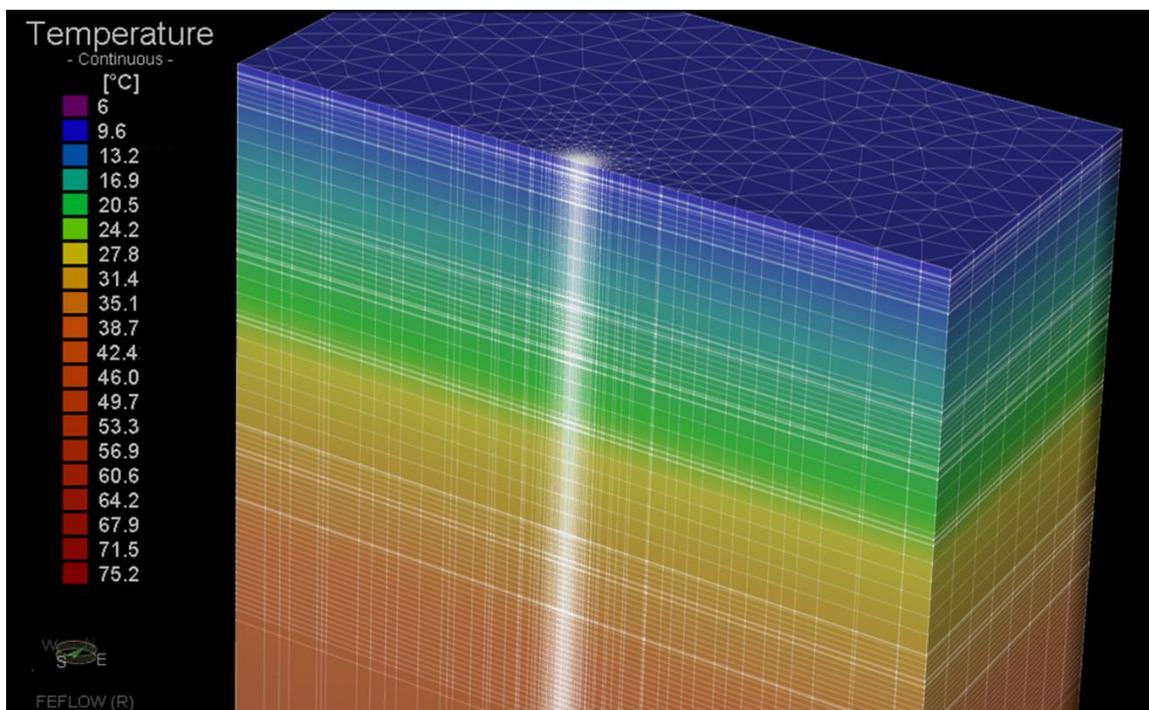
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Thermische Modellierung der  
Untergrundverhältnisse im laufenden Betrieb

Masterarbeit von

Sarah Steiner, Matr.-Nr.: 2018595

Institut für Angewandte Geowissenschaften  
Darmstadt, Dezember 2014



---

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Sarah Steiner (Matrikel-Nr. 2018595), dass ich die vorliegende Masterarbeit

"Mitteltiefe Erdwärmesonde HEUBACH:  
Thermische Modellierung der  
Untergrundverhältnisse im laufenden Betrieb"

ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und nicht veröffentlicht.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift

Erstberichterstatter/in: Prof. Dr. Ingo Sass

Zweitberichterstatter/in: Dr.-Ing. Zijad Lemeš

---

---

## Abstract

As part of the research project “medium-deep borehole heat exchanger Heubach” a 773 m deep coaxial borehole heat exchanger and eight near-surface double U-shape borehole heat exchangers, with a total length of about 900 m, were installed in Heubach (Hesse). At the end of 2012 the initial operation of the geothermal system, which is providing thermal energy for heating and cooling to a medium sized enterprise, took place. Since then the operating mode has been recorded by measurements with high temporal resolution, which allow a model validation in respect to the actual behavior of operation.

The present thesis deals with the thermal modeling of the medium-deep borehole heat exchanger. A geothermal gradient of 3.26 °C/100 m could be verified by comparing the simulation results with the recorded operating data. Furthermore an average thermal conductivity of 3 W/(m·K) and a volumetric heat capacity of 2.3 MJ/(m<sup>3</sup>·K) resulted from the validation. The chosen parameters are based on literature values, results of a geothermal response test and calorimetric measurements of the specific heat capacity, which were taken as a part of the present work. The evaluation of the measured operating performance showed a demand-driven load curve and thus short-term changes of load were generated in some cases. The circulation of the heat transfer fluid is also transient because of a simultaneous operation of the circulation pump and the heat pump. In a numerical modeling of such conditions with *FEFLOW* the best results could be achieved by using the numerical approach from AL KHOURY ET AL. (2005 & 2006). A main disadvantage of this method are long lasting computing times. Hence a simulation of long-term observation periods is inefficient. Therefore a method of data processing was developed, which allows the use of the analytical solution based on the approach of ESKILSON & CLAEISSON (1988). Based on that, different forecast models could be calculated in an adequate period of time. The forecast models covered the assumptions of climatic conditions (warm / cold winter) and different operational scenarios (heat extraction due to permanent-operation periods / heat storage in summer). Additionally several simulations were created to quantify the forecast uncertainty due to a variation of the subsurface-parameters. A variability of the volumetric heat capacity showed minor influences on the model results. A significant impact, however, could be determined for a deviance of the thermal conductivity and the geothermal gradient. The modeling of forecast uncertainty is based on a state of knowledge before any drilling activities took place. Therefore the results of the geothermal response test were not taken into consideration. With respect to the load curve the models are thus based on the expected operation. A comparison with the forecast model has shown that an irregular extraction or divergent peak loads could cause significant influences on the temperatures of the heat transfer fluid. Hence, the match of the supposed to the actual operating mode is also an important aspect for accurate dimensioning of geothermal plants. Additional simulations for determining forecast uncertainties could be a useful tool to estimate the reliability of the model results.

---

## Zusammenfassung

Ende 2012 wurde in Heubach (Groß-Umstadt, Hessen) zur Wärme- und Kälteversorgung eines mittelständischen Unternehmens eine mitteltiefe Erdwärmesonde und ein oberflächennahes Erdwärmesondenfeld, bestehend aus acht Doppel-U-Sonden, in Betrieb genommen. Seither erfolgt eine zeitlich hoch aufgelöste Betriebsdatenerfassung der Anlage. Dadurch bietet sich die Möglichkeit der Modellvalidierung am realen Betriebsfall.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der thermischen Modellierung der 773 m tiefen Koaxialsonde. Durch einen Abgleich des dokumentierten Betriebs mit den Simulationsergebnissen konnte ein geothermischer Gradient von  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  verifiziert werden. Bezogen auf die mitteltiefe Erdwärmesonde ergab sich aus der Modellvalidierung zudem eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von  $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  sowie eine durchschnittliche volumetrischen Wärmekapazität von  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ . Die Parameterkonstellationen für die Modellvalidierung basierten, neben Literaturwerten und den Ergebnissen aus einem Geothermal Response Test, auch auf im Zuge der vorliegenden Arbeit durchgeführten kalorimetrischen Messungen zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität. Die Auswertung des dokumentierten Betriebsverhaltens hat einen Lastgang mit bedarfsorientierten und dadurch zum Teil sehr kurzfristigen Lastwechseln ergeben. Die Betriebsphasen der Umwälzpumpe sind dabei an jene der Wärmepumpe gebunden, sodass kein konstanter Durchfluss vorherrscht. Eine geeignete Modellierung solcher Verhältnisse mit *FEFLOW* basiert auf dem Lösungsansatzes von AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006). Wegen des hohen Rechenaufwands sind Langzeitbetrachtungen mit dieser Methode in der Praxis aber kaum durchführbar. Durch die Entwicklung der *Zyklen-Methode* zur Datenaufbereitung konnten Lastkurven und Durchflussraten generiert werden, die für eine Berechnung nach dem schnelleren Lösungsansatz von ESKILSON & CLAEISSON (1988) geeignet sind und dabei trotzdem gute Korrelationen zu den Eingangsdaten (Messwerten) erreichten. Darauf aufbauend wurden Prognosemodellierungen unter Annahme verschiedener klimatischer Voraussetzungen (kalter / milder Winter) erstellt. Zudem sind abweichende Betriebsszenarien (Belastung durch Dauerentzugsphasen / Wärmeeinspeisung im Sommer) simuliert worden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Fallbeispiel der mitteltiefen Erdwärmesonde in Heubach außerdem eine Betrachtung zur Prognoseunsicherheit durchgeführt. Während die Simulationen für die Unsicherheitsbetrachtung auf auf einem Kenntnisstands zum Zeitpunkt der Auslegung der mitteltiefen Erdwärmesonde basieren, sind die Prognosemodellierungen unter Berücksichtigung des realen Betriebsverhaltens erstellt worden. Ziel der Betrachtung zur Prognoseunsicherheit war es Ungenauigkeiten, die aufgrund von abweichenden Betriebs- und Untergrundparametern entstehen, zu quantifizieren. Für die Variation der volumetrischen Wärmekapazität ergab sich ein geringer Einfluss auf das Modellergebnis. Bedeutende Auswirkungen konnten hingegen für eine Abweichung der Wärmeleitfähigkeit und des geothermischen Gradienten

---

ermittelt werden. Außerdem sind nicht unerhebliche Einflüsse aufgrund von variierenden Lastgängen beobachtet worden. Ein durch die Lastkurve bestimmtes unregelmäßiges Entzugsverhalten mit längeren Dauerentzugsphasen oder höheren Spitzenleistungen kann, bei gleicher entzogenen Wärmemenge über den Betrachtungszeitraum, zu deutlich niedrigeren Temperaturen des Wärmeträgermittels führen. Die richtige Auslegung einer geothermischen Anlage ist demnach auch davon abhängig wie gut die für die Modellierung angenommene und die spätere tatsächliche Betriebsführung übereinstimmen. Für Prognosemodellierungen könnte die Unsicherheitsbetrachtung ein zusätzliches Werkzeug darstellen, um in der Planungsphase einer Geothermieanlage die Zuverlässigkeit einer Auslegung bewerten und mögliche Abweichungen vom Bemessungsfall aufzeigen zu können. Im Zuge der Bohrarbeiten wird der Untergrund nach und nach erschlossen. Eine Betrachtung zur Prognoseunsicherheit bietet auch die Möglichkeit auf den dadurch zunehmenden Wissensstand im Laufe der Projektdurchführung kurzfristig zu reagieren.

---

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ingo Sass für die Betreuung und die Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit bedanken.

Ebenso bedanke ich mich vielmals bei Herrn Dr.-Ing. Zijad Lemeš für die Übernahme der Zweitbetreuung, die eine Ausarbeitung der Aufgabenstellung in dieser Form überhaupt erst ermöglicht hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Bastian Welsch für die zahlreichen Diskussionen, die vielen kompetenten Ratschläge, sowie für die geduldige und hilfsbereite Begleitung dieser Arbeit.

Bei Herrn Dr. Wolfram Rühaak möchte ich mich ebenfalls herzlich für die stets bereitwillig erteilten Auskünfte und Hilfestellungen, insbesondere bei den erstellten Modellierungen bedanken.

Bei Herrn Dr. Kristian Bär bedanke ich mich für die wertvollen Hinweise und die stete Unterstützung.

Herrn Dr. Sebastian Homuth gebührt mein Dank für die fachkundige und hilfsbereite Unterstützung bei den Wärmekapazitätsmessungen mit dem Kalorimeter, sowie bei vielen anderen im Rahmen der Ausarbeitung des Themas aufgetauchten Fragestellungen.

Für die Bereitstellung des Datensatzes des *Geothermal Response Tests*, sowie für die interessanten Diskussionen möchte ich mich außerdem vielmals bei Herrn Dipl.-Geol. Clemens Lehr bedanken.

Bei meinen Kollegen Herrn Markus Schedel, Herrn Benjamin Schmitz, und Frau Elisabeth Diehl möchte ich mich herzlich für das rasche Korrekturlesen der Arbeit und die angenehme Atmosphäre in und abseits der Universität bedanken.

Ganz besonders bedanke ich mich auch bei meinem Mann Herrn Mag. Richard Steiner, der mich während der gesamten Zeit mit Geduld, hilfreichen Hinweisen und tatkräftiger Unterstützung begleitet hat. Zudem gilt meiner Familie für die wundervolle Unterstützung in allen Lebenslagen ein herzlicher Dank.

---

# Inhalt

Abstract .....	I
Zusammenfassung .....	II
Danksagung.....	IV
Inhalt.....	V
Nomenklatur .....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	XV
1 Einleitung .....	1
1.1. Motivation .....	1
1.2. Geologie von Heubach .....	2
2 Stand des Wissens.....	5
2.1. Thermische Modellierung von Erdwärmesonden .....	5
2.2. Geothermische Nutzung der mitteltiefen Erdwärmesonde.....	11
2.2.1. Betriebserfahrungen mit der mitteltiefen Erdwärmesonde .....	12
3 Methodik .....	17
3.1. Wärmekapazität.....	17
3.2. Modellerstellung und Eingangsparameter .....	20
3.2.1. Validierung der Untergrundparameter .....	22
3.2.2. Anpassung der EWS-Betriebsparameter für Langzeitbetrachtungen.....	25
3.2.2.1. Mittelwert-Methode.....	26
3.2.2.2. Zyklen-Methode .....	27
3.2.3. Modellerstellung für die Unsicherheitsbetrachtungen .....	28
4 Ergebnisse .....	34
4.1. Wärmekapazitätsmessungen.....	34
4.1.1. Spezifische Wärmekapazität .....	34
4.1.2. Volumetrische Wärmekapazität.....	35
4.2. Numerische Simulationen .....	36
4.2.1. Modellvalidierung am realen Betriebsfall .....	36
4.2.1.1. Kalibrierung an den Messwerten des <i>Geothermal Response Tests</i> (GRT).....	37
4.2.1.2. Modellvalidierung an den Betriebsdaten.....	39

---

4.2.2.	Validierung der Aufbereitungsmethoden für Lastgänge zur Langzeitbetrachtung .....	43
4.2.2.1.	Mittelwert-Methode.....	44
4.2.2.2.	Zyklen-Methode .....	49
4.2.2.3.	Vergleich der Methoden zur Eingangsdatenaufbereitung .....	52
4.2.3.	Betrachtungen zur Prognoseunsicherheit.....	55
4.2.3.1.	Wärmeleitfähigkeit.....	55
4.2.3.2.	Volumetrische Wärmekapazität.....	58
4.2.3.3.	Gekoppelter Einfluss von Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität .....	59
4.2.3.4.	Geothermischer Gradient.....	61
4.2.3.5.	Lastgang .....	63
4.2.3.6.	Vergleich der Einflussstärken der Parameter .....	65
4.2.4.	Prognosemodellierung und modifizierte Betriebsszenarien .....	66
5	Diskussion.....	73
5.1.	Interpretation der Modellergebnisse.....	73
5.1.1.	Modelle zur Validierung der Untergrundparameter .....	73
5.1.2.	Simulationen zur Langzeitbetrachtung .....	73
5.2.	Regenerationsverhalten des Untergrunds während inaktiver Betriebsphasen.....	78
5.3.	Einschränkungen singularer Prognose-Modelle .....	84
5.4.	Übertragbarkeit des Modells .....	85
5.5.	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	87
6	Schlussfolgerung und Ausblick.....	94
7	Literaturverzeichnis .....	96
8	Anhang.....	102

---

## Nomenklatur

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
GOK	Geländeoberkante
Gfk	Glasfaser-verstärkter-Kunststoff
GRT	Geothermal Response Test
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
HMUELV	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucher-schutz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
$A$	Fläche [m <sup>2</sup> ]
$Q$	Wärmestrom [W]
$T$	Temperatur [°C]
$\partial T$	Temperaturdifferenz [K]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz des Wärmeträgerfluids [K]
$\partial x$	Radiale Distanz zur Erdwärmesonde [m]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
$\rho$	Dichte [kg/ m <sup>3</sup> ]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]
$c_v$	volumetrische Wärmekapazität [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]
$q$	Durchflussrate (Volumenstrom) [m <sup>3</sup> /s]
$q_r$	Wärmestrom in der Referenzkammer des Kalorimeters
$q_p$	Wärmestrom in der Probenkammer des Kalorimeters
$q$	Durchflusses (Volumenstrom) [m <sup>3</sup> /s]
$P_{th}$	thermische Leistung [W]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz [K]
$b_{ig}$	Kehrwert des Übergangswiderstands zwischen Einlassrohr und Hinterfüllmaterial (U-Sonde) [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$b_{og}$	Kehrwert des Übergangswiderstands zwischen Auslassrohr und Hinterfüllmaterial (U-Sonde) [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
[a,b]	Teilintervall bei Rechteckverfahren
$\xi$	Mittelwert der Funktionswerte im Intervall [a,b]
$n$	Anzahl der Intervalle
$\nabla$	Nabla-Operator

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links oben: Die stark vereinfachte Karte zeigt einen Ausschnitt der mitteleuropäischen Varisziden, in deren Großheit, dem Saxothuringikum (Saxothuringian Zone), auch der Odenwald liegt. GHN Giessen-Harz Decke; MGCR Mitteldeutschen Kristallinschwelle; NPZ Nördliche Phyllitzone; B Barrandium; S Spessart; VOG Vogesen; SW Schwarzwald (aus ALTHERR ET AL. 1999). Links unten: Kristalliner Odenwald mit seinen strukturellen Haupteinheiten, dem Bergsträßer Odenwald, der Otzberg Zone und dem Böllsteiner Odenwald (verändert nach STEIN 2001). Rechts: Vereinfachte geologische Karte des Böllsteiner Odenwald (verändert nach ALTENBERGER & BESCH 1993; ALTHERR ET AL. 1999 und REISCHMANN ET AL. 2001).....	3
Abbildung 2: Schematische Übersicht über den Aufbau des Programms EWS. Der Untergrund wird für die Modellierung in die Bereiche Sole, Sondennahbereich und Sondenfernbereich unterteilt (SIGNORELLI & KOHL 2002).....	5
Abbildung 3: Kontrollvolumen einer Doppel-U-Sonde (Wärmetauscher) (AL-KHOURY & BONNIER 2006) .....	8
Abbildung 4: Horizontaler Querschnitt einer 1U-Sonde und das zugehörige Widerstandsmodell (aus BAUER 2011, nach ESKILSON & CLAESSON 1988) .....	8
Abbildung 5: Horizontale Querschnitte und die zugehörigen zweidimensionalen WKM für eine a) Doppel-U-Sonde b) 1U-Sonde und c) Koaxialsonde. Mit: $T_i$ : Fluidtemperatur; $T_{gi}$ : Temperatur des Füllmaterials; $T_b$ : Temperatur der Bohrlochwand; $C_g$ : Thermische Kapazität; $R$ : Thermischer Widerstand (aus DIERSCH ET AL. 2011 <sub>A</sub> ).....	9
Abbildung 6: Einbinden des 1D Linienelements in das 3D Finite-Element-Netz des Untergrunds (BAUER 2011).....	10
Abbildung 7: Vereinfachtes Hydraulikschema der Erdwärmeanlage in Heubach (verändert nach LEMÉŠ 2013).....	11
Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung des Geothermie-Projekts in Heubach.....	12
Abbildung 9: Monatlich entzogene Wärmemenge (hellgrüne Balken) und kumulierte Wärmemenge (dunkelgrüne Linie) der mitteltiefen EWS in Heubach.....	13
Abbildung 10: Vergleich der mittleren Monatstemperaturen der Jahre 2010 bis 2014. Die Monatstemperaturen des Betrachtungszeitraums April 2013 bis März 2014 sind insgesamt höher als jene im Jahr 2010. Die Bemessung der EWS erfolgte anhand der klimatischen Verhältnisse von 2010 (HSE 2011). Die Temperaturmesswerte stammen von der circa 18 km von Heubach entfernten Wetterstation Michelstadt-Vielbrunn (verändert, nach WETTER ONLINE 2014).....	14

---

Abbildung 11: Gemessener Lastgang sowie die dazugehörigen Durchflussraten der mitteltiefen EWS am 11. Februar 2013. Durch die bedarfsorientierten, unterschiedlich langen Entzugsphasen entsteht ein unregelmäßiger, zum Teil sehr kurzfristiger Lastwechsel. Die roten Markierungen kennzeichnen an einigen Entzugsphasen das zeitversetzte Ein- und Ausschalten von Umwälz- (UP) und Wärmepumpe (WP), wodurch beim Aktivieren der Wärmepumpe bereits ein aktiver Durchfluss vorherrscht.....	15
Abbildung 12: Die grauen Balken stellen den täglichen Mittelwert der Fluidtemperaturen bei aktiver EWS dar. Das Fehlen einer Säule bedeutet, dass an diesem Tag die EWS nicht in Betrieb war. ....	16
Abbildung 13: Übersicht der mittleren monatlichen Fluidtemperaturen und des Verlaufs der Außentemperatur in Heubach. Die grünen Balken stellen die reine Betriebszeit der EWS dar. ....	16
Abbildung 14: Aufbau des C80-Kalorimeters. Die ringförmig angeordneten 3D Sensoren umschließen die luftgefüllte Referenzkammer und die Probenkammer (verändert, nach Datenblatt C80, 2014).....	17
Abbildung 15 : Extrapolation der spez. Wärmekapazität auf 25 °C durch zwei lineare Ausgleichsgeraden und eine polynomische Regressionsgerade 2. Grades .....	19
Abbildung 16: Übersicht zur Modellentwicklung .....	20
Abbildung 17: Aufbau des Grundmodells. Der angelegte Temperaturgradient von 3,26 °C/100 m hat sich im Zuge der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Validierung der Untergrundparameter bestätigt. ....	21
Abbildung 18: Aufbau des Mehrschichtmodells: Tiefenverteilung der Wärmeleitfähigkeiten (links) und der volumetrischen Wärmekapazität (rechts).....	24
Abbildung 19: Die zwei wesentlichen Schritte der Eingangsdatenaufbereitung nach der Mittelwert-Methode. Links: Die Bildung des Mittelwertes von zwei aufeinander folgenden Datenpunkten erzeugt eine geglättete Zeitreihe der thermischen Leistung (orange Kurve). Rechts: Der nach der Mittelwert-Methode generierte Lastgang (dunkelgrüne Kurve) ergibt sich aus der Rechteckfunktion mit 1-Stunden-Intervallen.....	26
Abbildung 20: Prinzip der Datenaufbereitung nach der Zyklen-Methode. Die Peaks der grauen Kurve stellen die einzelnen Entzugsphasen der mitteltiefen EWS in Heubach dar. Um einen gleichmäßigeren Lastgang zu erhalten, wurden alle Entzugsphasen innerhalb von acht Stunden direkt hintereinander geschaltet (lila Kurve). Die zu entziehende thermische Leistung ergibt sich aus dem Mittelwert der einzelnen Entzugsphasen innerhalb eines Zyklus. ....	27
Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der in WELSCH (2012) gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine des Böllsteiner Odenwaldes sowie der dazugehörige Graph der Normalverteilung. ....	30

---

---

Abbildung 22: Häufigkeit je Klasse der Ergebnisse aus den Kalorimetermessungen und der in WELSCH (2012) berechneten volumetrischen Wärmekapazitäten. ....	30
Abbildung 23: Erstellung der Lastgänge für die Unsicherheitsbetrachtung. Um eine geringere entzogene Wärmemenge pro Jahr zu erreichen wurde an aktiven Zyklen die EWS um 1,2 beziehungsweise 3 Stunden früher ausgeschaltet. Für die Lastkurve, aus der sich eine höhere resultierende Entzugsmenge ergeben soll, wurde die Laufzeit der EWS um eine Stunde je Zyklus verlängert. ....	32
Abbildung 24: Vergleich der spez. Wärmekapazitäten (bei 25 °C), die durch unterschiedliche Extrapolationen ermittelt wurden. Im Temperaturbereich 48 °C bis 185 °C erfolgte die Extrapolation anhand einer linearen und einer polynomische Ausgleichsgerade. Im Bereich 40 °C bis 55 °C wurde die spez. Wärmekapazität durch die Extrapolation einer linearen Ausgleichsgerade ermittelt.....	34
Abbildung 25: Vergleich der spezifischen und volumetrischen Wärmekapazität für eine Temperatur von 25 °C. ....	35
Abbildung 26: Dargestellt ist die Kalibrierung der Untergrundparameter am Einschichtmodell MV.GRT.01 anhand der GRT-Messwerte. Die simulierten und gemessenen Einlasstemperaturen sind identisch, da sie dem Modell als Randbedingung für die EWS vorgegeben wurden. Die simulierten Auslasstemperaturen (grüne Kurve) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Fluidtemperaturen (schwarze Kurve).....	38
Abbildung 27: Ergebnis des Mehrschichtmodells MV.GRT.02. Als Randbedingung für den Betrieb wurde die Zeitreihe der gemessenen Einlasstemperatur eingelesen. ....	39
Abbildung 28: Typischer Verlauf der gemessenen Einlass (Vorlauf)- und Auslasstemperaturen (Rücklauf) der EWS in Heubach am Beispiel dreier Entzugsphasen. Das zeitversetzte Einschalten von Umwälzpumpe und Wärmepumpe bewirkt einen zeitlich verschobenen Verlauf der simulierten Auslasstemperatur zu den Messwerten. ....	40
Abbildung 29: Dargestellt ist das Ergebnis des Szenarios MV.11. Durch ein Angleichen der Durchflussrate an die Betriebszeiten der Wärmepumpe konnte der Versatz zwischen simulierten und gemessenen Auslasstemperaturen vermieden werden.....	41
Abbildung 30: Vergleich der verschiedenen simulierten mittleren Fluidtemperaturen. Mit: WP: Wärmepumpe; UP: Umwälzpumpe.....	42
Abbildung 31: Ergebnisse aus Modell MM.01.1h-Q: Der verwendete Lastgang und die Durchflussrate wurden anhand der Mittelwert-Methode modifiziert. Bei einem Stillstand der EWS gleichen sich die Einlass und Auslasstemperaturen an und sinken sukzessive auf die vorherrschende Oberflächentemperatur (10 °C) ab.....	45

---

---

Abbildung 32: Ergebnisse aus Modell MM.03.1h-Q.konstant: Der verwendete Lastgang wurde anhand der Mittelwert-Methode modifiziert. Die Durchflussrate betrug konstant 5 l/s. Bei einem Stillstand der EWS gleichen sich die Einlass- und Auslasstemperaturen an und steigen langsam an. Die, im Rahmen des GRTs bestimmte, ungestörte mittlere Temperatur des zirkulierenden Fluids liegt bei etwa 24 °C.....	45
Abbildung 33: Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen zwischen einer Simulation mit konstantem Durchfluss (5 l/s) und einem Modell mit einer nach der Mittelwert-Methode modifizierten Durchflussrate. Beiden Szenarien wurde als Randbedingung ein nach der Mittelwert-Methode in 1-Stunden-Intervallen aufbereiteter Lastgang eingelesen. ....	46
Abbildung 34: Monatliche mittlere Fluidtemperaturen der Szenarien mit konstantem Durchfluss (grüne Balken) und variablem Durchfluss (orange Balken) im Vergleich zu den aus den Messwerten ermittelten mittleren Fluidtemperaturen (graue Balken). Beiden Modellen liegt ein nach der Mittelwert-Methode aufbereiteter Lastgang zugrunde. ....	47
Abbildung 35: Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen zwischen Simulationen mit konstantem Durchfluss (5 l/s) und einer nach der Mittelwert-Methode modifizierten Durchflussrate. Beiden Szenarien liegt als Randbedingung ein nach der Mittelwert-Methode in 8-Stunden-Intervallen aufbereiteter Lastgang zugrunde. ....	48
Abbildung 36: Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der Simulationen mit variablem und konstantem Durchfluss. Die Lastgänge wurden nach der Mittelwert-Methode in 8-Stunden-Intervallen aufbereitet. ....	49
Abbildung 37: Ergebnisse aus Modell ZM.01.Q: Dargestellt sind die Einlass- und Auslasstemperaturen des Wärmeträgermittels über die Zeit. Die Fluidtemperaturen gleichen sich während des Stillstands der EWS an und nähern sich langsam dem Temperaturniveau der Oberfläche (10 °C) an. ....	50
Abbildung 38: Ergebnisse aus Modell ZM.02.Q-konstant: Abgebildet sind die resultierenden Temperaturverläufe des Sondenfluids bei einem konstantem Durchfluss von 5 l/s. ....	50
Abbildung 39: Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen: Das Modell mit variablem, nach der Zyklen-Methode aufbereiteten Durchfluss zeigt eine bessere Übereinstimmungen mit den Messwerten als die Simulation mit einer konstanten Durchflussrate. ....	51
Abbildung 40: Vergleich der mittleren monatlichen Fluidtemperaturen der Modelle mit aufbereitetem Durchfluss und mit konstanter Durchflussrate zu den aus den Messwerten berechneten mittleren Fluidtemperaturen. ....	52
Abbildung 41: Übersicht der jährlichen mittleren Fluidtemperaturen aller Modelle zur Methodvalidierung. ....	53

---

---

Abbildung 42: Übersicht der simulierten Entzugsmengen der Mittelwert-Methode und der Zyklen-Methode im Vergleich zu gemessenen Wärmemengen. ....	53
Abbildung 43: Gegenüberstellung der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen. Das Modell nach der Mittelwert-Methode (orange Balken) weist insgesamt eine schlechtere Übereinstimmung mit den Messwerten auf als die auf der Zyklen-Methode basierende Simulation (lila Balken).....	54
Abbildung 44: Verlauf der mittleren täglichen Fluidtemperaturen im ersten Betrachtungsjahr. Modellzuordnung: MU.1: 1,73 W/(m·K); MU.2: 2,08 W/(m·K); MU.3: 2,43 W/(m·K) (Mittelwert-Modell); MU.4: 2,77 W/(m·K); MU.5: 3,12 W/(m·K) .....	55
Abbildung 45: Abweichungen (Differenzen) der mittleren Fluidtemperaturen vom Mittelwert-Modell MU.3 im ersten Betriebsjahr. ....	56
Abbildung 46: Die Abbildung zeigt die monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der verschiedenen Modelle im ersten und im vierten Betriebsjahr. ....	57
Abbildung 47: Abweichungen der mittleren Fluidtemperaturen relativ zum Mittelwert-Modell im ersten Betriebsjahr. Modellzuordnung: MU.6: 1,70 MJ/(m <sup>3</sup> ·K); MU.7: 1,86 MJ/(m <sup>3</sup> ·K); MU.8: 2,20 MJ/(m <sup>3</sup> ·K); MU.9: 2,36 MJ/(m <sup>3</sup> ·K).....	58
Abbildung 48: Übersicht der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen aller Modelle zur Untersuchung des Einflusses durch die vol. Wärmekapazität im ersten und vierten Betriebsjahr. ....	59
Abbildung 49: Verlauf der täglichen mittleren Fluidtemperaturen der kombinierten Variation von Wärmeleitfähigkeit und vol. Wärmeleitfähigkeit.....	60
Abbildung 50: Differenz der mittleren Fluidtemperaturen relativ zum Mittelwert-Modell (MU.3). Modellzuordnung: MU.10: 1,73 W/(m·K) und 1,70 MJ/(m <sup>3</sup> ·K); MU.11: 2,08 W/(m·K) und 1,86 MJ/(m <sup>3</sup> ·K); MU.12: 2,77 W/(m·K) und 2,20 MJ/(m <sup>3</sup> ·K); MU.13: 3,12 W/(m·K) und 2,36 MJ/(m <sup>3</sup> ·K).....	61
Abbildung 51: Dargestellt ist der Verlauf der täglichen mittleren Fluidtemperaturen im ersten Betriebsjahr. Modellzuordnung: MU.14: 2,5 °C/100 m; MU.15: 2,75 °C/100 m; MU.16: 3 °C/100 m; MU.17: 3,25 °C/100 m; MU.18: 3,5 °C/100 m .....	62
Abbildung 52: Abweichung der aus einer Variation des geothermischen Gradienten resultierenden mittleren Fluidtemperaturen im ersten Betriebsjahr, gemessen am Mittelwert-Modell. ....	62
Abbildung 53: Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen im ersten (links) und im vierten (rechts) Betriebsjahr. ....	63
Abbildung 54: Temperaturdifferenzen der verschiedenen Modelle zur Bestimmung der Prognoseunsicherheit bezogen auf das Mittelwert-Modell (MU.3). Modellzuordnung: MU.3: 121 MWh/a (Mittelwert-Modell, entspricht der Nulllinie) MU.19: 96 MWh/a; MU.20: 73 MWh/a; MU.21: 55 MWh/a; MU.22: 143 MWh/a .....	64

---

---

Abbildung 55: Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der Modelle zur Variation des Lastgangs im ersten und vierten Jahr. ....	64
Abbildung 56: Einfluss der verschiedenen Parameter auf die mittlere Fluidtemperatur. ....	65
Abbildung 57: Übersicht der monatlichen, über den gesamten Betrachtungszeitraum von 15 Jahren gemittelten, Fluidtemperaturen. ....	66
Abbildung 58: Dargestellt ist die Abnahme der monatlichen mittleren Fluidtemperatur über die Zeit. .	67
Abbildung 59: Übersicht der Prognosemodelle mit regelmäßigem Lastgang (PM.01, kalter Winter), auf Grundlage der gemessenen Leistungskurve (PM.02, warmer Winter), sowie mit einem unregelmäßigen Lastgang (PM.03, kalter Winter). ....	68
Abbildung 60: Vergleich der Verläufe der täglichen mittleren Fluidtemperaturen eines kalten (blaue Kurve, PM.01) und warmen Winters (orange Kurve, PM.02) im 15. Betriebsjahr. Die grüne Kurve ist das Ergebnis aus einem unregelmäßigen Entzugsverhalten (PM.03). Lücken des Temperaturverlaufs stellen Stillstandzeiten der EWS dar. ....	69
Abbildung 61: Abgebildet ist der zu erwartende Temperaturbereich (graue Fläche) nach 15 Jahren Betrieb. Die grün dargestellten monatlichen mittleren Fluidtemperaturen entsprechen durch Dauerbetrieb hervorgerufenen Extremwerten. ....	70
Abbildung 62: Gegenüberstellung der monatlichen Mittelwerte der Fluidtemperaturen des Modells ohne (PM.01) und mit Einspeisung (PM.04). Zur Berechnung der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen wurde der gesamte Betrachtungszeitraum von 15 Jahren herangezogen. ....	71
Abbildung 63: Übersicht des Abkühlungsverhaltens in Folge verschiedener Betriebsszenarien. Betrachtet werden die mittleren Fluidtemperaturen von November bis März der jeweiligen Heizperiode. ....	71
Abbildung 64: Schematische Darstellung des konduktivem Wärmetransports nach Fourier (verändert, nach GRATZ, 2006). ....	74
Abbildung 65: Vergleich des Lastgangs für das Prognosemodell PM.03 mit dem Lastgang <sub>(Prognose2010)</sub> . ....	76
Abbildung 66: Vergleich des Lastgangs für das Prognosemodell PM.01 mit dem Lastgang <sub>(Prognose2010)</sub> . ....	77
Abbildung 67: links: Temperaturverteilung während des simulierten Wärmeentzugs am kalibrierten Grundmodell für die mitteltiefe EWS in Heubach. Rechts: Beispiel einer dynamischen Temperaturabsenkung durch den Betrieb einer untiefen EWS (verändert nach RYBACH & EUGSTER 2002). ....	79

---

---

Abbildung 68: Berechnete Isolinien einer 105 m tiefen EWS. Der Wärmestrom in unmittelbarer Nähe der EWS liegt bei etwa 3 W/m <sup>2</sup> . (nach Messungen und Berechnungen für die Anlage Elgg/Schweiz, RYBACH & EUGSTER 2002) .....	80
Abbildung 69: Simuliertes Temperaturverhalten bei Entzug und Regeneration des zur EWS angrenzenden Gesteins in verschiedenen Tiefen. ....	81
Abbildung 70: Änderung der mittleren jährlichen Fluidtemperatur der verschiedenen Prognosemodelle für die mitteltiefe EWS in Heubach .....	82
Abbildung 71: Simulierte Temperaturänderung in 50 m Tiefe und einem Meter Entfernung von der EWS für eine einzelne EWS und ein EWS Feld. Der Temperaturverlauf des EWS Feldes bezieht sich auf die zentrale EWS (verändert nach SIGNORELLI ET AL. 2005) .....	83
Abbildung 72: Potentiell für Wärmespeicherung geeignete Kristallingesteine (HORNICH 2014).....	86
Abbildung 73: Zusammenstellung der Investitionskosten zur geothermischen Strom- und Wärmenutzung (Quelle: GARMS, 2014).....	88
Abbildung 74: Kosten je Bohrtiefenmeter (Quellen: KRUCK ET AL. 2009; VIKERSONN 2014, BMU 2007; WOLFGRAMM ET AL. 2005; pers. Kommentar HOMUTH, 2014; JEROMIN & BIRKNER 2014 ). .....	89
Abbildung 75: Vergleich der Wärmegestehungskosten von Wärmepumpensystemen mit konventionellen Heizsystemen (verändert, nach SIMADER, 2013) .....	91
Abbildung 76: Parametervariation zum Einfluss der Wärmegestehungskosten aus tiefen EWS (KRUCK ET AL. 2009) .....	92
Abbildung 77: Parametervariation Wärmegestehungskosten aus oberflächennahen Erdwärmesonden (KRUCK ET AL. 2009).....	93
Abbildung 78: Stark vereinfachtes Bohrprofil der der mitteltiefen Erdwärmesonde in Heubach (aus: HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2012) .....	102
Abbildung 79: Schichtverzeichnis der Tiefenbohrung in Heubach (Groß-Umstadt) (aus: HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2013) .....	103
Abbildung 80: Dargestellt sind die entzogenen Wärmemengen im Monat sowie die kumulierte Wärmemengen der mitteltiefen EWS und des oberflächennahen Erdwärmesondenfelds im Vergleich. Die hellgrünen Balken und der dunkelgrüne Graph zeigen die monatlichen und die kumulierte Wärmemenge der mitteltiefen Erdwärmesonde. Die Entzugsmenge der acht oberflächennahen Erdwärmesonden ist anhand der gelben und blauen Balken dargestellt. Die blauen Balken repräsentieren dabei die Kühlung. ....	104

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameterkonfiguration der Simulationen zur Modellvalidierung. In allen Modellen wurden als Randbedingung für den Durchfluss die Messwerte aus Heubach verwendet. ....	23
Tabelle 2: Übersicht der Untergrundparameter zur Erstellung des Mehrschichtmodells: volumetrische Wärmekapazitäten ( $c_v$ ) (siehe Kap. 4.1) und Wärmeleitfähigkeiten ( $\lambda$ ) aus WELSCH (2012) entsprechend der geologischen Schichten. ....	24
Tabelle 3: Übersicht der gewählten Parameter der Wärmeleitfähigkeit und der vol. Wärmekapazität für die Unsicherheitsbetrachtung. ....	31
Tabelle 4: Übersicht der resultierenden Wärmemengen aus den verschiedenen Lastgängen zur Unsicherheitsbetrachtung. ....	32
Tabelle 5: Übersicht der Parameter und Modellkonfiguration zur Sensitivitätsanalyse im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung. Die orange hinterlegte Modellnummer kennzeichnet das Modell, welches auf den Mittelwerten der Gesteins- und Untergrundkennwerte basiert. ....	33
Tabelle 6: Übersicht der Simulationen zur Modellvalidierung mit den besten Übereinstimmungen zu den gemessenen Betriebsdaten ....	36
Tabelle 7: Übersicht der erstellten Modelle zur Methodvalidierung. ....	43
Tabelle 8: Bewertungsschema für die Bedeutung geothermischer, hydrogeologischer und reservoirgeologischer Eigenschaften bei unterschiedlicher Nutzungsarten der tiefen Geothermie. Mit: ++ = sehr wichtig; + = wichtig; +/- = nicht wichtig; - = unwichtig (nach SASS 2011, aus: BÄR 2012) ....	85
Tabelle 9: Grenzwerte der thermophysikalischen und hydraulischen Kennwerte zur Potenzialbestimmung für tiefegeothermische Nutzung (BÄR 2012). ....	86
Tabelle 10: Übersicht der ermittelten spezifischen ( $c_p$ ) und volumetrischen Wärmeleitfähigkeiten ( $c_v$ ) für 25 °C. Die Extrapolation der spez. Wärmekapazität erfolgte anhand von linearen Regressionsgeraden für den Messbereich 48 °C bis 185 °C und 40 °C bis 55 °C und einer polynomische Ausgleichsgerade des Temperaturbereichs 48 °C bis 185 °C . ....	105

# 1 Einleitung

## 1.1. Motivation

Mit einem Anteil von 57 % stellt der Bereich der Wärme- und Kälteversorgung den größten Teil des Energieverbrauchs in Deutschland dar (AGEB 2012). Insbesondere hinsichtlich des Heizenergiebedarfs hat die Geothermie als regenerative und grundlastfähige Energiequelle Potential langfristig fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas abzulösen. Die Zahlen, die von der *International Geothermal Association* (IGA) anlässlich der fünfjährlich stattfindenden geothermischen Weltkongresse veröffentlicht wurden, zeigen, dass die Geothermie für die Wärmeversorgung und Stromerzeugung in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat. Mit einer weltweit installierten thermischen Leistung von 50,6 GW (Stand 2010; GTV 2013) wurde ein Zuwachs von 60 % gegenüber 2005 verzeichnet. Die installierte elektrische Leistung stieg um 20 % gegenüber 2005 auf 10,7 GW (Stand 2010; GTV, 2013). Wird ausschließlich der Sektor der Wärmeerzeugung aus geothermischen Anlagen betrachtet, liegt Deutschland mit 4,2 GW installierter thermischer Leistung, nach USA, China, Schweden und Norwegen, bereits auf Platz fünf (GTV 2013). Auch für die Zukunft wird von einem deutlichen Wachstum der Erdwärmennutzung ausgegangen. Laut einer Prognose des Bundesverbands Erneuerbare Energie (BEE) wird erwartet, dass im Jahr 2020 in etwa 26.170 GWh Wärme durch geothermische Wärmepumpen und die direkte Nutzung tiefer Geothermie bereitgestellt werden (HINRICHS-RAHLWES & PIEPRZYK, 2009). Die Wärmebereitstellung in Deutschland mithilfe geothermischer Anlagen lag im Jahr 2013 bei 9.500 GWh. Damit konnte ein Anteil von 0,64 % am gesamten Wärmebedarf in Deutschland durch Erdwärme gedeckt werden (BMWf 2013). Die Geothermie spielt demnach in der Deckung des Heizenergiebedarfs eine noch eher untergeordnete Rolle. Als Grund kann hier zum einen die immer noch vergleichsweise höheren Investitionskosten gesehen werden, zum anderen können auch die noch bestehenden Unsicherheiten in der Dimensionierung und der Betriebserfahrung solcher Heizungsanlagen angeführt werden. Um die Geothermie als Energiequelle noch effizienter nutzen zu können, sowie Unsicherheiten in der Planung und Auslegung zu minimieren, sind noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

In Heubach bei Groß-Umstadt (Hessen) wird seit 2011 ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt der HEAG Süd Hessische Energie AG (HSE) zur Nutzung der Geothermie mit einer knapp 800 m tiefen Erdwärmesonde betrieben (HLUG 2013). Die Funktionsweise der mitteltiefen Erdwärmesonde (EWS) in Heubach wird seit der Fertigstellung Ende 2012 durch zeitlich hoch aufgelöste Messwerte der Fluidtemperaturen, des Durchflusses, der thermischen Leistung und der entzogenen Wärmemenge dokumentiert. Die Auswertung dieser Messdaten ergab für das erste Betriebsjahr, verglichen mit einer im Zuge der Dimensionierung der mitteltiefen Erdwärmesonde erstellten Modellierung, deutlich höhere

Fluidtemperaturen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher mittels numerischer Modelle unter anderem mögliche Gründe für Abweichungen von Vorsimulationen zum realen Betrieb genauer betrachtet. Dabei sind neben dem Einfluss von Gesteinskennwerten und der Wärmeverteilung im Untergrund (geothermischer Gradient) auch mögliche Einflussfaktoren, die sich aus dem Betrieb der EWS ergeben, untersucht worden. Ziel dieser Betrachtung ist die Quantifizierung der anhand einer Variation dieser Parameter verursachten Unsicherheiten bezogen auf das Modellergebnis. Dies soll dazu beitragen, bereits bei der Auslegung von geothermischen Anlagen gegebene Unsicherheiten besser abschätzen zu können. Durch die Betriebsdatenerfassung bietet sich die Möglichkeit, Modellierungen direkt am laufenden Betrieb zu validieren, sodass basierend darauf außerdem zuverlässige Prognosemodelle erstellt werden konnten.

## **1.2. Geologie von Heubach**

Heubach liegt im nordöstlichen Bereich des kristallinen Odenwaldes, dem sogenannten Böllsteiner Odenwald (Abbildung 1). Im Zuge der variszischen Orogenese fand im Oberdevon (382,7 – 358,9 Ma) eine Subduktion des rhenoherynischen Ozeans statt. Dabei kollidierten die Mikrokontinente Avalonia und Armorica. Am Nordrand der aktiven Mikroplatte Armorica entstand ein magmatischer Inselbogen, dessen Überreste in weiten Teilen der Mitteldeutschen Kristallinschwelle (MGCR) nachgewiesen werden konnten. Der kristalline Odenwald stellt dabei den größten zusammenhängenden Aufschluss solcher Inselbogen-Gesteine dar. Durch die Heraushebung relativ zu den umgebenden Bereichen und die daraus resultierende Erosion der jüngeren Ablagerungen bildet der kristalline Odenwald das größte geologische Fenster im nordwestlichen Bereich des Saxothuringikums, einer Großeinheit der Varisziden (ALTENBERGER & BESCH 1993; TODT ET AL. 1995; REISCHMANN ET AL. 2001; STEIN 2001). Im Westen wird der Kristallinkomplex vom tertiären Oberrheingraben und im Norden von der permischen Saar-Selke Senke begrenzt. Im Süden und Osten wird das kristalline Grundgebirge überwiegend vom mesozoischen Buntsandstein überdeckt (STEIN 2001). Der kristalline Odenwald wird in den östlichen Böllsteiner Odenwald und in einen westlichen, flächenmäßig größeren Bereich, den Bergsträßer Odenwald, unterteilt. Beide Gebiete unterscheiden sich sowohl in ihrer tektonischen Entwicklung (vgl. ALTENBERGER & BESCH 1993) und ihren geochemischen Signaturen (vgl. REISCHMANN ET AL. 2001) als auch in der Ausprägung unterschiedlicher Druck/Temperatur Pfade (vgl. WILLNER ET AL. 1991). Geochronologische Untersuchungen ergaben zudem unterschiedliche Gesteinsalter. Die Protolithen des Böllsteiner Odenwaldes bilden dabei die ältesten Gesteine des Kristallinkomplexes (TODT ET AL. 1995; REISCHMANN ET AL. 2001). Der Bergsträßer Odenwald wird vom Böllsteiner Odenwald durch eine Nord-Süd streichende, brüchige bis duktile Scherzone, der sogenannten Otzberg Zone, getrennt (STEIN 2001). REISCHMANN ET AL. (2001) interpretieren die Otzberg Störung als eine variszische Suturzone mit einem Mindestalter von  $328 \pm 7$  Ma.

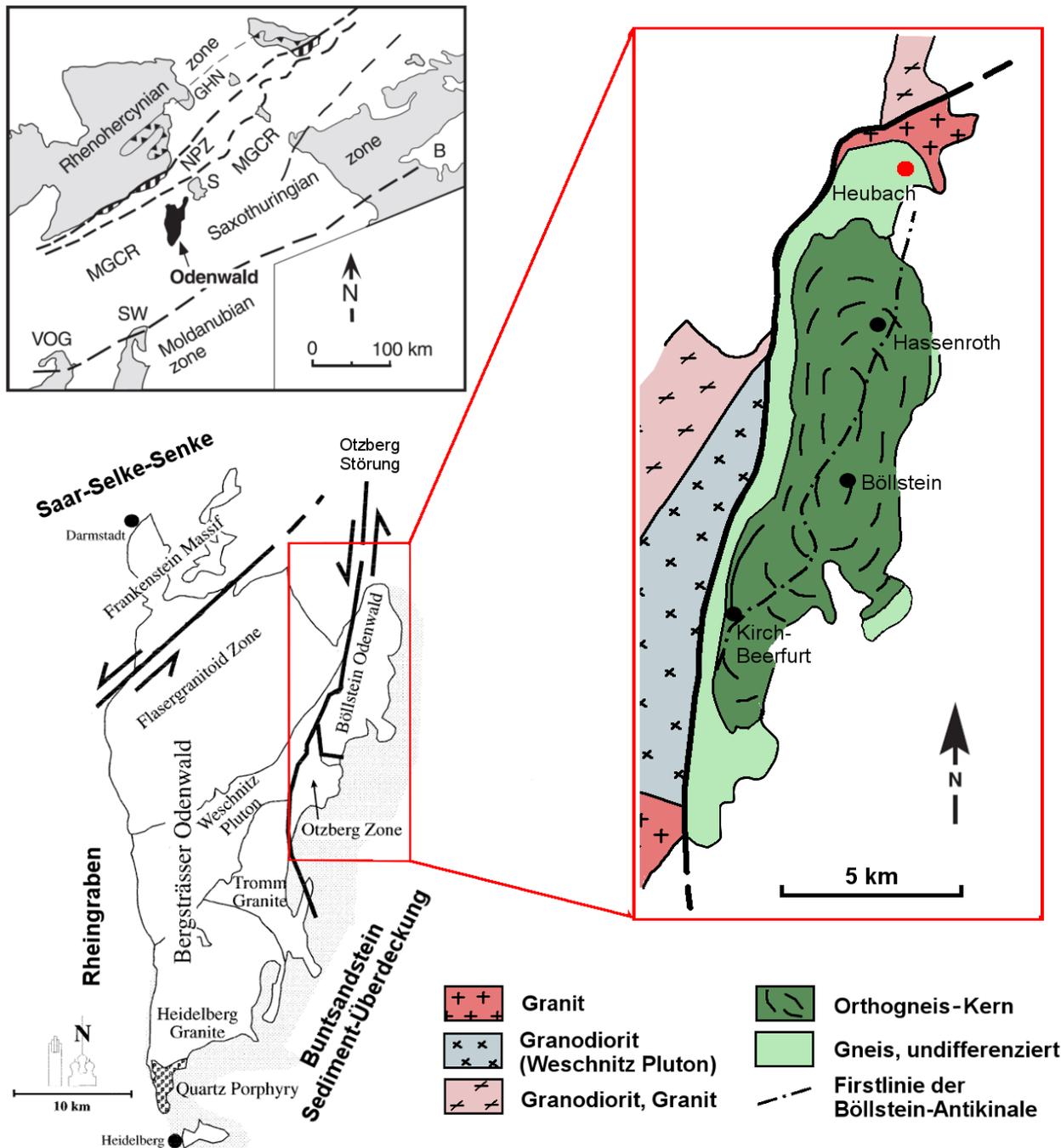


Abbildung 1: Links oben: Die stark vereinfachte Karte zeigt einen Ausschnitt der mitteleuropäischen Varisziden, in deren Großenheit, dem Saxothuringikum (Saxothuringian Zone), auch der Odenwald liegt. GHN Giessen-Harz Decke; MGCR Mitteldeutschen Kristallinschwelle; NPZ Nördliche Phyllitzone; B Barrandium; S Spessart; VOG Vogesen; SW Schwarzwald (aus ALTHERR ET AL. 1999). Links unten: Kristalliner Odenwald mit seinen strukturellen Haupteinheiten, dem Bergsträsser Odenwald, der Otzberg Zone und dem Böllsteiner Odenwald (verändert nach STEIN 2001). Rechts: Vereinfachte geologische Karte des Böllsteiner Odenwald (verändert nach ALTENBERGER & BESCH 1993; ALTHERR ET AL. 1999 und REISCHMANN ET AL. 2001)

Der Böllsteiner Odenwald besteht aus einer nach NNE abtauchenden Antiklinale. Die Gesteine des sattelförmigen Orthogneis-Kerns stellen überwiegend Granodiorit- und Granitgneise mit eingeschalteten Metagabbros und Amphiboliten dar und werden von der sogenannten *Schieferhülle* umgeben. Diese besteht hauptsächlich aus Metasedimenten wie Biotitgneisen, Hornblendegneisen, Glimmerschiefern und Quarziten. Mit einem Alter von 375 Ma gehören die Paragesteine der Schieferhülle zu den ältesten Gesteinen des Odenwaldes (HLUG 2013; STEIN 2001).

Die mitteltiefe Erdwärmesonde in Heubach wurde in den Gesteinen des Böllsteiner Odenwaldes abgeteuft. Mit einer Bohrlänge von 775 m wurden erstmals die Tiefengesteine des kristallinen Grundgebirges in Hessen erschlossen. Aus dem vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) erstellten Schichtverzeichnis aus Bohrklein (Cuttings) und Bohrkernen geht hervor, dass es sich dabei überwiegend um Gneise mit unterschiedlichen Mineraliengehalten handelt (HLUG 2012). Die erschlossenen Gneise weisen variierende Anteile an Mineralen wie Quarz, Glimmer, Feldspat, Hornblende und Granat auf, wobei feinkörniger Biotitgneis am häufigsten angetroffen wurde. Entlang der Bohrstrecke werden die Gneise von mehreren Aplit- und Pegmatitgängen sowie von einigen Quarzgängen durchschlagen. Vereinzelt traten Scherzonen und Mylonite der unteren Grünschieferfazies (Temperatur: ca. 365 bis 400 °C; Druck: 2 bis 3 kbar) auf. In 640 m Teufe traf man außerdem auf einen 45 m mächtigen, im Perm in das Grundgebirge intrudierten Rhyolith (FRITSCHKE ET AL. 2012). Ein vereinfachtes Tiefenprofil sowie ein detailliertes im Zuge der Tiefenbohrung erstelltes Schichtverzeichnis befinden sich im Anhang A.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1. Thermische Modellierung von Erdwärmesonden

Die fachgerechte Auslegung von Erdwärmesonden ist einerseits eine wichtige Grundlage für eine nachhaltige Erdwärmenutzung, zum anderen ist eine korrekte Dimensionierung auch entscheidend für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg der geothermischen Anlage. Für größere Anlagen (Heizlast > 30 kW, Jahresbetriebsstunden > 2400 h, zusätzlich vorhandene Wärmequellen/-senken wie z. B. Kühlung) fordert die VDI 4640 (Blatt 2, 2010) daher eine auf den Einzelfall ausgerichtete Berechnung. Dabei sollen die Temperaturverläufe, die sich aus dem Heizbedarf ergeben, über den vorgesehenen Betriebszeitraum ermittelt werden. Je nach Anforderung und Komplexität des Untergrunds erfordert dies den Einsatz von auf analytischen oder numerischen Modellansätzen basierenden Simulationsprogrammen. Vorteile von analytischen Simulationsprogrammen, wie beispielsweise *EED - Earth Energy Designer* (BLOMBERG ET AL. 2008) oder *EWS* (HUBER, 2011), sind ihre kurzen Rechenlaufzeiten sowie die Möglichkeit, Wärmepumpenkonfigurationen in die Berechnungen einzubeziehen. Den Berechnungen mit *EED* liegen sogenannte *g-functions* (dimensionslose Temperatur-Sprungantworten bei konstanter Entzugsleistung) zugrunde. Diese Antwortfunktionen beschreiben die konduktive thermische Reaktion des Erdreichs sowie die gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden. Sie sind abhängig vom Abstand der Bohrungen an der Erdoberfläche, der Bohrlochteufe und gegebenenfalls einem Neigungswinkel des Bohrlochs (MARAINI 2000, NUßBICKER-LUX 2010). Die Simulationen mit *EWS* basieren hingegen auf drei, vom radialen Sondenabstand abhängigen Lösungsansätzen (Abbildung 2). Als innere Randbedingung („Sole-Modell“) soll dabei die durchschnittliche Soletemperatur der jeweiligen Schicht angenommen werden. (HUBER & PAHUD 1999, HUBER & SCHULER 1997).

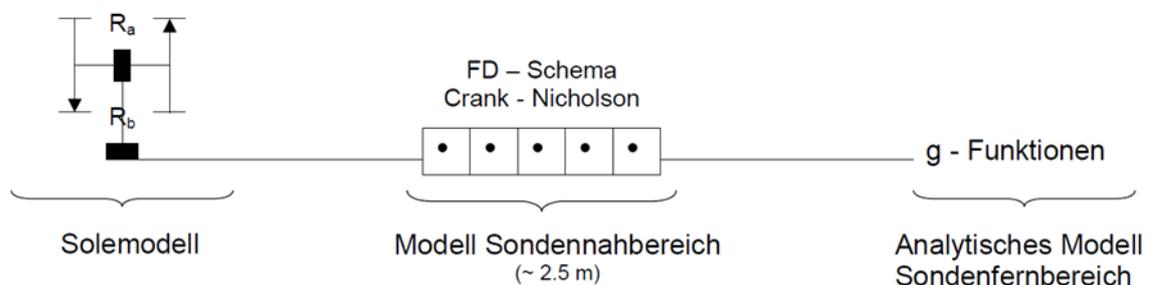


Abbildung 2: Schematische Übersicht über den Aufbau des Programms EWS. Der Untergrund wird für die Modellierung in die Bereiche Sole, Sondennahbereich und Sondenfernbereich unterteilt (SIGNORELLI & KOHL 2002)

Angelehnt an Berechnungen von ESKILSON (1987), die ergaben, dass insbesondere bei Erdwärmesonden von über 100 m Länge die vertikale Wärmeleitung im Sondennahbereich (< 3 m Abstand) vernachlässigt werden kann, wird bei dem Programm *EWS* auf eine Berechnung der vertikalen Wärmeleitung verzichtet. Wärmeleitungsgleichungen werden stattdessen in Zylinderkoordinaten schichtweise, eindimensional gelöst, wodurch den Schichten unterschiedliche Stoffwerte (Kennwerte des Gesteins und des Hinterfüllbaustoffs) zugewiesen werden können. Die äußeren Temperatur-Randbedingungen werden anhand von *g-functions* berechnet (HUBER 2011). Während *EED* zur Berechnung von Sondenfeldern mit Erdwärmesondenlängen von 20 m bis 200 m ausgelegt ist, können mit *EWS* Sonden bis 1500 m Länge simuliert werden. Beide Programme eignen sich zur Dimensionierung von kleineren Anlagen bei einfachen Untergrundverhältnissen. Mit zunehmender Komplexität der Randbedingungen, wie sie insbesondere bei einer Beeinflussung durch Grundwasserströmung, Auslegung von geothermischen Anlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie oder bei der Modellierung von saisonalen Erdwärmespeichern entstehen, ist der Gebrauch von Simulationsprogrammen mit rein analytischen Lösungsansätzen nicht mehr ausreichend. Eine numerische Modellierung des dreidimensionalen, transienten Wärme- und Stofftransports ist aber vor allem wegen der extremen Abmessung der Erdwärmesonden aufwendig. Dem Sonden- und Bohrlochdurchmesser im Bereich von mehreren 10-er cm steht die Sondenlänge in Größenordnungen von bis zu mehreren 100-er m gegenüber. Um eine korrekte Bohrlochgeometrie der Erdwärmesonden, sowie den entsprechenden Wärmetransport erfassen zu können, wurden in den vergangenen Jahren einige zwei- und dreidimensionale Modelle auf Basis der Finiten-Elemente-Methode oder der Finiten-Volumen-Methode entwickelt (LAMARCHE ET AL. 2010, BAUER 2011, DIERSCH 2014). Mit dem Programm *FEFLOW* (*Finite Element subsurface FLOW system*) (DIERSCH 2014) der DHI-WASY GmbH wurde die Grundwasserströmung, der Grundwasserstofftransport und der Wärmetransport konzeptionell in einem einheitlichen Ansatz beschrieben. *FEFLOW* konnte sich unter den Finite-Element Simulatoren im Bereich der geohydraulischen Modellierung mittlerweile international durchsetzen (BIßMANN & KAHNT 2014). Die Beeinflussung des untergründigen Temperaturregimes durch Erdwärmesonden kann in *FEFLOW* auf Basis zweier unterschiedlicher Lösungsansätze simuliert werden. Einerseits durch einen auf der Finite-Elemente-Methode beruhenden, numerischen Ansatz von AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) und andererseits durch einen vollständig stationären Ansatz von ESKILSON & CLAEßSON (1988), welcher auf einem System gekoppelter, linearer Differentialgleichungen beruht. Bei beiden Ansätzen erfolgt eine Implementierung von Erdwärmesondenmodellen als eindimensionale Linienelemente in ein den Untergrund beschreibendes dreidimensionales Finite-Elemente-Netz (BAUER 2011). Der konvektiv und konduktiv bedingte Wärmetransport in einem porösen Medium kann unter Einbeziehung des Fourierschen Gesetzes grundsätzlich anhand der Gleichung (KALTSCHMITT ET AL. 2006)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_w v \nabla T - \nabla(\lambda \nabla T) = 0 \quad (1)$$

beschrieben werden. Durch eine Multiplikation der spezifischen Wärmekapazität der festen Phase  $c$  [J/(kg·K)] beziehungsweise der des Fluids  $c_w$  [J/(kg·K)] mit der Dichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] kann die jeweilige volumetrische Wärmekapazität  $\rho c$  [J/(m<sup>3</sup>·K)] ermittelt werden. Neben der Temperatur ( $T$ ) [K] und der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins  $\lambda$  [W/(m·K)] geht außerdem die Fließgeschwindigkeit des Fluids (Wasser)  $v$  [m/s] in die Berechnung ein. Darauf aufbauend wurde von AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) am Beispiel einer Doppel-U-Sonde der transiente Wärmetransport wie folgt beschrieben:

Für die Einlassrohre  $i_1$  und  $i_2$ :

$$\begin{aligned}\rho c_r \frac{\partial T_{i1}}{\partial t} - \lambda_r \frac{d^2 T_{i1}}{dz^2} + \rho c_r u \frac{dT_{i1}}{dz} &= b_{ig1}(T_{i1} - T_g) \\ \rho c_r \frac{\partial T_{i2}}{\partial t} - \lambda_r \frac{d^2 T_{i2}}{dz^2} + \rho c_r u \frac{dT_{i2}}{dz} &= b_{ig2}(T_{i2} - T_g)\end{aligned}\quad (2)$$

Für die Auslassrohre  $o_1$  und  $o_2$ :

$$\begin{aligned}\rho c_r \frac{\partial T_{o1}}{\partial t} - \lambda_r \frac{d^2 T_{o1}}{dz^2} - \rho c_r u \frac{dT_{o1}}{dz} &= b_{og1}(T_{o1} - T_g) \\ \rho c_r \frac{\partial T_{o2}}{\partial t} - \lambda_r \frac{d^2 T_{o2}}{dz^2} - \rho c_r u \frac{dT_{o2}}{dz} &= b_{og2}(T_{o2} - T_g)\end{aligned}\quad (3)$$

Für den Hinterfüllbaustoff  $g$ :

$$\begin{aligned}\rho c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} - \lambda_g \frac{d^2 T_g}{dz^2} &= b_{ig1}(T_g - T_{i1}) + b_{ig2}(T_g - T_{i2}) \\ &+ b_{og1}(T_g - T_{o1}) + b_{og2}(T_g - T_{o2})\end{aligned}\quad (4)$$

Die Gleichungen beziehen sich auf das in Abbildung 3 dargestellte definierte *Kontrollvolumen* (flüssigkeitsdurchströmter endlicher Raum) auf eine Sondenlänge  $dz$ . Der Index  $r$  stellt das Wärmeträgermittel und  $u$  dessen Fließgeschwindigkeit [m/s] dar  $b_{ig}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] ist der Kehrwert des Übergangswiderstands zwischen Einlassrohr und Hinterfüllmaterial und  $b_{og}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] jener zwischen Auslassrohr und Hinterfüllbaustoff. Die Formeln 1 – 4 stellen die Basis für ein mathematisches Modell zur Beschreibung von gekoppeltem Wärmestrom in einer vertikalen Doppel-U-Sonde dar. Das Hinterfüllmaterial kann dabei als ein verbindendes Medium angesehen werden, über welches der Wärmetransport zwischen den Rohren erfolgt (AL-KHOURY & BONNIER 2006). Anhand dieses Wärmetauscher-Modells ist eine Beschreibung des pseudo 3D Wärmetransports mittels eines 1D Linienelements möglich. Die Finite-Element Diskretisierung erfolgte durch ein Raum-Zeit-Finite-Element Verfahren in Verbindung mit der Petrov-Galerkin Methode und der Finite-Differenz-Methode. Für eine detaillierte Herleitung des Lösungsansatzes sei auf AL-KHOURY ET AL. (2005, 2006 & 2010) verwiesen. Die Implementierung des Erdwärmesondenmodells in das Finite-Element-Programm *FEFLOW* wird in DIERSCH ET AL (2011<sub>a</sub> & 2011<sub>b</sub>) beschrieben.

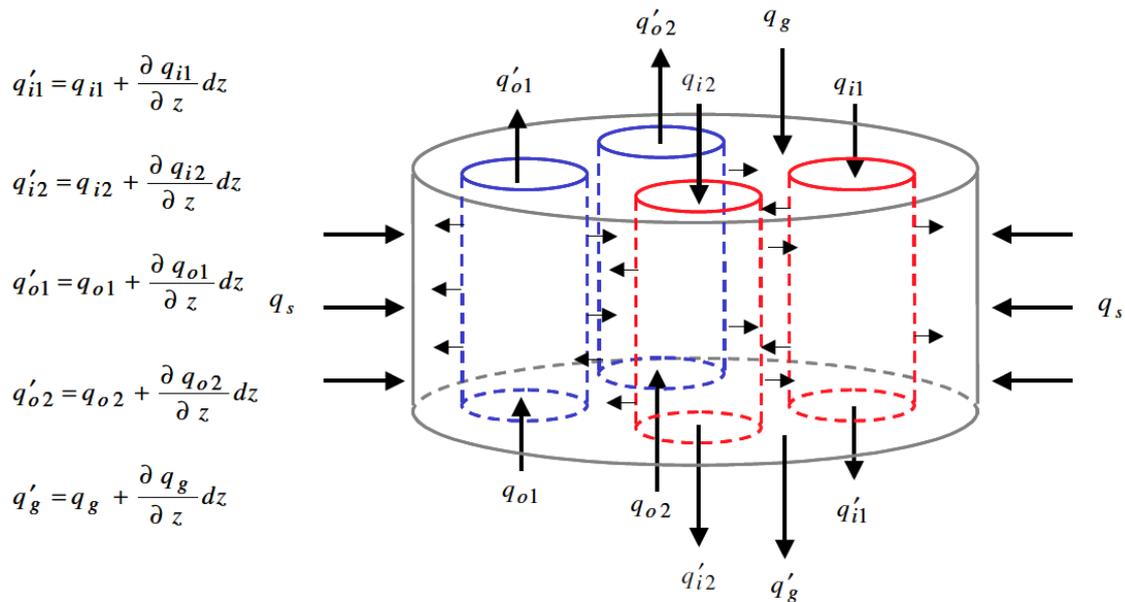


Abbildung 3: Kontrollvolumen einer Doppel-U-Sonde (Wärmetauscher) (AL-KHOURY & BONNIER 2006)

Nach dem Ansatz von ESKILSON & CLAESSON (1988) kann unter Annahme stationärer Bedingungen der horizontale, auf Konvektion und Wärmeleitung basierende, Wärmetransport im Bohrloch mittels einer Dreiecksschaltung thermischer Widerstände beschrieben werden (siehe Abbildung 4). Dabei befindet sich jeweils ein thermischer Widerstand zwischen den Temperaturpotenzialen der Fluide im Einlass-beziehungsweise im Auslassrohr und der Bohrlochwand. Ein weiterer Widerstand befindet sich zwischen den Temperaturpotentialen der Fluide selbst. Damit kann der spezifische Wärmestrom  $q_{12}$  des thermischen Kurzschlusses zwischen auf- und absteigendem Fluid bestimmt werden (BAUER 2011).

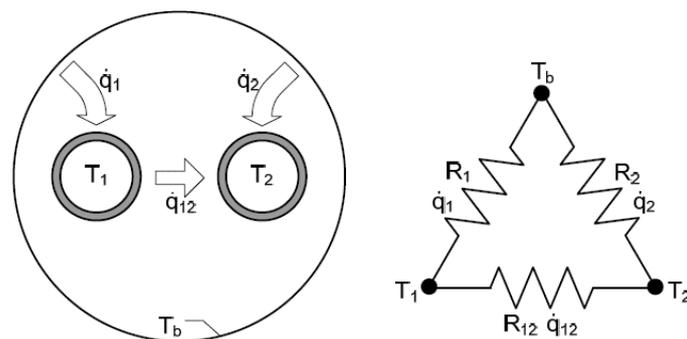


Abbildung 4: Horizontaler Querschnitt einer 1U-Sonde und das zugehörige Widerstandsmodell (aus BAUER 2011, nach ESKILSON & CLAESSON 1988)

Durch ein Hinzufügen der thermischen Kapazitäten der Bohrlochkomponenten konnten sogenannte Widerstands-Kapazitäts-Modelle (WKM) entwickelt werden (BAUER, 2011). Nach einem Ansatz der die

Kapazität des Hinterfüllmaterials auf einen Knoten pro Rohr aufteilt, wird berücksichtigt, dass das Hinterfüllmaterial bezogen auf den Bohrlochquerschnitt keine einheitliche Temperatur aufweist, sondern diese sich an der Temperatur des Fluids im nächst gelegenen Rohr orientiert. Dadurch können bei transienter Berechnung höhere Genauigkeiten erzielt werden. Die Abbildung der Bohrlochwand erfolgt dennoch in einem einzelnen Knoten. Diese Annahme ermöglicht es, die WKM mit einer eindimensionalen Beschreibung des umliegenden Untergrunds zu verbinden (BAUER 2011). Für eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung der in Abbildung 5 dargestellten WKM für die verschiedenen Erdwärmesondentypen (U-Sonde, Doppel-U-Sonde, Koaxialsonde) wird auf DIERSCH ET AL. 2011<sub>A</sub> und DIERSCH ET AL. 2011<sub>B</sub> verwiesen.

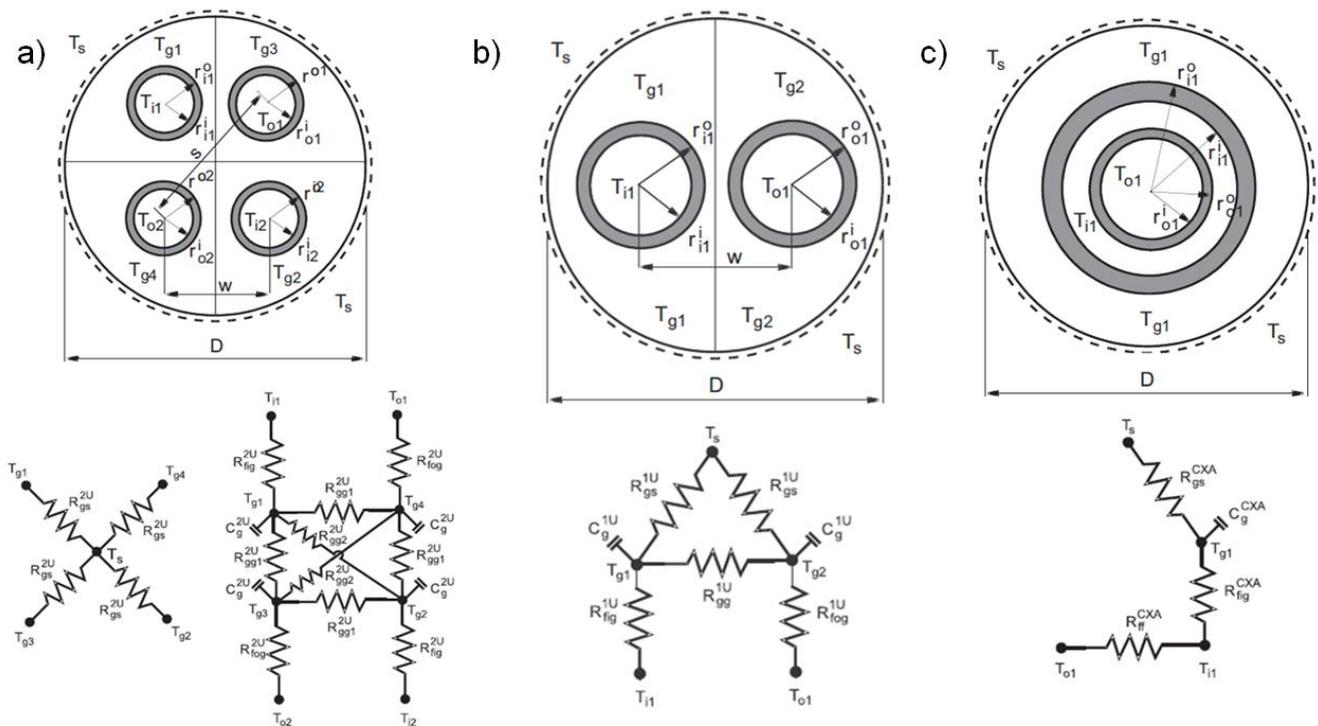


Abbildung 5: Horizontale Querschnitte und die zugehörigen zweidimensionalen WKM für eine a) Doppel-U-Sonde b) 1U-Sonde und c) Koaxialsonde. Mit:  $T_f$ : Fluidtemperatur;  $T_{gi}$ : Temperatur des Füllmaterials;  $T_b$ : Temperatur der Bohrlochwand;  $C_g$ : Thermische Kapazität;  $R$ : Thermischer Widerstand (aus DIERSCH ET AL. 2011<sub>A</sub>)

Darauf aufbauend wurden von BAUER (2011) dreidimensionale Grobstrukturmodelle der Sonde entwickelt. Dies ist durch eine vertikale Verbindung mehrerer übereinander geordneter zweidimensionaler WKM erreicht worden. Die Verbindung erfolgte an allen Knoten des Hinterfüllbaustoffs und des Fluids, wodurch die Wärmeleitung zwischen den Zonen des Füllmaterials und der Wärme- und Stofftransport durch Wärmeleitung und Strömung innerhalb der Rohre berücksichtigt wurde. Abbildung 6 zeigt das Einbetten der daraus entwickelten Sondenmodelle als eindimensionale Linienelemente in das dreidimensionale Finite-Elemente-Netz des Untergrunds (BAUER 2011).

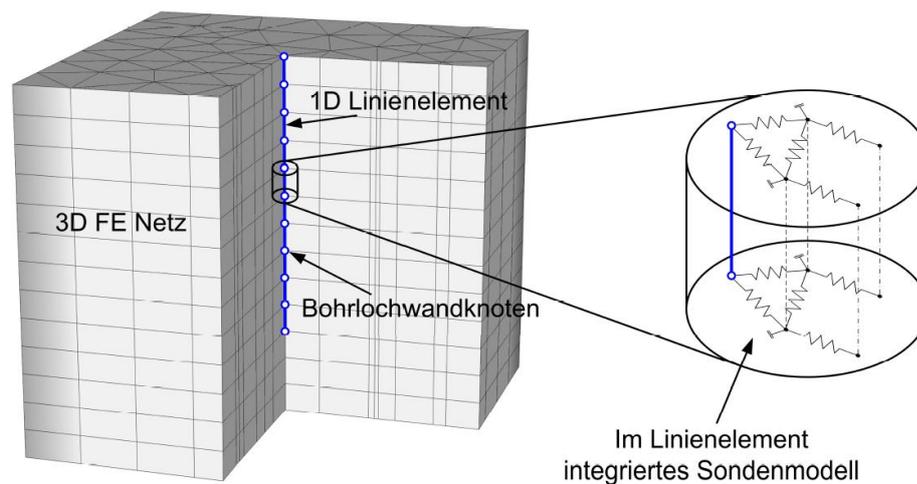


Abbildung 6: Einbinden des 1D Linienelements in das 3D Finite-Element-Netz des Untergrunds (BAUER 2011).

Der stationäre Ansatz von ESKILSON & CLAEISSON (1988) beruht demnach auf einem System gekoppelter, linearer Differentialgleichungen. Bezeichnend für diese Methode ist der niedrige Rechenaufwand aufgrund einer vollständig analytischen Lösbarkeit (BAUER 2011). Der numerische Lösungsansatz von AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) basiert hingegen auf der Finite-Element-Methode. Dadurch wird sowohl das Fluid in den Rohren als auch das Hinterfüllmaterial der Sonde instationär behandelt. Alle wichtigen thermischen Kapazitäten der Erdwärmesonde werden damit berücksichtigt (BAUER 2011). Simulationen mit dem numerischen Lösungsansatz nehmen im Vergleich zu dem analytisch lösbaren, stationären Ansatz von ESKILSON & CLAEISSON (1988) sehr viel längere Rechenzeiten in Anspruch. Für Langzeitbetrachtungen ist demnach der analytische Lösungsansatz besser geeignet. Insbesondere bei transienten Bedingungen (wie beispielsweise kurzfristigen Lastwechseln beim Entzugsverhalten von Erdwärmesonden) kann jedoch mit dem Ansatz von AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) eine höhere Ergebnisgüte erzielt werden. Je nach Anwendungsfall kann somit die Verwendung des einen oder des anderen Modells von Vorteil sein (BAUER 2011). Das Simulationsprogramm *FEFLOW* bietet somit die Möglichkeit, komplexe Grundwasser- und Wärmetransportmechanismen zu modellieren. Wie bereits beschrieben erfordert dies einen erhöhten Rechenaufwand, weshalb eine iterative Bestimmung von relevanten Parametern (z. B. Sondenlänge) zur Dimensionierung von geothermischen Anlagen nur bedingt möglich ist. Insbesondere bei der Planung einer neuen Anlage empfiehlt sich daher die kombinierte Nutzung von analytischen Verfahren (wie in *EED*, *EWS*) und numerischen Simulationsprogrammen (z. B. *FEFLOW*).

## 2.2. Geothermische Nutzung der mitteltiefen Erdwärmesonde in Heubach

Die HEAG Südthessische Energie AG (HSE) betreibt seit 2011 ein Forschungsprojekt in Heubach (Groß-Umstadt, Hessen) mit dem Ziel, den mittelständischen Industriebetrieb FRENGER SYSTEME BV über eine 773 m tiefe Erdwärmesonde und acht oberflächennahen Erdwärmesonden (82 m bis 138 m) mit geothermischer Energie zum Heizen und Kühlen zu versorgen (HLUG 2013). Mittels einer Niedertemperatur-Deckenheizung sollen ca. 1.400 m<sup>2</sup> Büroräume und eine Produktions-/Lagerfläche von ca. 6.000 m<sup>2</sup> beheizt und gekühlt werden. Zur Wärmeversorgung wird eine thermische Leistung von 140 kW und eine Heizungsvorlauftemperatur von ca. 35 °C benötigt. Außerdem soll eine Kühlleistung von 45 kW mit einer Heizungsvorlauftemperatur von ca. 17 °C erreicht werden. Zum Anheben der entsprechenden Temperaturniveaus kommen Wärmepumpen zum Einsatz (LEMES 2013). Ein vereinfachtes Hydraulikschema der Anlage ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Betriebsdaten (Durchflussrate, Lastgang, Fluidtemperaturen), die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Randbedingung für den simulierten Betrieb der EWS, sowie als Referenz für die Modellvalidierung verwendet wurden, sind vom Ultraschall-Wärmemengenzähler (WMZ 2) mit integrierten Pt 500 Temperaturfühlern erfasst worden.

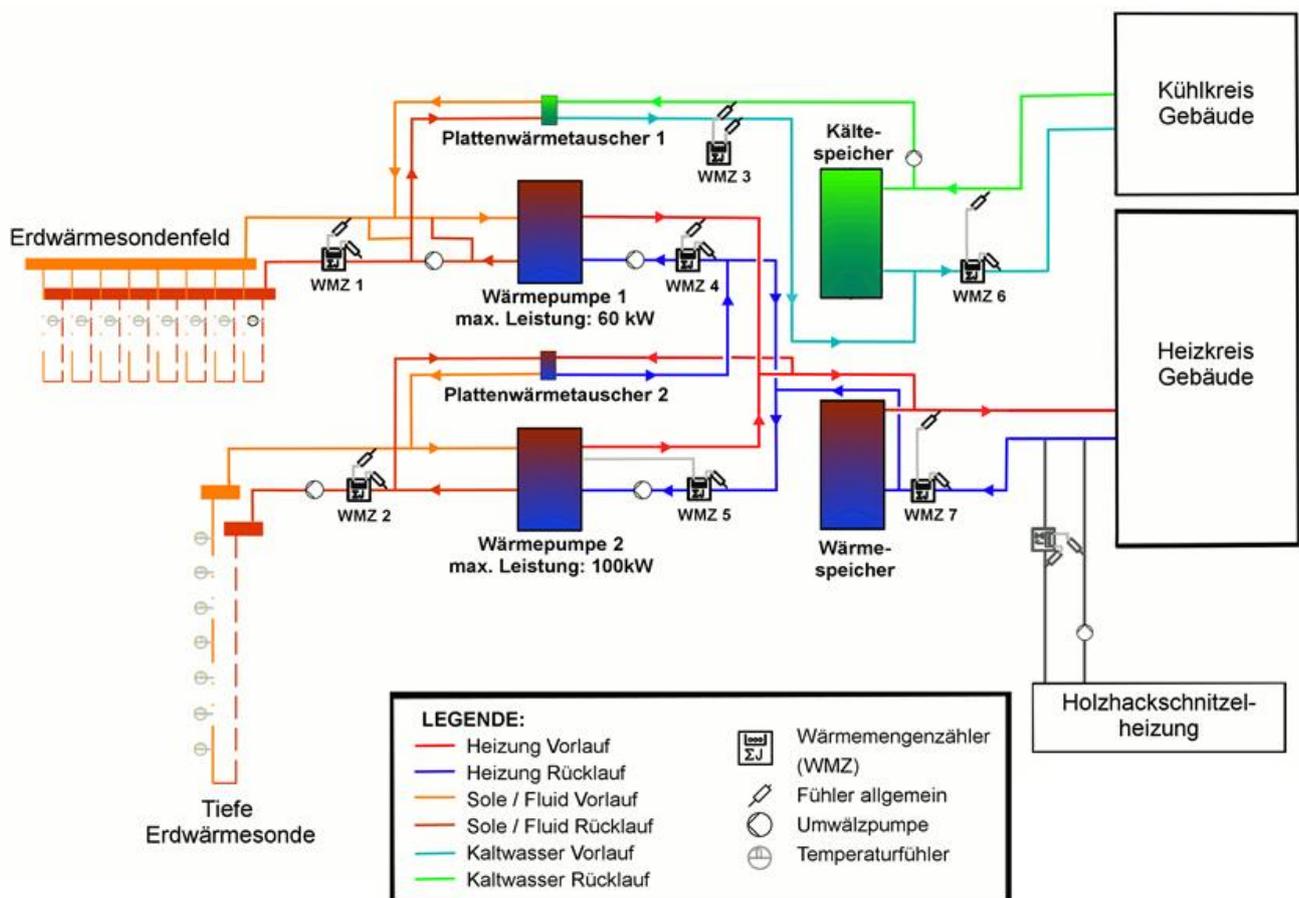


Abbildung 7: Vereinfachtes Hydraulikschema der Erdwärmeanlage in Heubach (verändert nach LEMES 2013)

Vom Sondenkopf der mitteltiefen EWS bis zur Temperaturmessung (WMZ 2) durchströmt das Wärmeträgermedium ein circa 55 m langes PE-Rohr, welches in etwa einem Meter Tiefe im Erdreich verlegt ist. Etwaige Wärmeverluste aufgrund dieser Zuleitung werden nicht berücksichtigt. Daher erfolgte, neben der Modellvalidierung an den aufgezeichneten Betriebsdaten, außerdem eine Validierung der Untergrund und Gesteinsparameter auf Basis der Messwerte (Durchfluss, Fluidtemperatur) aus einem Geothermal Response Test (GRT). Die Auslegung der mitteltiefen Erdwärmesonde basiert auf einem prognostizierten jährlichen Entzugsbedarfs von etwa 121,5 MWh. Die restliche benötigte Wärmemenge von fast 87 MWh/a soll über das oberflächennahe Erdwärmesondenfeld gedeckt werden. Die acht oberflächennahen Doppel-U-Sonden mit insgesamt ca. 900 Sondenmetern sollen außerdem die notwendige Kühlleistung für eine passive (indirekte) Kühlung erbringen.

### 2.2.1. Betriebserfahrungen mit der mitteltiefen Erdwärmesonde

Seit der Inbetriebnahme der Anlage Ende 2012 werden das Entzugsverhalten, die daraus hervorgehenden Fluidtemperaturen sowie die Außentemperatur anhand zeitlich hoch aufgelöster Messwerte (in bis zu 2 min Abständen) dokumentiert. Ab Mitte Januar werden die Messdaten kontinuierlich an die HSE übertragen (Abbildung 8).

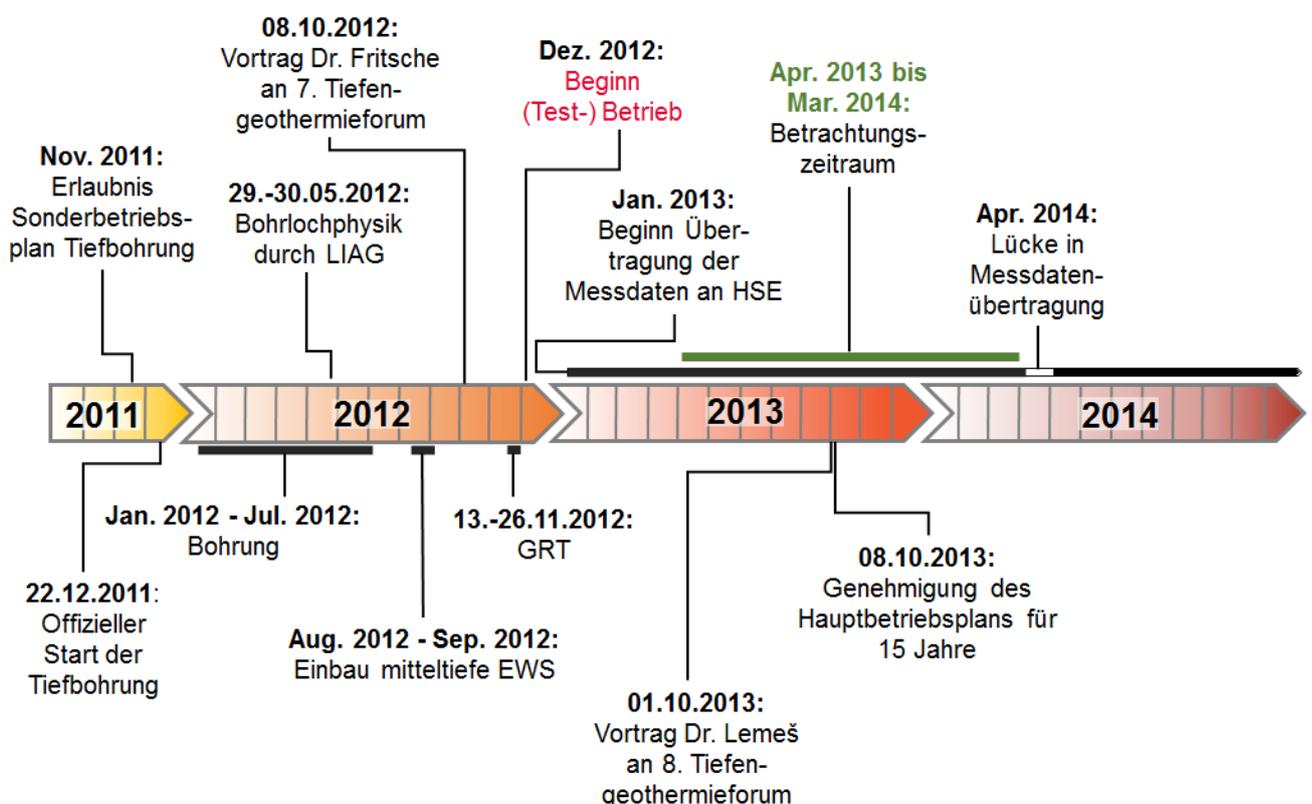


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung des Geothermie-Projekts in Heubach

Die im Folgenden dargestellten Betriebserfahrungen der Erdwärmeanlage in Heubach basieren auf den von der HSE freundlicherweise zur Verfügung gestellten Messdaten. Wegen einer Lücke in der Messdatenübertragung im April 2014 standen für die Modellvalidierung grundsätzlich die kontinuierlich erfassten Messwerte von Februar 2013 bis März 2014 zur Verfügung. Daraus wurde der Betrachtungszeitraum 01. April 2013 bis 31. März 2014 gewählt.

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich eine thermischen Modellierung der mitteltiefen EWS erfolgte, beschränken sich die nachfolgend dargelegten Messergebnisse auch auf das Entzugsverhalten der 773 m tiefe Koaxialsonde. Eine Übersicht über die monatlich entzogene Wärmemenge der gesamten Geothermieanlage befindet sich in Anhang B. In Abbildung 9 sind die über den Betrachtungszeitraum vom 01. April 2013 bis 31. März 2014 monatlich aus der mitteltiefen EWS entzogenen Wärmemengen dargestellt.

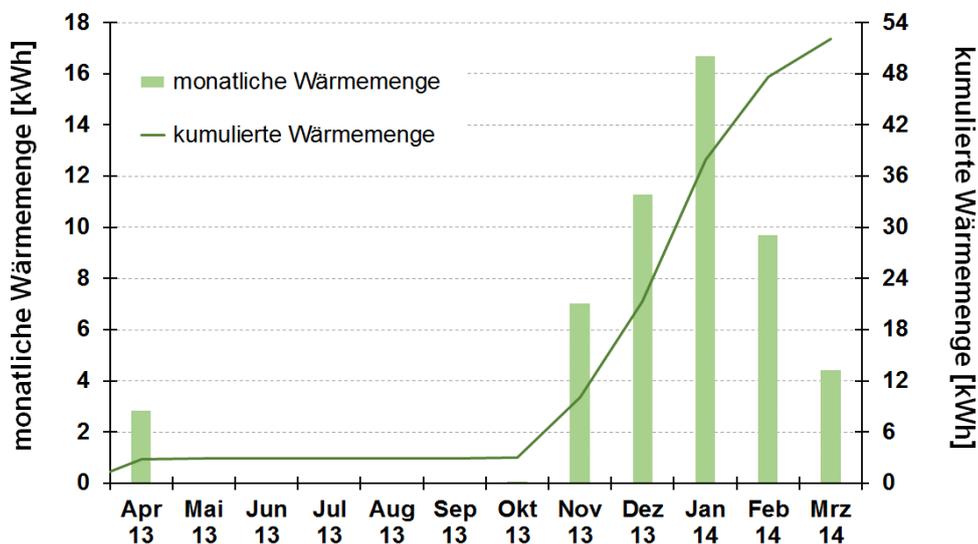


Abbildung 9: Monatlich entzogene Wärmemenge (hellgrüne Balken) und kumulierte Wärmemenge (dunkelgrüne Linie) der mitteltiefen EWS in Heubach.

Im Betrachtungszeitraum wurden von der mitteltiefen EWS nur knapp 52 MWh an thermischer Energie dem Untergrund entzogen. Diese verhältnismäßig geringe Wärmemenge liegt an einem niedrigen Heizbedarf in Folge eines milden Winters 2013/2014 (Abbildung 10). Der Dimensionierung der EWS liegen hingegen die Annahmen der wesentlich niedrigeren Außentemperaturen von 2010 zu Grunde (HSE 2011). Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt des aufgezeichneten Lastgangs der mitteltiefen EWS. Der Betrieb erfolgte je nach Bedarf in unregelmäßig langen Entzugsperioden. Den meist 20 min bis 60 min andauernden aktiven Phasen der Sonde folgten Zeitspannen, in denen sowohl die Wärmepumpe als auch die Umwälzpumpe für das Sondenfluid abgestellt wurden. Die Taktung von Wärmepumpe und Umwälzpumpe wurde so festgelegt, dass meist die Umwälzpumpe einige Minuten vor der Wärmepumpe aktiviert und einige Minuten nach dem Abschalten der Wärmepumpe wieder deaktiviert wurde (siehe rote Markierungen in Abbildung 11).

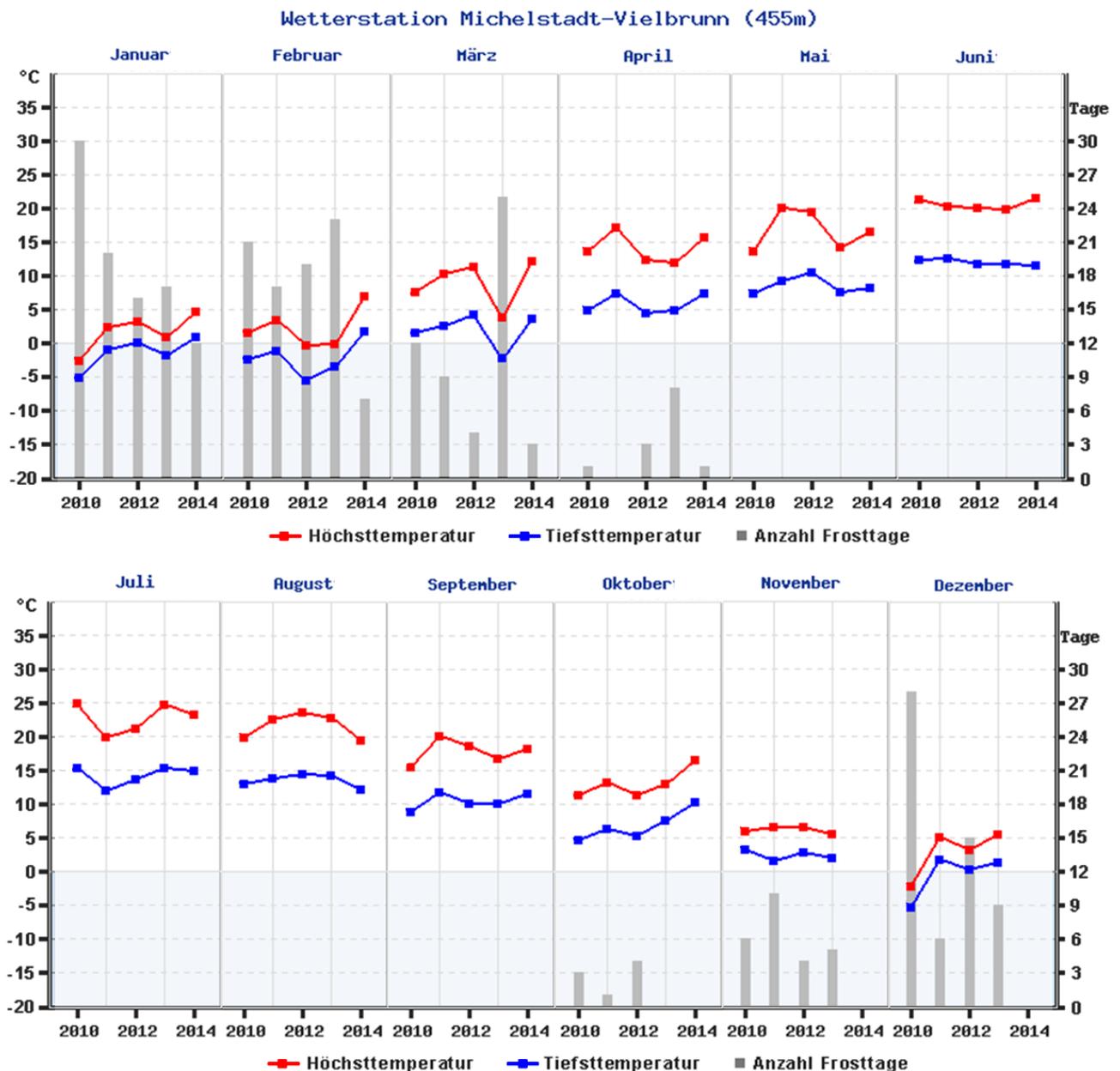


Abbildung 10: Vergleich der mittleren Monatstemperaturen der Jahre 2010 bis 2014. Die Monatstemperaturen des Betrachtungszeitraums April 2013 bis März 2014 sind insgesamt höher als jene im Jahr 2010. Die Bemessung der EWS erfolgte anhand der klimatischen Verhältnisse von 2010 (HSE 2011). Die Temperaturmesswerte stammen von der circa 18 km von Heubach entfernten Wetterstation Michelstadt-Vielbrunn (verändert, nach WETTER ONLINE 2014)

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen, wurden aus den Messwerten mittlere Tages- und Monatsfluidtemperaturen bestimmt. Bei der Berechnung der mittleren Fluidtemperatur wurde an Zeitpunkten mit aktivem Betrieb der EWS der Mittelwert der Einlass und Auslasstemperatur des Sondenfluids (Wasser) gebildet. Dabei wurde als Berechnungskriterium eine Durchflussrate von mindestens 1,4 l/s (5 m<sup>3</sup>/h) festgelegt. Lag die Durchflussrate unterhalb dieses Wertes, sind die

Temperaturmesswerte nicht bei der Mittelwertbildung berücksichtigt worden. Dies geschah um sicher zu stellen, dass die mittlere Fluidtemperatur nicht durch Temperaturmessungen des im Zulaufrohr zur Messstelle (WMZ 2) stehenden Wärmeträgermittels verfälscht wurde (Abbildung 7). Zusätzlich sind die Mittelwerte erst ab einer Differenz zwischen der Einlass- und Auslasstemperatur von mindestens 2 °C gebildet worden. Damit konnte vermieden werden, dass messtechnisch bedingte Ausreißer, die beim Einsetzen des Wärmeentzugs oder der Fluidumwälzung vorkommen können, ebenfalls in die Mittelwertberechnungen einfließen.

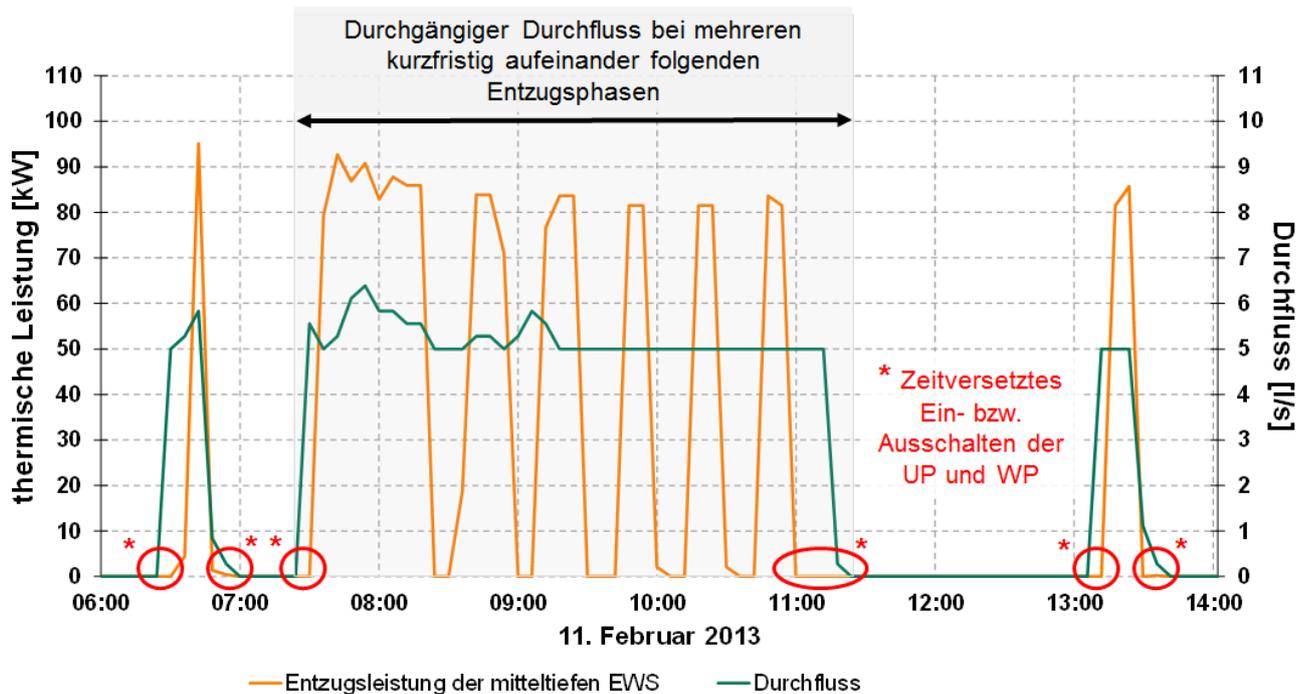


Abbildung 11: Gemessener Lastgang sowie die dazugehörigen Durchflussraten der mitteltiefen EWS am 11. Februar 2013. Durch die bedarfsorientierten, unterschiedlich langen Entzugsphasen entsteht ein unregelmäßiger, zum Teil sehr kurzfristiger Lastwechsel. Die roten Markierungen kennzeichnen an einigen Entzugsphasen das zeitversetzte Ein- und Ausschalten von Umwälz-(UP) und Wärmepumpe (WP), wodurch beim Aktivieren der Wärmepumpe bereits ein aktiver Durchfluss vorherrscht.

Die in Abbildung 12 dargestellten grauen Balken repräsentieren die mittleren täglichen Fluidtemperaturen. Das Temperaturniveau auf welchem sich das Sondenfluid während des aktiven Wärmeentzugs befindet, ist vergleichsweise hoch. Bei einem erhöhten Heizenergiebedarf infolge kälterer Außentemperaturen, wie beispielsweise Ende Januar, kann ein Abnehmen der täglichen mittleren Fluidtemperaturen beobachtet werden. Dies ist auf einen verstärkten Wärmeentzug aus dem Untergrund zurückzuführen. Wurde der Entzug gedrosselt oder über einige Tage ausgesetzt, ist ein, bezogen auf die vorangegangene mittlere Fluidtemperatur, höheres Temperaturniveau festgestellt worden. Diese messbare Temperaturerhöhung resultierte aus einer thermischen Regeneration des Untergrunds. Da die mittlere Fluidtemperatur nur bei aktiver Wärme- und Umwälzpumpe berechnet

wurde, lässt sich andererseits auch erkennen an wie vielen Tagen die EWS im Betrachtungszeitraum in Betrieb war. Die reine Betriebszeit pro Monat kann Abbildung 13 entnommen werden (grüne Balken). Sie betrug dabei im einjährigen Betrachtungszeitraum nur etwa 600 Stunden.

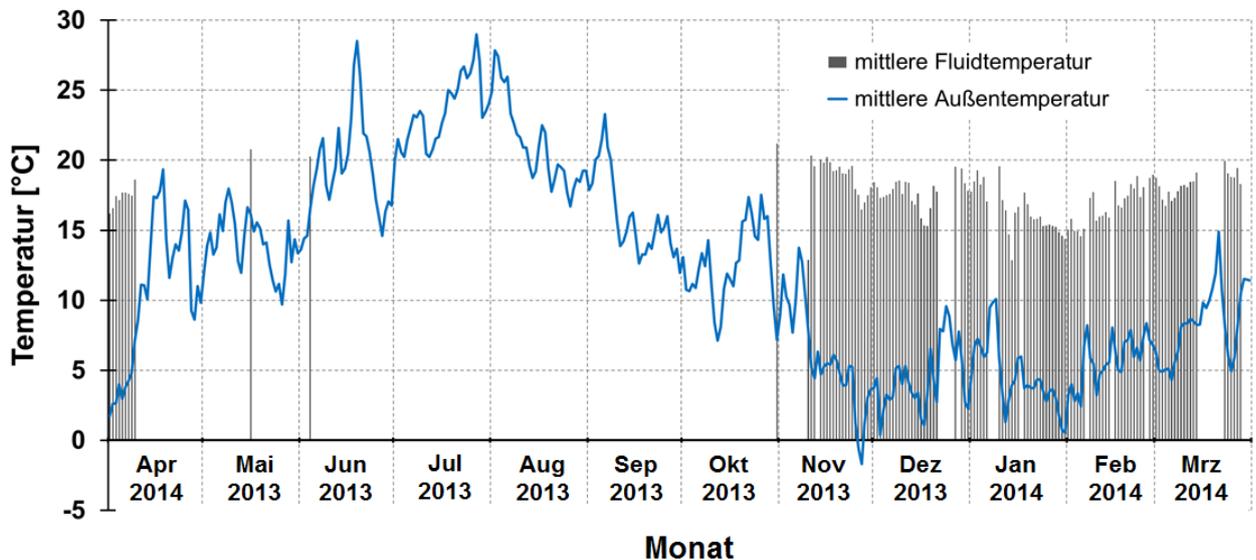


Abbildung 12: Die grauen Balken stellen den täglichen Mittelwert der Fluidtemperaturen bei aktiver EWS dar. Das Fehlen einer Säule bedeutet, dass an diesem Tag die EWS nicht in Betrieb war.

Bei der in Abbildung 13 dargestellten Übersicht der mittleren monatlichen Fluidtemperaturen ist darauf hinzuweisen, dass im Mai, Juni und Oktober die mitteltiefe EWS an je nur einem Tag in Betrieb war (Abbildung 12) und sich der Mittelwert daher in diesen Monaten aus vergleichsweise wenigen Temperaturmessungen ergibt. Allgemein bewegen sich die mittleren Fluidtemperaturen zwischen 15,7 C und 21,2 °C. Die geringsten Temperaturen wurden im Januar aufgezeichnet.

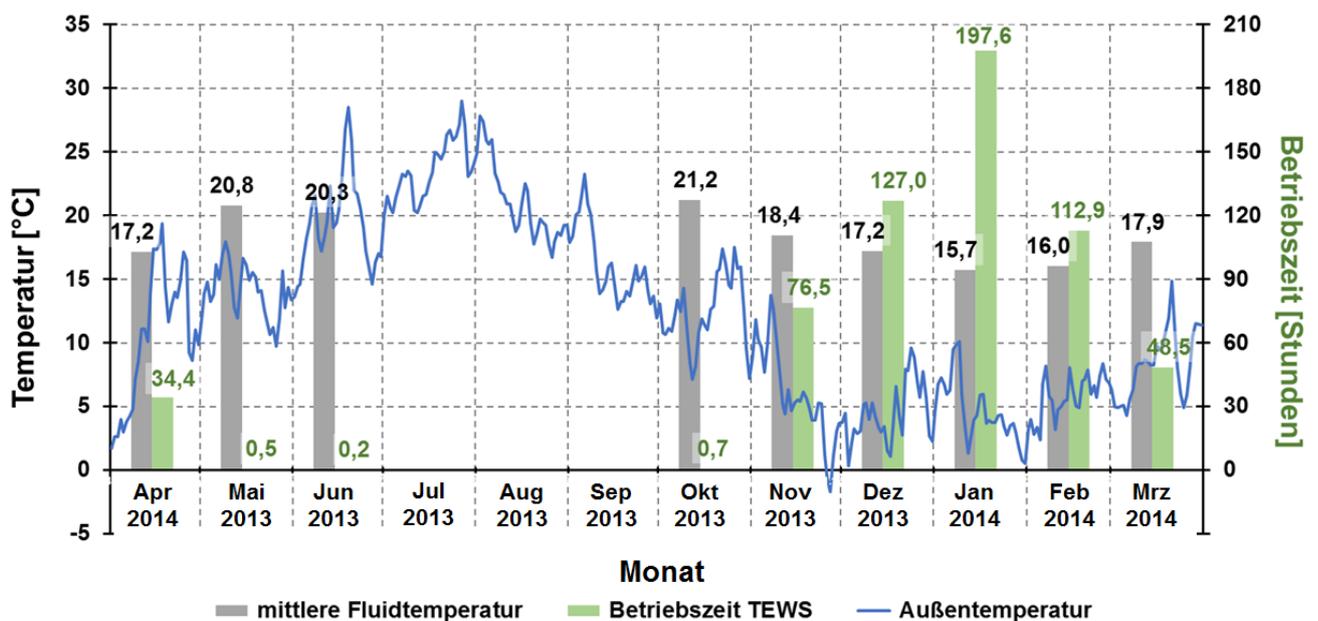


Abbildung 13: Übersicht der mittleren monatlichen Fluidtemperaturen und des Verlaufs der Außentemperatur in Heubach. Die grünen Balken stellen die reine Betriebszeit der EWS dar.

### 3 Methodik

#### 3.1. Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  (in  $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ ) bezeichnet eine auf die Masse bezogene Wärmekapazität und gibt somit die Wärmeenergie pro kg und K an, die ein Material speichert (EICHLER, 2014). Die Messungen der spezifischen Wärmekapazität erfolgten mit dem dynamischen Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter *Calvet Calorimeter C80* der Firma *Setaram*. Der Aufbau ist in Abbildung 14 dargestellt. Das Kalorimeter besitzt zwei zylinderförmige Kammern (Referenzkammer und Probenkammer). Diese werden von jeweils einem 3D Sensor, welcher aus neun Ringen mit konzentrisch angelegten Wärmefühlern besteht, umschlossen (Datenblatt C80, 2014).

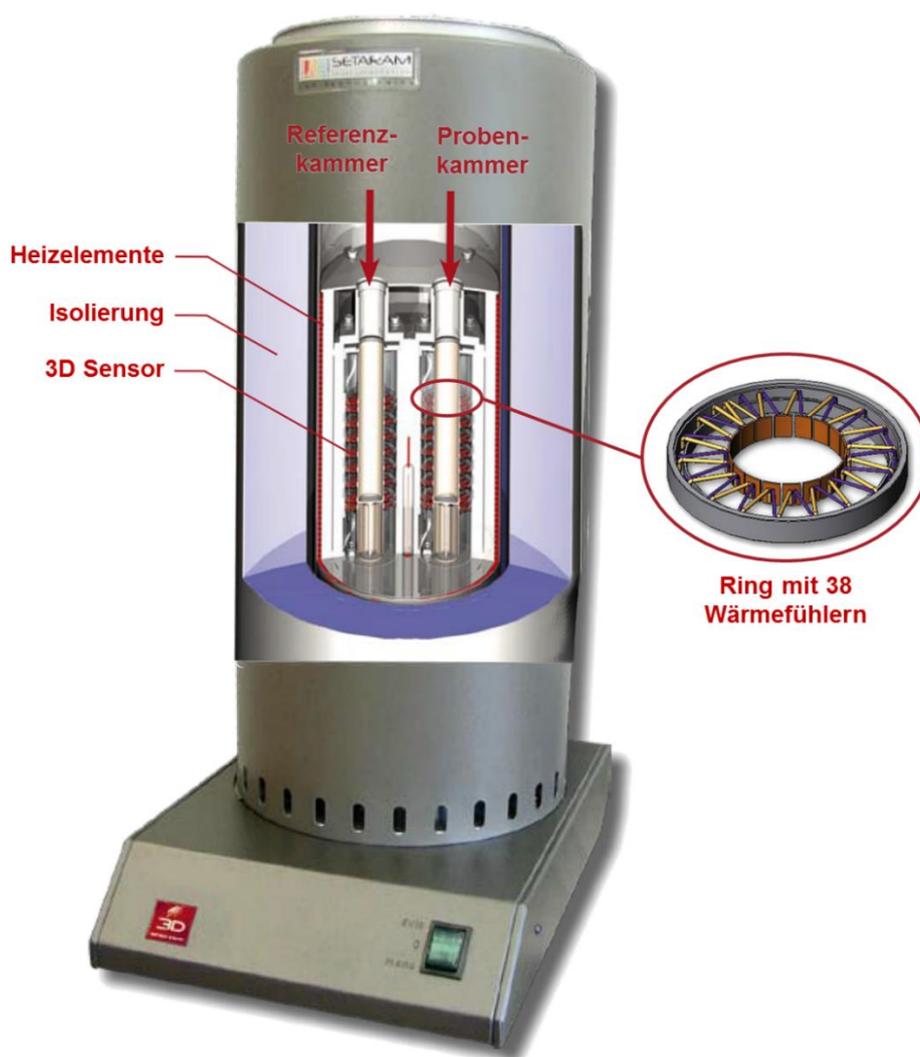


Abbildung 14: Aufbau des C80-Kalorimeters. Die ringförmig angeordneten 3D Sensoren umschließen die luftgefüllte Referenzkammer und die Probenkammer (verändert, nach Datenblatt C80, 2014).

Im Zuge des Messvorgangs werden die leere Referenzkammer und die Probenkammer mitsamt der Gesteinsprobe gleichmäßig bis zu einer voreingestellten Temperatur erhitzt. Dabei werden neben der Steigung des Temperaturverlaufs (Heizrate)  $dT/dt$ , auch die Wärmeströme in der Referenzkammer  $q_r$  und der Probenkammer  $q_p$  registriert und aufgezeichnet. Die Differenz beider Wärmeströme ist dabei proportional zur spez. Wärmekapazität  $c_p$  des Probenmaterials. Mit der geräteabhängigen Kalibrationsfunktion  $S(T)$  und der Masse  $m$  der Probe kann die spezifische Wärmekapazität anhand folgender Formel ermittelt werden (CLAUSER ET AL. 2006):

$$c_p(T) = \frac{q_p - q_r}{S(T) \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}} \quad (5)$$

Für die Auswertung der Kalorimetermessungen mit der Software *CALISTO Processing* ist es außerdem notwendig die Grundlinie des Wärmestroms mit einer sogenannten *Leermessung* zu bestimmen. Diese Messung wird bei gleichen Grundeinstellungen (Zieltemperatur, Heiz,- und Abkühldauer) durchgeführt, wobei aber beide Kammern leer bleiben.

Untersucht wurde Probenmaterial, das bei der Bohrung für die mitteltiefe Erdwärmesonde in Heubach zu Tage befördert wurde. Neben Bohrklein (engl. *cuttings*) wurden auch sogenannte *Plugs*, aus Bohrkernen gewonnene zylindrische Probenkörper mit einem Durchmesser von 1 cm gemessen. Vor dem Einsetzen in das Kalorimeter lagerten die Proben min. 48 Stunden lang im Trockenschrank bei 105 °C. Die Abkühlung erfolgte im Exsikkator. Dadurch wird sichergestellt, dass die resultierende Wärmekapazität der Probe nicht durch einen möglichen Wassergehalt beeinflusst wird. Die Messung der spez. Wärmekapazität erfolgte für den Temperaturbereich zwischen 30 °C und 195 °C. Im Zuge eines GRT (*Geothermal Response Test*) konnte eine ungestörte mittlere Soletemperatur im zirkulierendem Fluid der Sonde von 24,5 °C ermittelt werden. Die spez. Wärmekapazitäten werden daher aus den Messwerten für eine Temperatur von 25 °C extrapoliert. Dies wird in Abbildung 15 exemplarisch für eine Messung (Probe: Bohrklein aus 240 m Teufe) dargestellt. Trägt man die Proben temperatur gegen die spezifische Wärmekapazität auf, erhält man eine Messreihe mit annähernd linearem Verlauf. Die beobachtete Abweichung der Linearität kann dadurch verursacht werden, dass bei diesen vergleichsweise hohen Temperaturen eine größere Wärmemenge erforderlich ist, um die innere Energie des Probenmaterials zu erhöhen (KLEINER, 2003). Die Extrapolation wird anhand einer linearen Ausgleichsgerade für den Temperaturbereich 40 °C bis 55 °C und zweier Regressionsgeraden für den Temperaturbereich 49 °C bis 183 °C durchgeführt. Die lineare Ausgleichsgerade (orange Kurve, 49 °C bis 183 °C) weist dabei einen Korrelationskoeffizienten  $R$  von 0,9768 auf. Die polynomische Funktion 2. Ordnung (blaue Kurve, 49 °C bis 183 °C) hingegen beschreibt die Messwerte in diesem Temperaturbereich mit einem Korrelationskoeffizienten  $R$  von 0,9986.

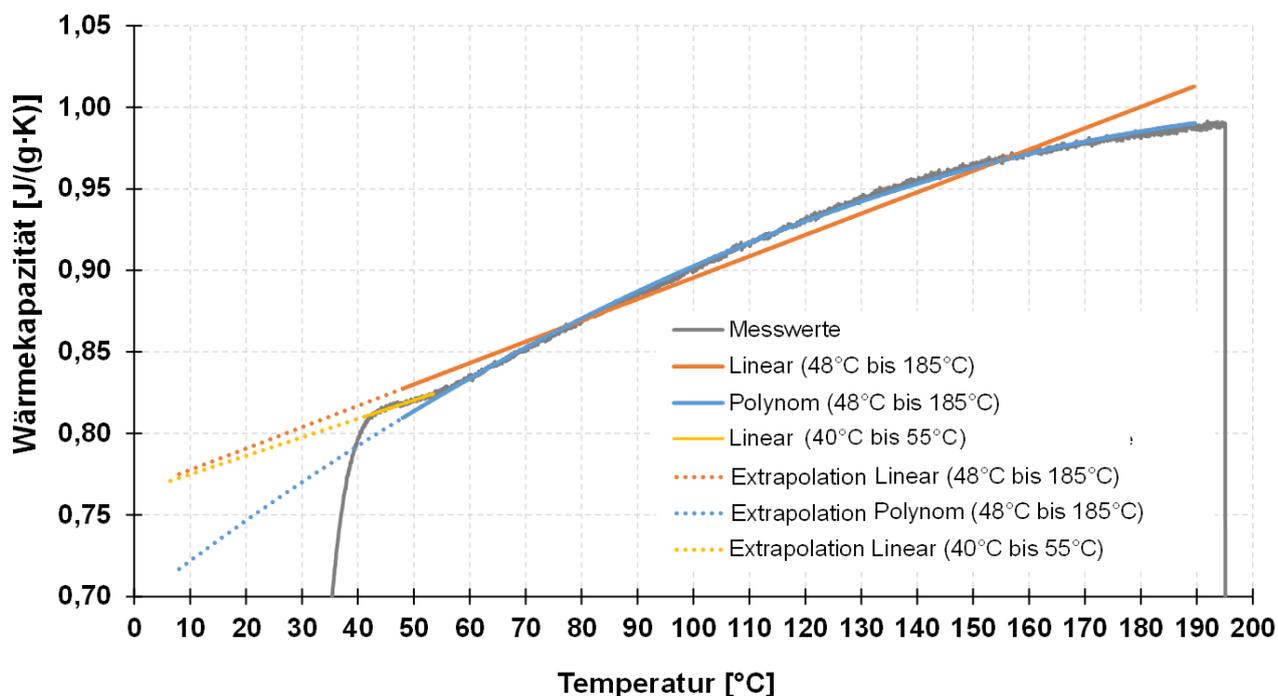


Abbildung 15: Extrapolation der spez. Wärmekapazität auf 25 °C durch zwei lineare Ausgleichsgeraden und eine polynomische Regressionsgerade 2. Grades

Eine separate Betrachtung der beiden Temperaturbereiche erfolgte aufgrund einer bei allen Messungen beobachteten Änderung des Verlaufs der Messwerte bei etwa 53 °C (siehe graue Kurve in Abbildung 15). Es soll dadurch eine mögliche Auswirkung der Extrapolation der Messwerte bewertet werden.

Die Berechnung der, für die numerische Simulation mit *FEFLOW* relevanten, volumetrischen Wärmekapazität  $c_v$  [ $\text{MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ] erfolgte nach folgender Formel:

$$c_v = \rho \cdot c_p \quad (6)$$

Hierzu wurden die von WELSCH (2012) bestimmten Reindichten  $\rho$  der Gesteinsproben herangezogen.

### 3.2. Modellerstellung und Eingangsparameter

Die Modellentwicklung erfolgte in mehreren Schritten (Abbildung 16). Auf Basis von Literaturwerten, Ergebnissen aus einem GRT und im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Labormessungen wurden mehrere Modelle mit verschiedenen Konstellationen der Untergrundparameter (Wärmeleitfähigkeit, volumetrische Wärmekapazität, geothermischer Gradient) erstellt.

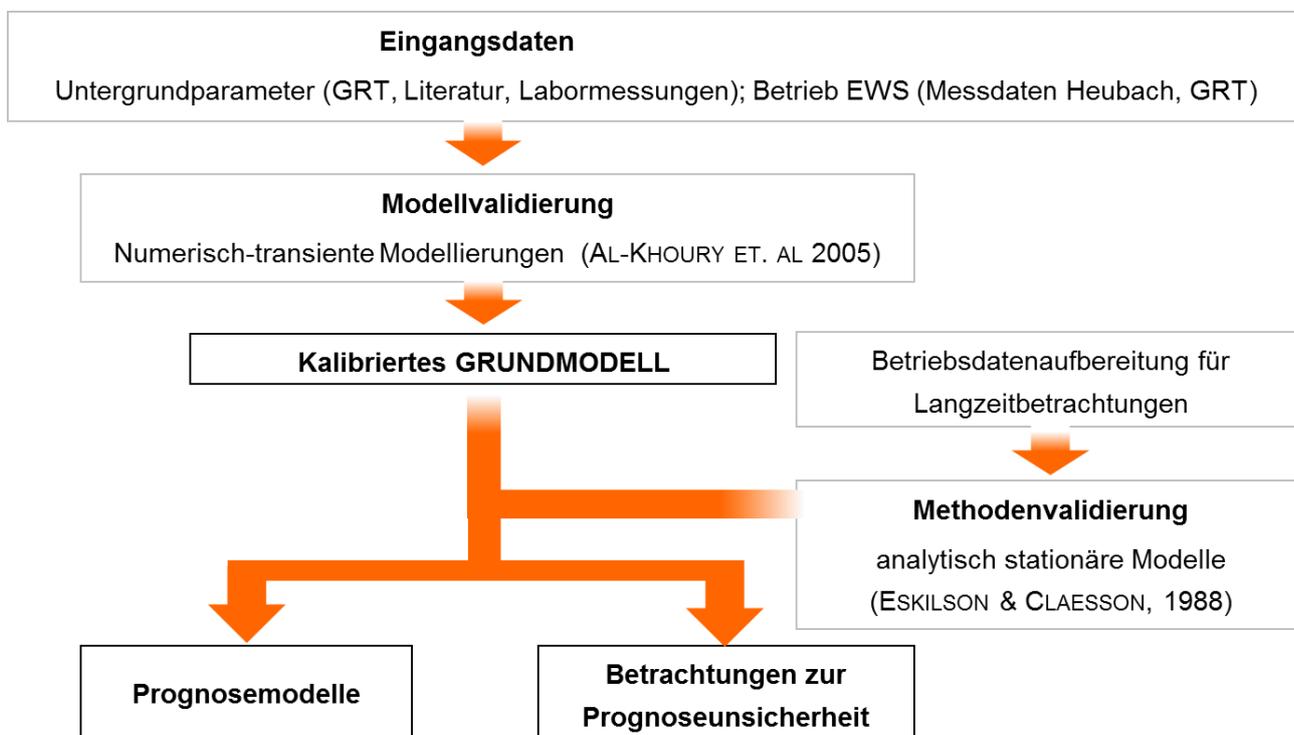


Abbildung 16: Übersicht zur Modellentwicklung

Anhand der in Heubach kontinuierlich aufgezeichneten Betriebsdaten, wie Soletemperaturen und Durchflussraten des zirkulierenden Fluids, wurde iterativ das Modell ermittelt, welches die gemessenen Daten bestmöglich wiedergibt. Durch eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit den simulierten Temperaturverläufen und Wärmemengen konnten die angenommenen Untergrundparameter validiert, und somit ein kalibriertes (Unter-)Grundmodell erstellt werden. Der hierfür verwendete Lösungsansatz nach AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) ist aber wegen des hohen Rechenaufwandes nicht für darauf aufbauende Langzeitbetrachtungen geeignet (siehe Kapitel 2.1). Daher wurden verschiedene Methoden entwickelt, die Eingangsdaten derart zu modifizieren, um eine für den Lösungsansatz nach ESKILSON & CLAEISSON (1988) geeignete Eingangsdatenbasis zu schaffen. Zu den, zur Steuerung des simulierten Betriebs der EWS aufbereiteten Daten, zählen die Durchflussrate und die Wärmeentzugskurve (im Folgenden als Lastgang bezeichnet). Die verschiedenen Aufbereitungsmethoden (siehe Kapitel 3.2.2) wurden an Modellen auf Grundlage der zuvor validierten Untergrundparameter erprobt und mit den Messwerten des realen Betriebsfalls abgeglichen. Anhand

der Methode mit der besten Übereinstimmung sind prognostizierte Lastgänge für Fälle mit unterschiedlichem Wärmebedarf generiert worden. Diese modifizierte Heizlastkurven basieren auf einem von der HSE zur Verfügung gestellten Lastgang (HSE 2011) und dienen bei der in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Betrachtung zu Prognoseunsicherheiten als Betriebsparameter. Des Weiteren fand im Zuge dieser Unsicherheitsbetrachtung auch eine Untersuchung der Einflüsse durch die Parameter Wärmeleitfähigkeit, vol. Wärmekapazität und des geothermischen Gradienten statt. Die bisherigen Betriebserfahrungen haben ergeben, dass dem Untergrund mit einer Leistung von durchschnittlich 85 kW Wärme entzogen wurde. Für die in Kapitel 4.2.4 vorgestellten Ergebnisse der Prognosemodellierung (PM.01) wurde der von HSE zur Verfügung gestellten Lastgang (HSE 2011), welcher auch als Auslegungsgrundlage für die mitteltiefe EWS diente, an diese Leistung angepasst und als Randbedingung für den Betrieb eingelesen. Zusätzlich ist eine Prognosemodellierung (PM.02) auf Basis der in Heubach von April 2013 bis März 2014 gemessenen Lastkurve durchgeführt worden.

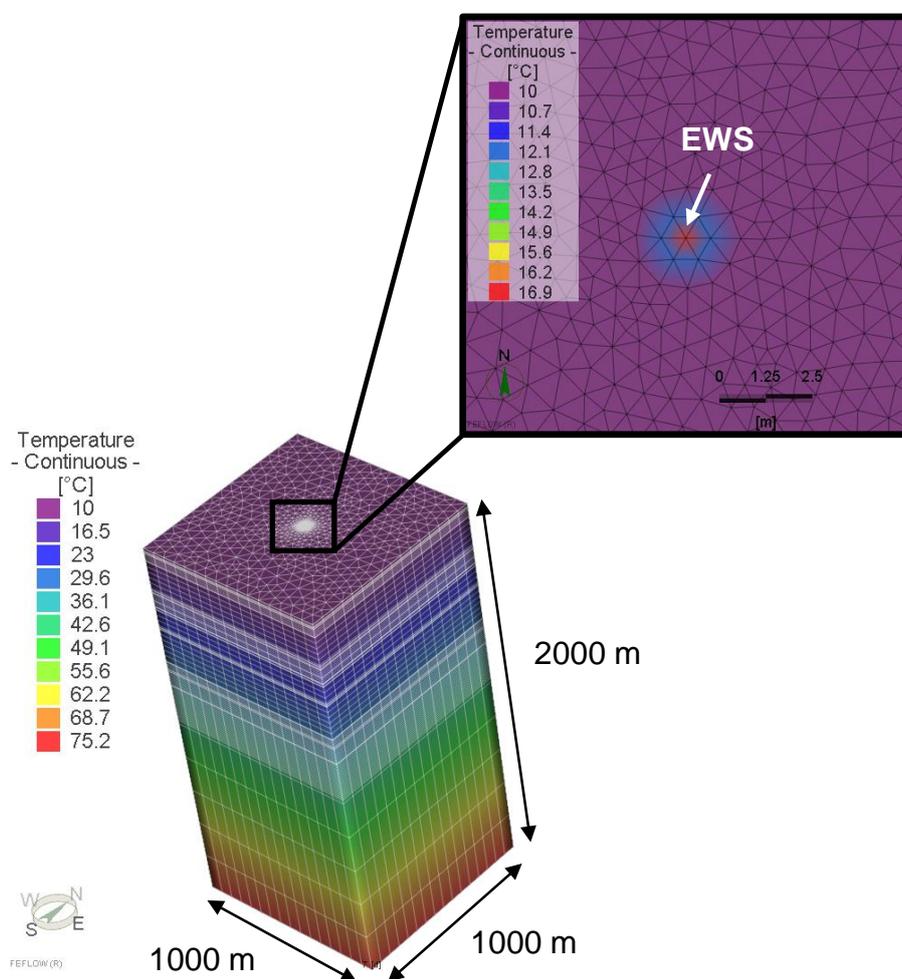


Abbildung 17: Aufbau des Grundmodells. Der angelegte Temperaturgradient von  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  hat sich im Zuge der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Validierung der Untergrundparameter bestätigt.

---

Bei dem allgemeinen Modellaufbau ist von einem rein konduktivem Wärmetransport ausgegangen worden. Für den wassergesättigten Untergrund wurde eine Porosität von 1 % festgelegt. Die 773 m lange Koaxialsonde, mit einem Einlass im Ringraum (CXA) ist in ein Modell mit einer quadratischen Grundfläche von einem km<sup>2</sup> und einer Tiefe von 2 km eingebettet worden (siehe Abbildung 17). Für die Oberfläche wurde eine Temperatur von 10 °C angenommen.

### 3.2.1. Validierung der Untergrundparameter

Die Validierung der angenommenen Temperaturverteilung im Untergrund und der gesteinspezifischen Kennwerte erfolgte anhand der Messwerte aus einem GRT und der dokumentierten Betriebsdaten in Heubach. Zu diesem Zweck wurden die Versuchsdurchführung des GRT und der laufende Betrieb der mitteltiefen Erdwärmesonde (EWS) in Heubach nachmodelliert. Um ein Modell zu erstellen, das möglichst genau den realen Betriebsfall nachbildet, sind die aufgezeichneten Messwerte direkt als Randbedingung der EWS eingelesen worden. Dazu zählten die Zeitreihen der thermischen Leistung, der Einlasstemperatur in die Sonde sowie die aus den Messwerten der Einlass- und Auslasstemperatur ermittelte Temperaturdifferenz. Die vorgegebene Durchflussrate aller Simulationen zur Modellvalidierung basiert ebenfalls auf den in Heubach mitgeschriebenen Messdaten. Diese verzeichneten bei einem Stillstand der Umwälzpumpe einen Durchfluss von 0 l/s. Programmbedingt ergaben sich daraus fehlerhafte Werte. Für die Modelle wurde daher bei einem Stillstand der Umwälzpumpe der Durchfluss auf 0,01 l/s gedrosselt. Durch die Wahl dieses vergleichsweise sehr geringen Wertes kann eine korrekte Berechnung durch *FEFLOW* gewährleistet und gleichzeitig der Stillstand der Umwälzpumpe simuliert werden. Bei den Modellierungen kam der Lösungsansatz nach AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) zum Einsatz, weshalb vergleichsweise kurze Betrachtungszeiträume herangezogen wurden. Es sind die Werte von zwei unterschiedlichen Messreihen zu jeweils sieben Tagen verwendet worden. Als Referenz dienten die Zeitspannen 14.11. bis 20.11.2013 und 25.11. bis 01.12.2013. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Parameterkonfigurationen der Modelle.

Tabelle 1: Parameterkonfiguration der Simulationen zur Modellvalidierung. In allen Modellen wurden als Randbedingung für den Durchfluss die Messwerte aus Heubach verwendet.

Modellnummer	EWS Randbedingung	Referenz-Zeitraum	Modellaufbau	$\lambda$ [W / (m·K)]	$c_v$ [MJ / (m <sup>3</sup> ·K)]	Geotherm. Gradient [°C/100m]
MV.01	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	25. Nov. 2013 - 01. Dez.2013	Einschichtmodell	3	5,14	3,7
MV.02	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	25. Nov. 2013 - 01. Dez.2013	Einschichtmodell	3	2,52	3,7
MV.03	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	25. Nov. 2013 - 01. Dez.2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,7
MV.04	thermische Leistung	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,7
MV.05	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,7
MV.06	Temperaturdifferenz zwischen Einlass,- und Auslasstemperatur	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,7
MV.07	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,26
MV.08	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,15	3,26
MV.09	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Mehrschichtmodell	nach Schichten	nach Schichten	3,26
MV.10	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate an Wärmepumpenzyklus angepasst	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	2,8	2,30	3,26
MV.11	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate an Wärmepumpenzyklus angepasst	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,26
MV.12	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate an Wärmepumpenzyklus angepasst	14 Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Mehrschichtmodell	nach Schichten	nach Schichten	3,26

Tabelle 2: Übersicht der Untergrundparameter zur Erstellung des Mehrschichtmodells: volumetrische Wärmekapazitäten ( $c_v$ ) (siehe Kap. 4.1) und Wärmeleitfähigkeiten ( $\lambda$ ) aus WELSCH (2012) entsprechend der geologischen Schichten.

Teufenabschnitt bis ... [m]	Geologie	$\lambda$ [W / (m·K)]	$c_v$ [MJ / (m <sup>3</sup> ·K)]
-15	quartäre Überdeckung	1,50	1,60
-25	Hornblende- Biotit-Gneis, verwittert	2,04	2,09
-70	Hornblende- Biotit-Gneis (mit Apliten, Pegmatiten und mylonitischen Lagen)	2,79	2,16
-230	Biotit Gneis (zT Chlorit-Biotit-Gneis)	2,57	2,16
-245	granitoider Gneis	3,24	2,02
-290	Biotit Gneis	2,57	2,15
-322	Biotit (Glimmer) Schiefer / Biotit Gneis	2,39	2,10
-326	Ton mit Gneisgrus	1,50	2,14
-340	Biotit Schiefer	2,16	2,10
-440	feinkörniger, schwarzgrüner Gneis	3,73	2,31
-450	feinkörniger, mylonitischer Biotitschiefer (mit wenigen Quarzgängen)	2,38	2,10
-635	Biotit Gneis (feinkörnig, mit Apliten)	3,73	2,15
-680	Rhyolith	2,43	2,08
-760	Biotit Gneis (feinkörnig, mit Apliten und Quarzgängen)	3,73	2,15
-774	granitoider Gneis, gebändert	3,24	2,02
-2000	Kristallin (ann.: Gneise)	2,90	2,15

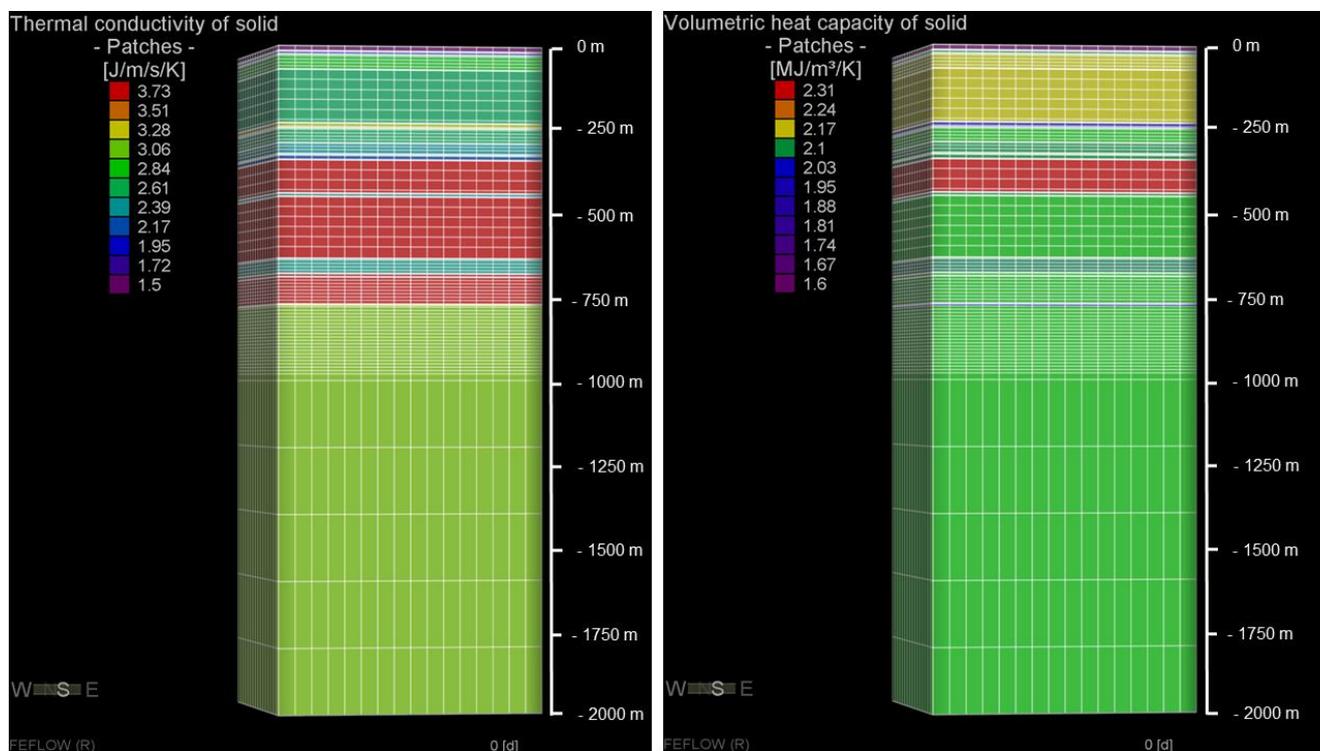


Abbildung 18: Aufbau des Mehrschichtmodells: Tiefenverteilung der Wärmeleitfähigkeiten (links) und der volumetrischen Wärmekapazität (rechts).

Die Wahl der verschiedenen Untergrundparameter erfolgte auf Basis von Labormessungen der Wärmekapazitäten (siehe Kap. 4.1.), der in WELSCH (2012) ermittelten Gesteinskennwerte, der durchschnittlichen Kennwerte nach VDI 4640 (Blatt1, 2010) und der Ergebnisse aus einem, im Zuge der Projektentwicklung durchgeführten GRT (*geothermal response test*, GRT (2012)). Bei den Einschichtmodellen sind die Wärmeleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität als Mittelwert über die gesamte Modelltiefe festgelegt worden. Anhand der Validierungssimulationen konnten diese Werte gegebenenfalls entsprechend angeglichen werden. Das Mehrschichtmodell (siehe Abbildung 18) basiert auf einem Schichtverzeichnis, welches vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie erstellt wurde (FRITSCH ET AL. 2012). Den geologischen Schichten wurden dabei die entsprechenden Gesteinskennwerte (Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität) zugewiesen (siehe Tabelle 2).

### 3.2.2. Anpassung der EWS-Betriebsparameter für Langzeitbetrachtungen

Wegen der erheblich schnelleren Simulationszeiten basieren die Langzeitbetrachtungen auf Modellen mit dem Lösungsansatz nach ESKILSON & CLAEISSON (1988). Mit diesem Verfahren können jedoch kurzfristige Lastwechsel, wie sie im realen Betrieb auftreten, nicht fehlerfrei simuliert werden (siehe Kapitel 2). Die Schwierigkeit bei der Modellerstellung lag demnach darin, den vorgegebenen Lastgang so aufzubereiten, dass sowohl eine korrekte Berechnung, als auch eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den in Heubach gemessenen Fluidtemperaturen und entzogenen Wärmemengen erzielt wird. Die Beziehung der thermischen Leistung ( $P_{th}$ ), des Durchflusses  $q$  [ $m^3/s$ ] und der Fluidtemperaturen ergibt sich aus:

$$P_{th} = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (7)$$

Die Dichte  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] und die spez. Wärmekapazität  $c_p$  [ $J/(kg \cdot K)$ ] beziehen sich dabei auf das Wärmeträgermedium, welches im Fall der mitteltiefen EWS in Heubach Wasser darstellt. Für die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  [K] wird die Einlasstemperatur des Wärmeträgermittels von der Auslasstemperatur subtrahiert. Die Leistung stellt die Energiemenge pro Zeiteinheit [ $J/s$ ] dar. Ihre Maßeinheit ist ein Watt (mit  $1 W = 1 J/s$ ). Daraus kann die Energie- bzw. Arbeitseinheit (Wärmemenge) kWh abgeleitet werden (KONSTANTIN 2007). Um eine annähernd gute Übereinstimmung zwischen realen Betriebsdaten und den Ergebnissen aus den Modellierungen zu gewährleisten, musste bei der Entwicklung der Methode zur Datenaufbereitung die in Formel (7) beschriebenen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Größen berücksichtigt werden. Für den simulierten EWS-Betrieb wurden der gemessene Lastgang und die Durchflussraten modifiziert. Als Referenzzeiträume dienten die Woche von 14. Nov. 2013 bis 20. Nov. 2013 und das Jahr vom 01. April 2013 bis 31. März 2014. Dabei konnten

anhand der modifizierten Lastgänge von zwei unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden, im Folgenden *Mittelwert-Methode* und *Zyklen-Methode* genannt, gute Ergebnisse erzielt werden.

### 3.2.2.1. Mittelwert-Methode

Wird die Leistung gegen die Zeit aufgetragen, kann die Wärmemenge auch als Integral des Lastgangs beschrieben werden. Bei der *Mittelwert-Methode* wird das Rechteckverfahren angewandt, um anhand der Flächeninhalte von Rechtecken das Integral zu approximieren. Dabei gilt:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^{n-1} \frac{b-a}{n} \cdot f\left(a + i \cdot \frac{b-a}{n} + \frac{1}{2} \cdot \frac{b-a}{n}\right)$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} \frac{b-a}{n} \cdot f\left(a + \left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{b-a}{n}\right) \quad (8)$$

Die Berechnungen beruhen dabei auf dem Mittelwertsatz der Integralrechnung. Dieser besagt, dass für eine positive, stetige Funktion in einem bestimmten Intervall  $[a,b]$  ein Punkt  $\xi$  existiert, sodass das Rechteck mit den Seitenlängen  $b - a$  und  $f(\xi)$  den gleichen Flächeninhalt besitzt, wie die Fläche unter dem Graphen. Dabei ist  $\xi$  der Mittelwert der Funktionswerte im Intervall  $[a,b]$  und  $n$  die Anzahl der Intervalle (FORSTER 2008).

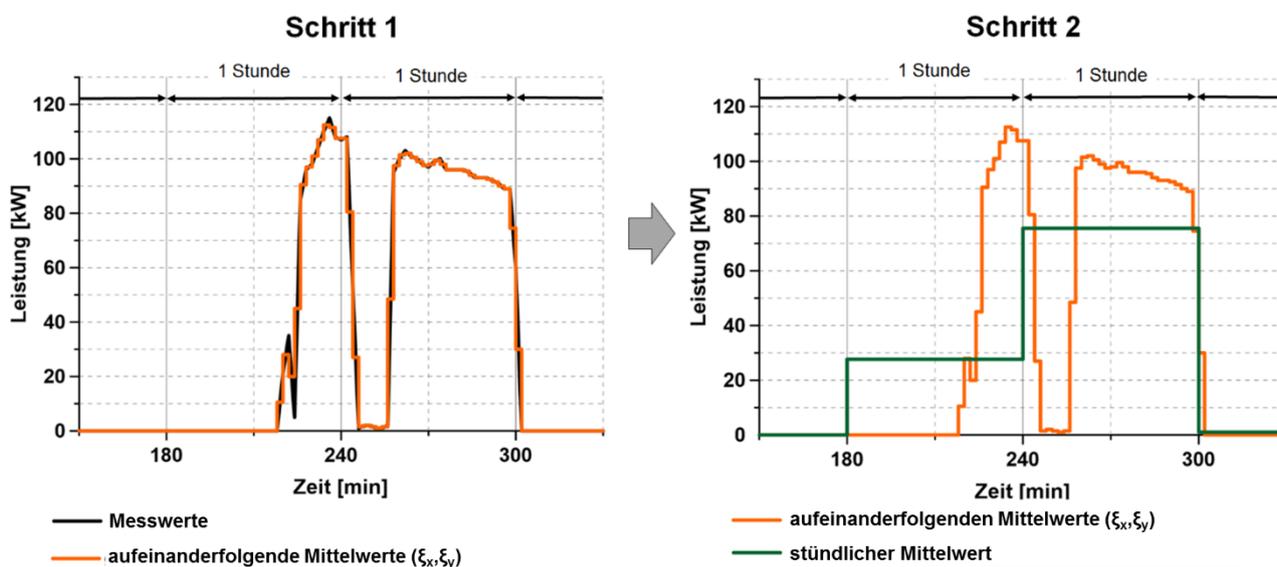


Abbildung 19: Die zwei wesentlichen Schritte der Eingangsdatenaufbereitung nach der Mittelwert-Methode. Links: Die Bildung des Mittelwertes von zwei aufeinander folgenden Datenpunkten erzeugt eine geglättete Zeitreihe der thermischen Leistung (orange Kurve). Rechts: Der nach der

*Mittelwert-Methode* generierte Lastgang (dunkelgrüne Kurve) ergibt sich aus der Rechteckfunktion mit 1-Stunden-Intervallen.

Für den ersten Schritt der *Mittelwert-Methode* sind zunächst die Mittelwerte von jeweils zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Messwerten gebildet worden. Beim Rechteckverfahren wurden die Seitenlängen durch jeweils zwei aufeinanderfolgende Mittelwerte  $[\xi_x, \xi_y]$  bestimmt. Die Rechteckfunktion hat dabei den gleichen Flächeninhalt, was damit auch einer gleichbleibenden Entzugsmenge (in [kWh]) entspricht, wie die Fläche unter dem Graphen der Messwerte (Lastgang). In Schritt zwei erfolgt eine Zusammenfassung der Rechteckfunktion zu größeren Intervallen, wobei der Flächeninhalt ebenfalls gleich bleibt. Abbildung 19 zeigt die zwei wesentlichen Schritte bei der Datenaufbereitung nach der *Mittelwert-Methode*. Mittels dieser Methode wurden zwei neue, vereinfachte Lastgänge erstellt, einer mit einem Intervall von einer Stunde und einer mit einem Intervall von acht Stunden. In Abbildung 19 ist der resultierende Lastgang für 1-Stunden-Intervalle dargestellt. Die durch diese Methode generierte geglättete Heizlastkurve diente als Randbedingung für den simulierten Betrieb der EWS. *FEFLOW* bietet die Möglichkeit, den Betrieb der Umwälzpumpe über eine Zeitreihe zu steuern. Hierfür wurde die Zeitreihe der gemessenen Durchflussrate ebenfalls mithilfe der *Mittelwert-Methode* aufbereitet und als Betriebsparameter bei der Modellierung berücksichtigt.

### 3.2.2.2. Zyklen-Methode

Für die *Zyklen-Methode* wurde der Lastgang in 8-Stunden-Zyklen unterteilt. Die Datenaufbereitung erfolgte für jeden Zyklus separat.

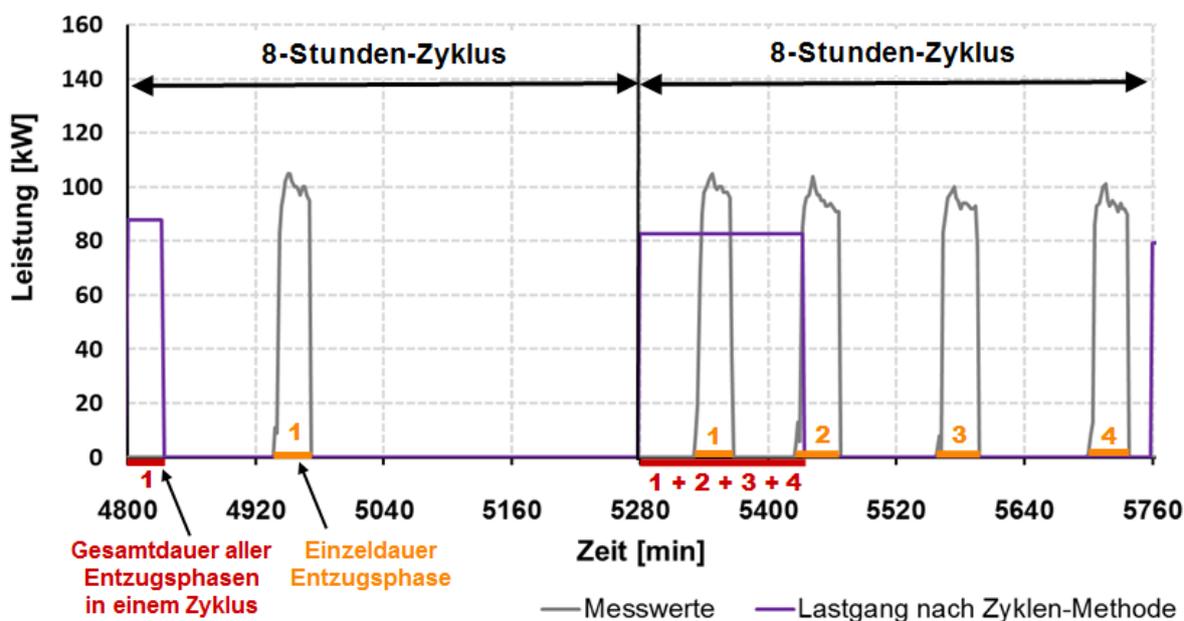


Abbildung 20: Prinzip der Datenaufbereitung nach der Zyklen-Methode. Die Peaks der grauen Kurve stellen die einzelnen Entzugsphasen der mitteltiefen EWS in Heubach dar. Um einen

*gleichmäßigeren Lastgang zu erhalten, wurden alle Entzugsphasen innerhalb von acht Stunden direkt hintereinander geschaltet (lila Kurve). Die zu entziehende thermische Leistung ergibt sich aus dem Mittelwert der einzelnen Entzugsphasen innerhalb eines Zyklus.*

Um einen gleichmäßigen Entzug zu erreichen, wurde zunächst eine mittlere thermische Leistung je Zyklus gebildet und als Entzugsleistung für diesen Zeitabschnitt festgelegt. Für die Berechnung des Mittelwertes wurden nur jene Werte der Heizlast herangezogen, in denen die EWS in Betrieb war. Um kurzfristige Lastwechsel zu vermeiden, sind alle Phasen mit aktivem Entzug zu Beginn eines jeden Zyklus hintereinander geschaltet worden. Hierfür wurde die Gesamtdauer aller Entzugsphasen innerhalb dieser acht Stunden aufsummiert und an den Anfang eines jeden Zyklus gestellt (siehe Abbildung 20). Auch bei dieser Aufbereitungsmethode entsprechen die Flächen unter der neuen Leistungsfunktion und damit die entzogene Wärmemenge eines jeden Zyklus der Summe der Flächen unter der eigentlichen Messwertreihe. Die gemessene Durchflussrate wurde nach derselben Methode aufbereitet und anschließend als Betriebsbedingung für die Simulation festgelegt.

Die Berechnung der modifizierten Lastgänge und Durchflussraten nach der Mittelwert-Methode und nach der Zyklen-Methode erfolgte mittels der Programme MATLAB R2013a und MS Excel.

### 3.2.3. Modellerstellung für die Unsicherheitsbetrachtungen

Die Unsicherheitsbetrachtung soll Prognoseunsicherheiten bei der numerischen Modellierung aufgrund von abweichenden Untergrund- und Betriebsparametern quantifizieren. Als Fallbeispiel wurde hier ebenfalls die mitteltiefe EWS in Heubach herangezogen. Die Unsicherheit der untergrundbezogenen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, volumetrische Wärmekapazität und geothermischer Gradient) lässt sich durch einen GRT oder EGRT (*Enhanced Geothermal Response Test*) einschränken. Dieser kann aber erst an einer bereits ausgebauten Bohrung durchgeführt werden. Vor allem zur Dimensionierung größerer Erdwärmeeinrichtungen ist es empfehlenswert, das Verhalten der Erdwärmesonde(n) unter angenommenen Randbedingungen bereits vor einem Abteufen der Bohrung(en) über einen entsprechenden Zeitraum zu simulieren. Für die Modellierung der mitteltiefen EWS in Heubach wird ausschließlich von einem konduktiven Wärmetransport ausgegangen. Dieser lässt sich anhand einer dreidimensionalen und temperaturabhängigen Differentialgleichung beschreiben (STOBER & BUCHER 2012). Aus (1) ergibt sich der rein durch Wärmeleitung bedingte zeitliche und räumliche Temperaturverlauf im Untergrund mit:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + H_{EWS} \quad (9)$$

$H_{EWS}$  beschreibt eine externe Quelle/Senke. Durch ein Variieren des Lastgangs und somit auch des Wärmeeintrags im Untergrund wird dieser Term der Gleichung berücksichtigt. Zudem erfolgte die Untersuchung der Auswirkung einer Variation von Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ), volumetrischer

Wärmekapazität ( $\rho c$ ) und dem geothermischen Gradienten ( $\nabla^2 T$ ). Damit wurden alle direkten Einflussgrößen bei der Unsicherheitsbetrachtung berücksichtigt. Der Wertebereich der untersuchten Parameter ist weitgehend auf Grundlage von Literaturwerten festgelegt worden. Die Variation der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität basieren auf den in WELSCH (2012) ermittelten Gesteinskennwerten des Böllsteiner Odenwaldes. In WELSCH (2012) wurden ebenfalls die bei der Tiefenbohrung in Heubach gewonnenen Gesteinsproben (Bohrkerne, Bohrklein) untersucht. Die Kennwerte dieser Gesteine sind bei der Bemessung des zu untersuchenden Wertebereichs nicht eingeflossen, da grundsätzlich von einem Wissensstand in der Planungsphase des Projekts ausgegangen wurde. Bei der Wärmekapazität hingegen sind neben den empirisch ermittelten Wärmekapazitäten aus WELSCH (2012) auch die in Kapitel 4.1 vorgestellten Ergebnisse der im Zuge der vorliegenden Arbeit durchgeführten Kalorimetermessungen beachtet worden. Die für die Unsicherheitsbetrachtung herangezogenen Kennwerte sollen möglichst einen breiten Wertebereich abdecken. Eine geeignete Methode um dies zu erreichen, ist die Verwendung der Standardabweichung. Die Standardabweichung ( $\sigma$ ) ist die Quadratwurzel der Varianz und damit ein Maß um die Streuung von Messwerten um ihren Erwartungswert ( $\mu$ ) zu quantifizieren. Für die Ermittlung der Varianz werden die Quadrate der Abweichungen vom Mittelwert zunächst mit ihren Auftretenswahrscheinlichkeiten gewichtet und dann aufsummiert. Dadurch wird verhindert, dass sich negative und positive Abweichungen aufheben (BÄTTIG 2015).

$$\sigma^2 = (x_1 - \mu)^2 \cdot \mathbb{P}(X = x_1) + (x_2 - \mu)^2 \cdot \mathbb{P}(X = x_2) + \dots \quad (10)$$

Die Varianz stellt damit die erwartbare quadratische Abweichung vom Mittelwert dar und kann für stete Wahrscheinlichkeitsmodelle beschrieben werden durch (BÄTTIG 2015):

$$\text{Varianz} = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x) dx \quad (11)$$

Dabei ist  $\mu$  der Mittelwert (Erwartungswert) der Messwerte (hier Wärmeleitfähigkeiten bzw. vol. Wärmekapazitäten) und  $f(x)$  die Dichtefunktion. Ein stetes Wahrscheinlichkeitsmodell anhand dessen die Streuung der Werte veranschaulicht werden kann ist die Normalverteilung (*Gauss-Verteilung*) mit der Dichtefunktion:

$$f_{\text{Gauss}}(x | \bar{x}, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp \left\{ -0,5 \cdot \left( \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

Der Parameter  $\bar{x}$  stellt dabei den Modus dar. Es ist der Median und auch der Mittelwert (Erwartungswert) der Normalverteilung (BÄTTIG 2015). Die Häufigkeitsverteilung sowie der glockenförmige Graph der Gauß-Verteilung der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt. Dabei ist für die Wärmeleitfähigkeit und für die volumetrische Wärmekapazität von einer Normalverteilung der Messdaten ausgegangen worden,

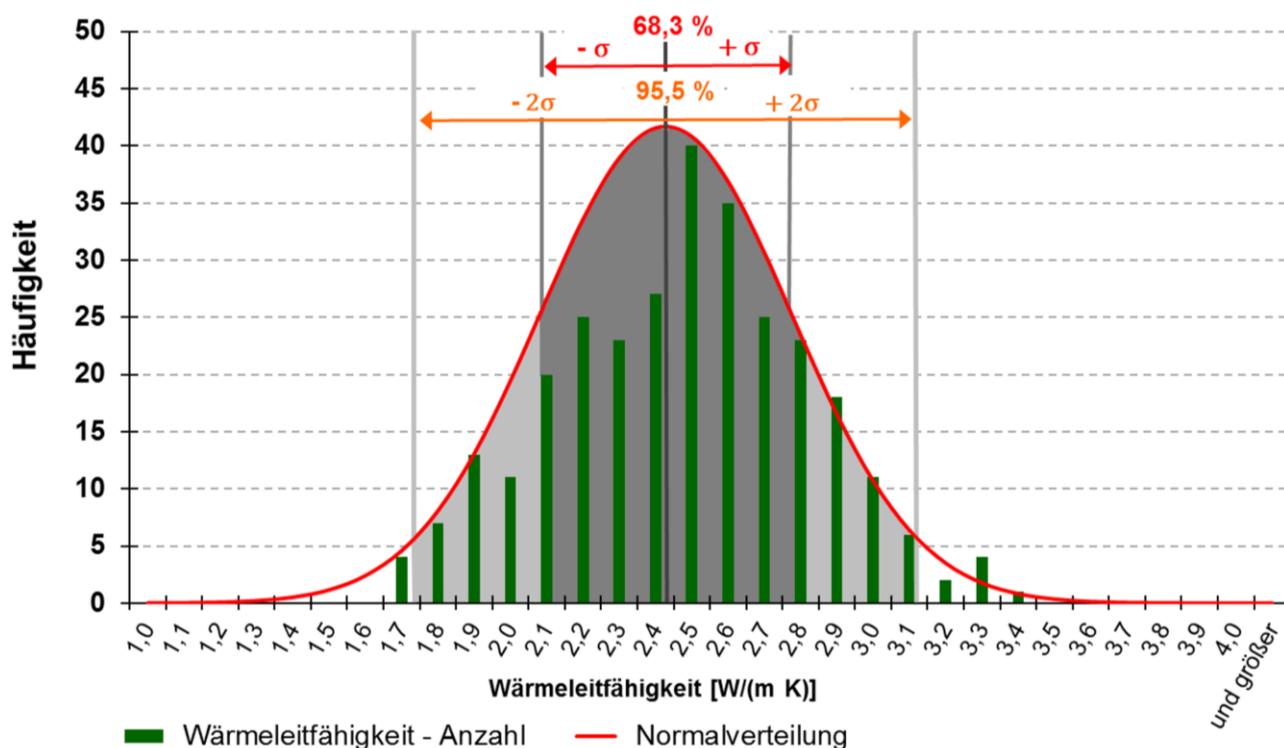


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der in WELSCH (2012) gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine des Böllsteiner Odenwaldes sowie der dazugehörige Graph der Normalverteilung.

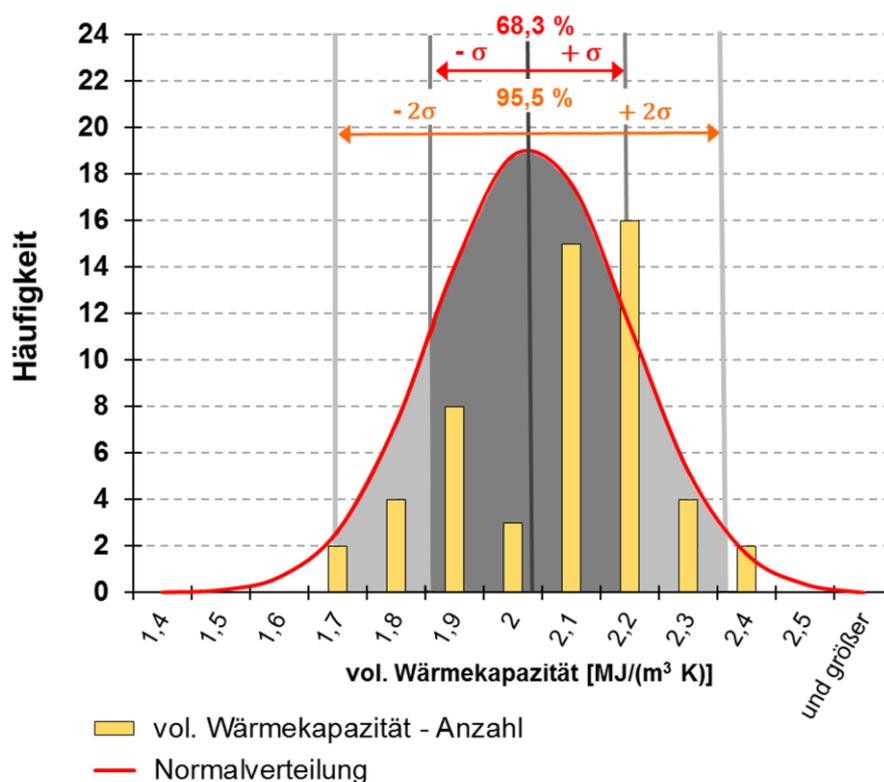


Abbildung 22: Häufigkeit je Klasse der Ergebnisse aus den Kalorimetermessungen und der in WELSCH (2012) berechneten volumetrischen Wärmekapazitäten.

Für einen Messwert  $x$  in einem normalverteilten Wertebereich gilt:

$$\mathbb{P}(\mu - \sigma < x \leq \mu + \sigma) = 0,6828 \quad (13)$$

$$\mathbb{P}(\mu - 2\sigma < x \leq \mu + 2\sigma) = 0,955 \quad (14)$$

$$\mathbb{P}(\mu - 3\sigma < x \leq \mu + 3\sigma) = 0,997 \quad (15)$$

Demnach liegen in einem normalverteiltem Modell die Werte mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,28 % zwischen  $\mu - \sigma$  und  $\mu + \sigma$  und mit 95,5 % Wahrscheinlichkeit zwischen  $\mu - 2\sigma$  bis  $\mu + 2\sigma$ . (BÄTTIG 2015). Ausgehend vom Mittelwert wurden nun die Werte für  $\mu - \sigma$ ;  $\mu + \sigma$ ;  $\mu - 2\sigma$  und  $\mu + 2\sigma$  der Wärmeleitfähigkeit und der vol. Wärmekapazität als Parameter für die Unsicherheitsbetrachtung festgelegt (Tabelle 3).

*Tabelle 3: Übersicht der gewählten Parameter der Wärmeleitfähigkeit und der vol. Wärmekapazität für die Unsicherheitsbetrachtung.*

	$\mu - 2\sigma$	$\mu - \sigma$	$\mu$	$\mu + \sigma$	$\mu + 2\sigma$
<b>Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]</b>	1,73	2,08	2,43	2,77	3,12
<b>vol. Wärmekapazität [MJ/(m<sup>3</sup>·K)]</b>	1,70	1,86	2,03	2,20	2,36

Die Variation des geothermischen Gradienten soll die üblichen Werte für Gebiete in Hessen, die außerhalb des Oberrheingrabens gelegen sind, umfassen. Der Oberrheingraben bildet mit Temperaturgradienten, die lokal wegen der geringen Mächtigkeit der Erdkruste bis zu  $> 10 \text{ °C}/100 \text{ m}$  erreichen können, eine sogenannte Wärmeanomalie (PRIBNOW & SCHELLSCHMIDT 2000). In der Bemessung der Parameter für die Sensibilitätsbetrachtung des geothermischen Gradienten sollen diese Gradienten daher nicht beachtet werden. Unter Annahme einer einheitlichen Temperatur an der Kruste-Mantel-Grenze, ergeben sich aus der Tiefenlage der Mohorovičić-Diskontinuität regional verschiedene geothermische Gradienten (BÄR 2012). In ARNDT ET AL. (2011) werden auf Grundlage von Temperaturdaten für die Bereiche Hessens außerhalb des Oberrheingrabens empirisch ermittelte Temperaturgradienten von  $2,4 \text{ °C}/100 \text{ m}$  bis  $4 \text{ °C}/100 \text{ m}$  veranschlagt. Im Mittel nimmt in Mitteleuropa die Temperatur um etwa  $2,8 - 3,0 \text{ °C}/100 \text{ m}$  mit der Tiefe zu (STOBER & BUCHER, 2012). Darauf aufbauend wurden für die Unsicherheitsbetrachtung geothermische Gradienten von  $2,5 \text{ °C}/100 \text{ m}$  bis  $3,5 \text{ °C}/100 \text{ m}$  in  $0,25 \text{ °C}/100 \text{ m}$  Intervallen untersucht (Tabelle 5).

Neben den Untergrund- und Gesteinskennwerten ist der Heizenergiebedarf eine wichtige Größe bei der Dimensionierung von geothermischen Anlagen. Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, basiert die Bemessung der mitteltiefen EWS in Heubach auf einem Lastgang, der in einem kalten Jahr (siehe Abbildung 10) den Entzugsbedarf decken soll. Dabei soll eine jährliche Wärmemenge von etwa  $121,5 \text{ MWh/a}$  entzogen werden. Bemessen wurde dieses Lastprofil an den klimatischen Daten von 2010. Daher wird diese freundlicherweise von der HSE zur Verfügung gestellte Lastkurve (HSE 2011) nachfolgend als *Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub>* angeführt. Für die Unsicherheitsbetrachtung wurde der *Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub>* modifiziert. Zunächst erfolgte eine Datenaufbereitung nach der *Zyklen-Methode*

(siehe Kapitel 3.2.2). Daraus ergaben sich thermische Leistung für den Entzug zwischen 60,6 kW und 70,2 kW. Innerhalb eines Zyklus jedoch bleibt die Leistung konstant. Um die Leistung bei aktivem Entzug und damit die Temperaturdifferenz zwischen Sondeneinlass und -auslass konstant zu halten, wurde eine Änderung der jährlich entzogenen Wärmemenge durch eine Erhöhung beziehungsweise Verringerung der Entzugsdauer je Zyklus vorgenommen. Ausgehend vom *Lastgang*<sub>(Prognose2010)</sub> sind vier weitere Lastkurven generiert worden.

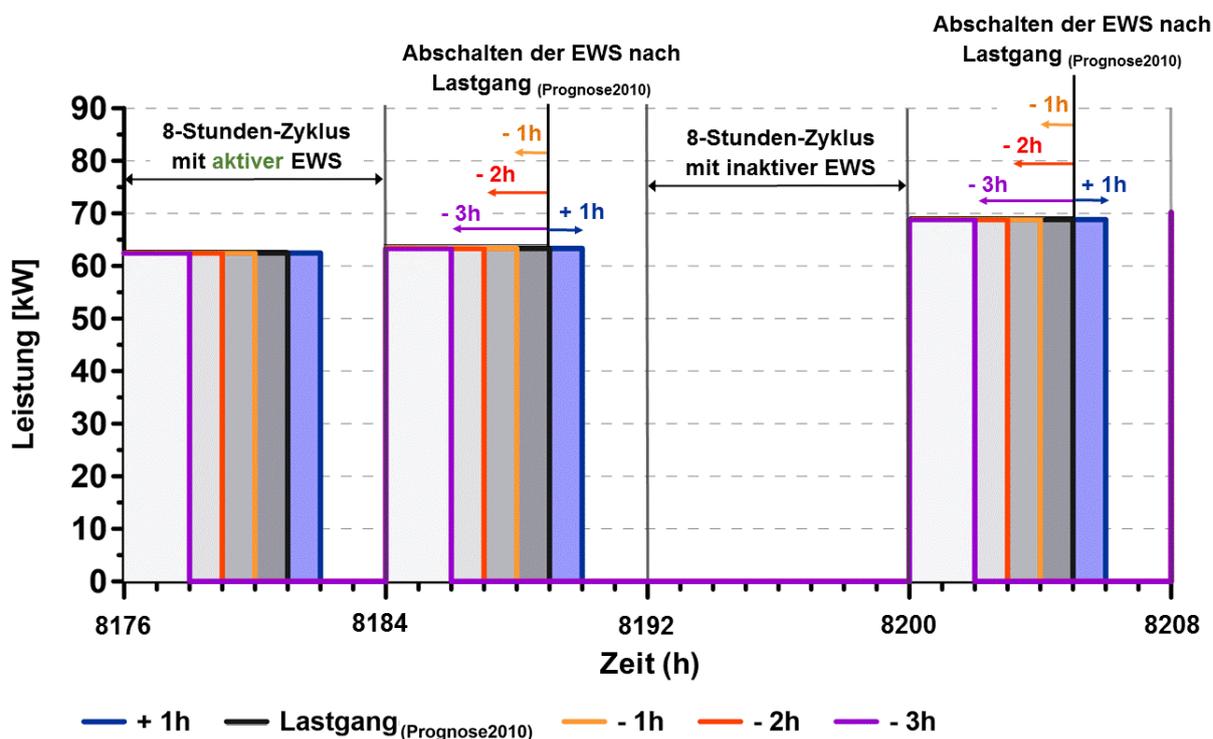


Abbildung 23: Erstellung der Lastgänge für die Unsicherheitsbetrachtung. Um eine geringere entzogene Wärmemenge pro Jahr zu erreichen wurde an aktiven Zyklen die EWS um 1,2 beziehungsweise 3 Stunden früher ausgeschaltet. Für die Lastkurve, aus der sich eine höhere resultierende Entzugsmenge ergeben soll, wurde die Laufzeit der EWS um eine Stunde je Zyklus verlängert.

Da der *Lastgang*<sub>(Prognose2010)</sub> bereits die notwendige Wärmemenge für einen kalten Winter berücksichtigt, soll nur bei einem weiteren Lastgang eine höhere Wärmemenge erreicht werden. Dafür ist innerhalb eines jeden 8-Stunden-Zyklus mit aktiver EWS die Betriebszeit um eine Stunde verlängert worden.

Tabelle 4: Übersicht der resultierenden Wärmemengen aus den verschiedenen Lastgängen zur Unsicherheitsbetrachtung.

	+ 1 Stunde je Zyklus	Lastgang (Prognose2010)	- 1 Stunde je Zyklus	- 2 Stunde je Zyklus	- 3 Stunde je Zyklus
Entzug [MWh/a]	142,46	121,34	95,53	73,38	54,46

Durch ein Reduzieren der Betriebszeiten um eine bis drei Stunden je Zyklus wurden drei weitere Lastkurven erstellt. Dabei sind nur jene 8-Stunden-Zyklen mit aktiver Wärmepumpe und Umwälzpumpe berücksichtigt worden (Abbildung 23). In Tabelle 4 sind die jährlich zu entziehenden Wärmemengen, die sich aus diesen neu generierten Lastgängen ergeben dargestellt. Aus Tabelle 5 ist eine Übersicht der untersuchten Modellkonfigurationen ersichtlich. Bei der Modellerstellung wurden die Werte des zu untersuchenden Parameters variiert, während die Standardeinstellungen (Mittelwerte) der restlichen Parameter konstant blieben. Das Modell MU.3 basiert auf den Mittelwerten aus Wärmeleitfähigkeit, vol. Wärmekapazität und geothermischen Gradienten. Es stellt daher ein Standardmodell (*Mittelwert-Modell*) dar zu dem die Ergebnisse der übrigen Modellvariationen in Relation gesetzt werden können. Anhand der Abweichungen der resultierenden mittleren Fluidtemperaturen eines Szenarios von den Fluidtemperaturen des Mittelwert-Modells wird die Modellunsicherheit quantifiziert. Alle Modelle wurden über eine Laufzeit von vier Jahren simuliert. Mit dem Ziel, vier vollständige Heizperioden abzubilden, wurde der Startpunkt der Simulationen auf den 01. Oktober des Ausgangsjahres gesetzt.

*Tabelle 5: Übersicht der Parameter und Modellkonfiguration zur Sensitivitätsanalyse im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung. Die orange hinterlegte Modellnummer kennzeichnet das Modell, welches auf den Mittelwerten der Gesteins- und Untergrundkennwerte basiert.*

Variation	Modellnummer	$\lambda$ [W/(m·K)]	$c_v$ [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	Geotherm. Gradient [°C/100 m]	Entzug [Wärmemenge]
$\lambda$ [W/(m·K)]	MU.1	1,73	2,03	3,26	121 MW/h/a
	MU.2	2,08			
	MU.3	2,43			
	MU.4	2,77			
	MU.5	3,12			
$c_v$ [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	MU.6	2,43	1,70	3,26	121 MW/h/a
	MU.7		1,86		
	MU.8		2,20		
	MU.9		2,36		
Kombination $\lambda$ und $c_v$	MU.10	1,73	1,70	3,26	121 MW/h/a
	MU.11	2,08	1,86		
	MU.12	2,77	2,20		
	MU.13	3,12	2,36		
Geotherm. Gradient [°C/100 m]	MU.14	2,43	2,03	2,5	121 MW/h/a
	MU.15			2,75	
	MU.16			3	
	MU.17			3,25	
	MU.18			3,5	
Entzug [Wärmemenge]	MU.19	2,43	2,03	3,26	96 MW/h/a
	MU.20				73 MW/h/a
	MU.21				54 MW/h/a
	MU.22				142 MW/h/a

## 4 Ergebnisse

### 4.1. Wärmekapazitätsmessungen

Eine Übersicht aller ermittelten spezifischen und volumetrischen Wärmekapazitäten kann dem Anhang C (siehe Tabelle 10) entnommen werden. Die Tabelle beinhaltet die Werte der Wärmekapazitäten für 25 °C, die Gesteinsdichten sowie eine entsprechende lithologische Einteilung der Proben.

#### 4.1.1. Spezifische Wärmekapazität

Es wurden ofentrockene Gesteinsproben aus der Tiefbohrung Heubach gemessen. Für die Auswertung sind die Messwerte der Proben temperatur gegen die spezifische Wärmekapazität aufgetragen und anhand von Ausgleichsgeraden auf 25 °C (298,15 K) extrapoliert worden (siehe Kapitel 3.1). Im Temperaturbereich um 53 °C ist eine deutliche Änderung der Steigung der Messwerte zu erkennen (siehe Abbildung 15). Die spez. Wärmekapazitäten wurden daher mittels einer linearen und einer polynomischen Ausgleichsgerade für den Temperaturbereich 48 °C bis 185 °C und einer linearen Regressionsgerade für den Bereich 40 °C bis 55 °C bestimmt.

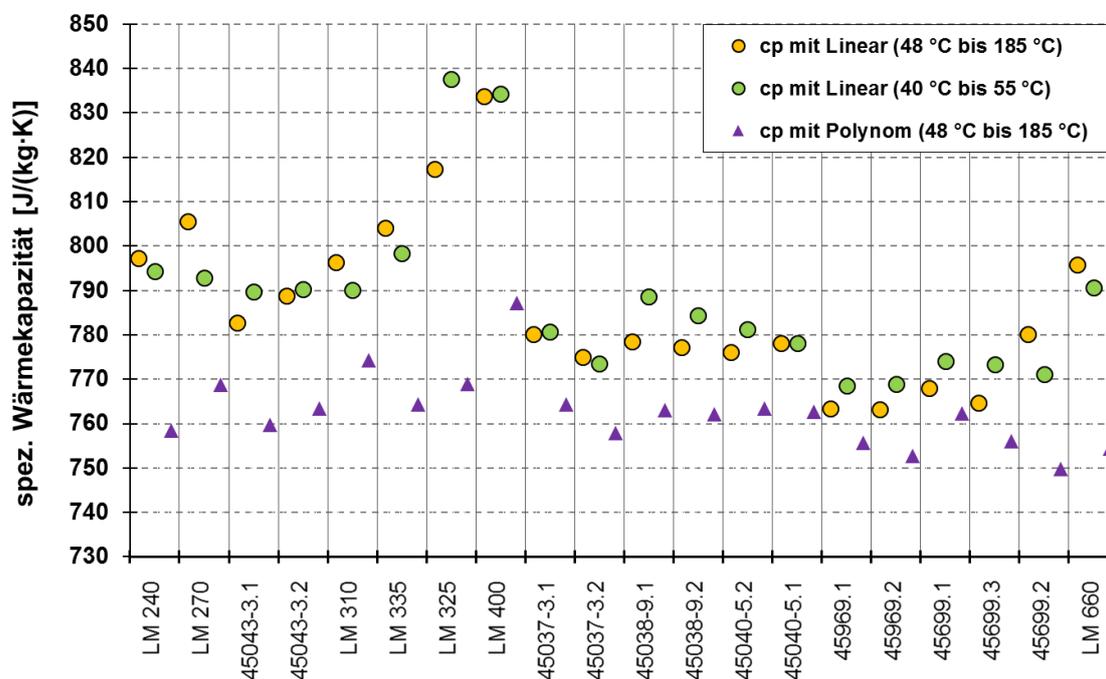


Abbildung 24: Vergleich der spez. Wärmekapazitäten (bei 25 °C), die durch unterschiedliche Extrapolationen ermittelt wurden. Im Temperaturbereich 48 °C bis 185 °C erfolgte die Extrapolation anhand einer linearen und einer polynomische Ausgleichsgerade. Im Bereich 40 °C bis 55 °C wurde die spez. Wärmekapazität durch die Extrapolation einer linearen Ausgleichsgerade ermittelt.

In Abbildung 24 sind die spez. Wärmekapazitäten aufgetragen, die durch die Extrapolation verschiedener Ausgleichsgeraden ermittelt wurden. Die durch die polynomische Ausgleichsgerade bestimmten spez. Wärmekapazitäten liegen zwischen 749 J/(kg·K) und 787 J/(kg·K). Die anhand der linearen Regressionsgeraden ermittelten spez. Wärmekapazitäten liegen für  $T = 25\text{ °C}$  in einem Bereich von 763 J/(kg·K) bis 838 J/(kg·K). Für den Temperaturbereich 48 °C bis 185 °C sind die Werte der polynomischen Ausgleichsgerade im Mittel um 24 J/(kg·K) geringer als die der Linearen. Mit 49 J/(kg·K) wurde die größte Abweichung bei der Lockermaterialprobe (LM 325) (Ton mit Gneisgrus) beobachtet. Die Werte der beiden linearen Ausgleichsgeraden für die verschiedenen Temperaturbereiche weisen eine durchschnittliche Abweichung von 6 J/(kg·K) auf.

#### 4.1.2. Volumetrische Wärmekapazität

Beim Vergleich des Verlaufs der Messwerte mit dem der linearen und polynomischen Ausgleichsgeraden (Abbildung 15) kann beobachtet werden, dass die polynomische Ausgleichsgerade die tendenziell abflachende Steigung der Messwerte unter 53 °C nicht ausreichend berücksichtigt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die spez. Wärmekapazitäten der polynomischen Ausgleichsgerade eher zu geringe Werte ergeben. In die Berechnung der volumetrischen Wärmekapazitäten sind daher die Werte der linearen Regressionsgerade für den Temperaturbereich von 48 °C bis 185 °C eingeflossen.

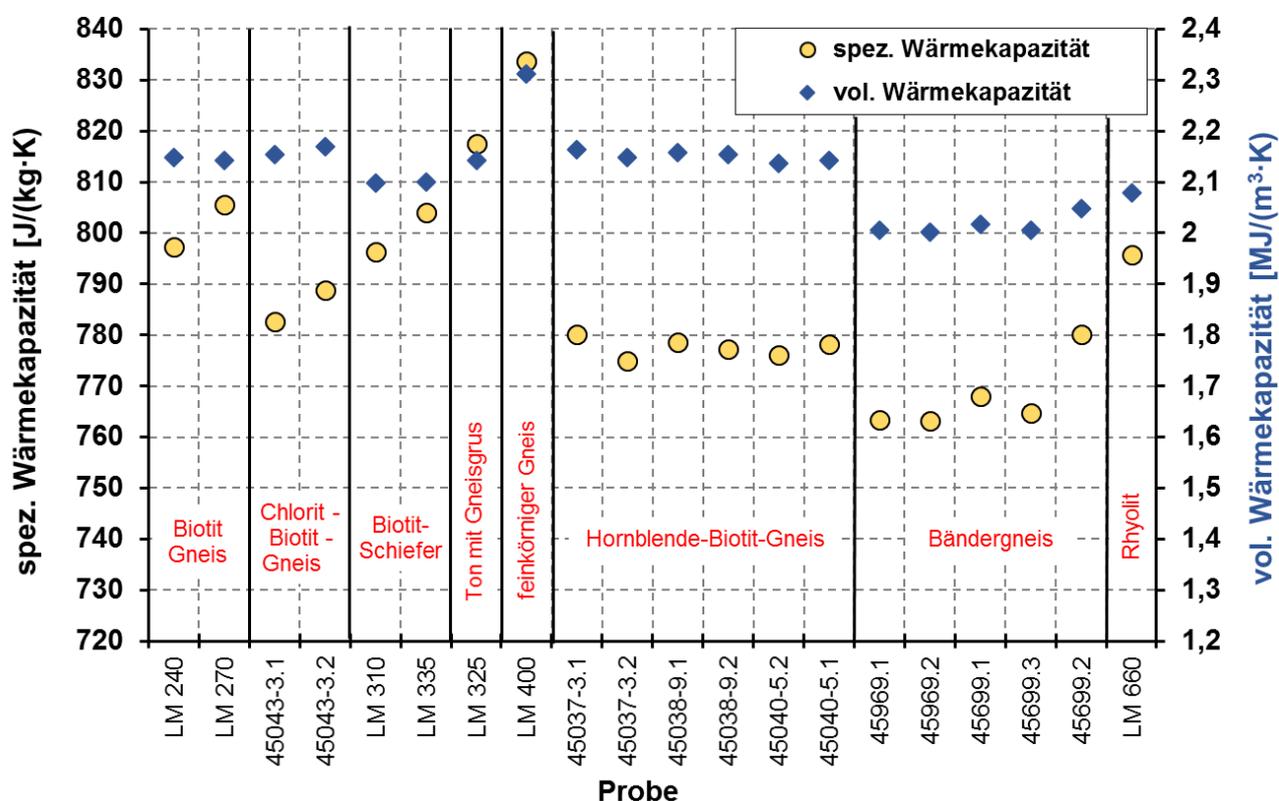


Abbildung 25: Vergleich der spezifischen und volumetrischen Wärmekapazität für eine Temperatur von 25 °C.

Die für die Ermittlung der volumetrischen Wärmekapazität benötigten Reindichten wurden WELSCH (2012) entnommen. Abbildung 25 zeigt die spezifischen und volumetrischen Wärmekapazitäten sowie eine lithologische Einteilung der Proben. Die Werte der volumetrischen Wärmekapazität liegen zwischen  $2,0 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  und  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ .

## 4.2. Numerische Simulationen

### 4.2.1. Modellvalidierung am realen Betriebsfall

Anhand einer Gegenüberstellung der Simulation mit den tatsächlich gemessenen Werten des GRT, sowie mit den dokumentierten Betriebsdaten der EWS sollen die Modellergebnisse abgeglichen werden. Dies ist durch ein entsprechendes Anpassen der für das Grundmodell gewählten Untergrundparameter (Gesteinskennwerte und geothermischer Gradient) erfolgt. Im Folgenden werden für die Modellvalidierung am GRT die Modelle MV.GRT.01 und MV.GRT.02, sowie die Modelle MV.07, MV.11 und MV.12 für die Validierung am realen Betrieb der EWS, näher erläutert, da diese die besten Übereinstimmungen mit den realen Messdaten lieferten (Tabelle 6).

*Tabelle 6: Übersicht der Simulationen zur Modellvalidierung mit den besten Übereinstimmungen zu den gemessenen Betriebsdaten*

Modellnummer	EWS Randbedingung	Referenz-Zeitraum	Modellaufbau	$\lambda$ [W/(m·K)]	$c_v$ [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	Geotherm. Gradient [°C/100m]
MV.07	Einlasstemperatur in Sonde (EWS)	14. Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,26
MV.11	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate an Wärmepumpenzyklus angepasst	14. Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Einschichtmodell	3	2,30	3,26
MV.12	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate an Wärmepumpenzyklus angepasst	14. Nov. 2013 - 20. Nov 2013	Mehrschichtmodell	nach Schichten	nach Schichten	3,26
MV. GRT.01	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate laut GRT	13. Nov.2012 - 26. Nov.2012	Einschichtmodell	3	2,3	3,26
MV. GRT.02	Einlasstemperatur in Sonde (EWS); Durchflussrate laut GRT	13. Nov.2012 - 26. Nov.2012	Mehrschichtmodell	nach Schichten	nach Schichten	3,26

Die Simulationen erfolgten unter der Annahme eines rein konduktiven Wärmetransports in wassergesättigtem Untergrund mit einer Porosität von 1 %. Die 773 m tiefe EWS wurde in ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 215,9 mm eingebracht. Für das API-Stahlrohr mit  $\varnothing 7''$  (177,8 mm) ist eine Wärmeleitfähigkeit von  $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  angenommen worden. Die Wärmeleitfähigkeit des 3,46" (87,8 mm) Steigrohr aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK) wurde auf  $0,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  festgelegt. Außerdem wurde der ThermoCem® TC02 der Firma HeidelbergCement AG, mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit von  $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , als Hinterfüllbaustoff verwendet. Als Wärmeträgermedium kam reines Wasser zum Einsatz.

#### 4.2.1.1. Kalibrierung an den Messwerten des *Geothermal Response Tests* (GRT)

Vom 13.11. bis 26.11.2012 wurde an der mitteltiefen EWS in Heubach ein Stufen-GRT durchgeführt. Die dabei gemessenen Daten (Fluidtemperaturen, Durchflussrate) (GRT 2012), anhand derer eine Modellvalidierung durchgeführt wurde, sind freundlicherweise vom Geotechnischen Umweltbüro Lehr zur Verfügung gestellt worden. Der Durchfluss während des GRT betrug  $(3,84 \pm 0,16) \text{ l/s}$ . Als Randbedingung für den simulierten Betrieb wurde die gemessene Zeitreihe der Einlasstemperatur und die Durchflussrate eingelesen. Dies geschah sowohl für ein Einschichtmodell als auch für ein Mehrschichtmodell. Abbildung 26 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Fluidtemperaturen des Einschichtmodells mit der höchsten erreichten Übereinstimmung (Modell: *MV.GRT.01*). Die aus den Messwerten berechnete Heizlast (gelbe Kurve) spiegelt dabei die verschiedenen Belastungsstufen wider. Für das Modell wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins von  $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  festgelegt. Für die volumetrische Wärmekapazität ergab sich ein Wert von  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  und  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  für den geothermischen Gradienten. Die Bohrlochwiderstände sind im Falle des Einschichtmodells durch das Programm *EWS Version 4.7* ermittelt und in *FEFLOW* als vorgegebene Parameter eingelesen worden. Die Berechnung des internen Widerstands vom hinaufströmenden Fluid im GfK-Steigrohr zum hinabströmenden Fluid im Außenrohr ergab  $R_a = 0,07 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ . Vom Außenrohr zum Hinterfüllbaustoff wurde ein Bohrlochwiderstand von  $R_b = 0,022 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$  berechnet und für den thermischen Widerstand vom Gestein zum Hinterfüllmaterial ist ein Wert von  $R_c = 0,016 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$  ermittelt worden. Aus Abbildung 26 ist die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen (schwarze Kurve) und den simulierten (grüne Kurve) Auslasstemperaturen ersichtlich.

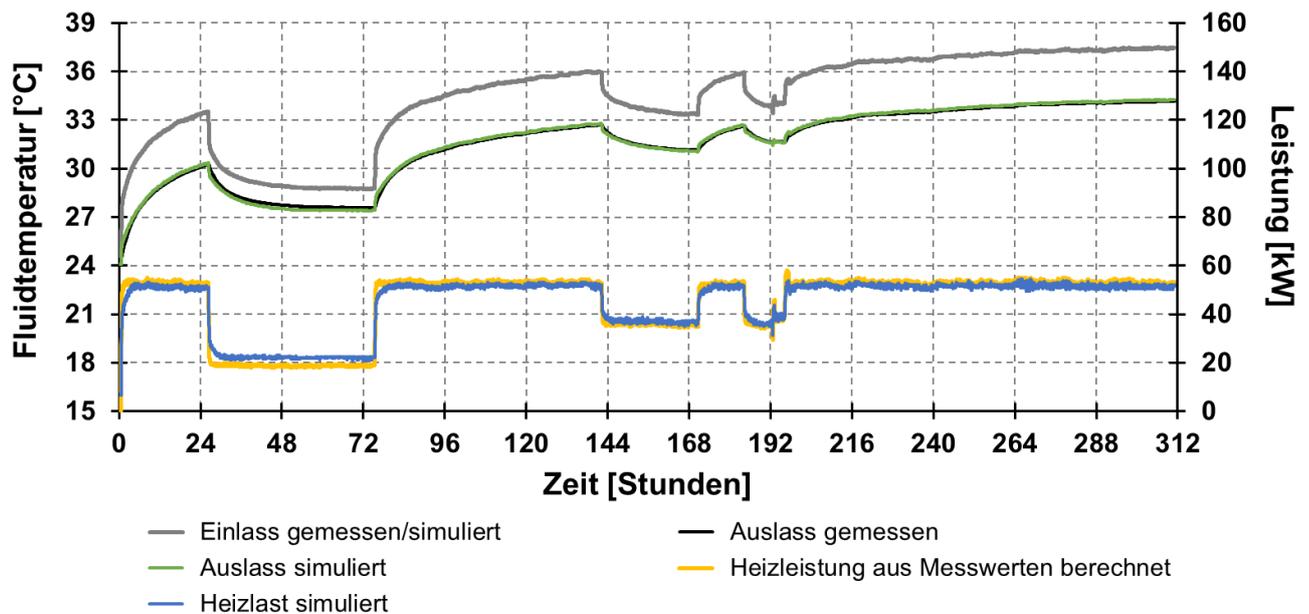


Abbildung 26: Dargestellt ist die Kalibrierung der Untergrundparameter am Einschichtmodell MV.GRT.01 anhand der GRT-Messwerte. Die simulierten und gemessenen Einlasstemperaturen sind identisch, da sie dem Modell als Randbedingung für die EWS vorgegeben wurden. Die simulierten Auslasstemperaturen (grüne Kurve) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Fluidtemperaturen (schwarze Kurve).

Die geringe Abweichung von durchschnittlich  $0,1\text{ °C}$  in der Belastungsstufe ab der 24. Stunde bis zur 74. Stunde spiegelt sich in der geringfügig höheren simulierten Heizleistung (blaue Kurve) im Vergleich zum, aus den Messwerten berechneten Lastgang in diesem Abschnitt wider. Die aus den Messwerten berechnete mittlere Fluidtemperatur über die gesamte Versuchsdauer ergibt einen Wert von  $32,92\text{ °C}$ . Die mittlere Fluidtemperatur, die sich aus der numerischen Simulation ergab, liegt bei  $32,93\text{ °C}$ . Somit konnten im Einschichtmodell mit einer Abweichung von nur  $0,04\%$  ( $0,012\text{ K}$ ) eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden. Aus den Ergebnissen des Mehrschichtmodells wurde eine mittlere Fluidtemperatur von  $32,86\text{ °C}$  ermittelt. Dies stellt im Vergleich zu den Messwerten eine um  $0,18\%$  ( $0,06\text{ K}$ ) geringere mittlere Fluidtemperatur dar. Eine Gegenüberstellung des simulierten mit dem gemessenen Verlauf der Auslasstemperaturen ist in Abbildung 27 dargestellt. Allgemein wurde auch beim Mehrschichtmodell eine sehr gute Übereinstimmung erreicht. Die zunächst leicht höheren thermischen Leistungen (lila Kurve) zu Beginn der ersten Belastungsstufe sind in diesem Bereich ebenfalls an den niedrigeren Werten der simulierten Einlasstemperatur (orange Kurve) zu erkennen. Im Gegensatz zum Einschichtmodell MV.GRT.01 wurden die thermischen Bohrlochwiderstände bei der Simulation des Mehrschichtmodells MV.GRT.02 nicht mit EWS sondern mit FEFLOW berechnet. Die numerische Simulation erfolgte dabei nach dem Lösungsansatz von AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006).

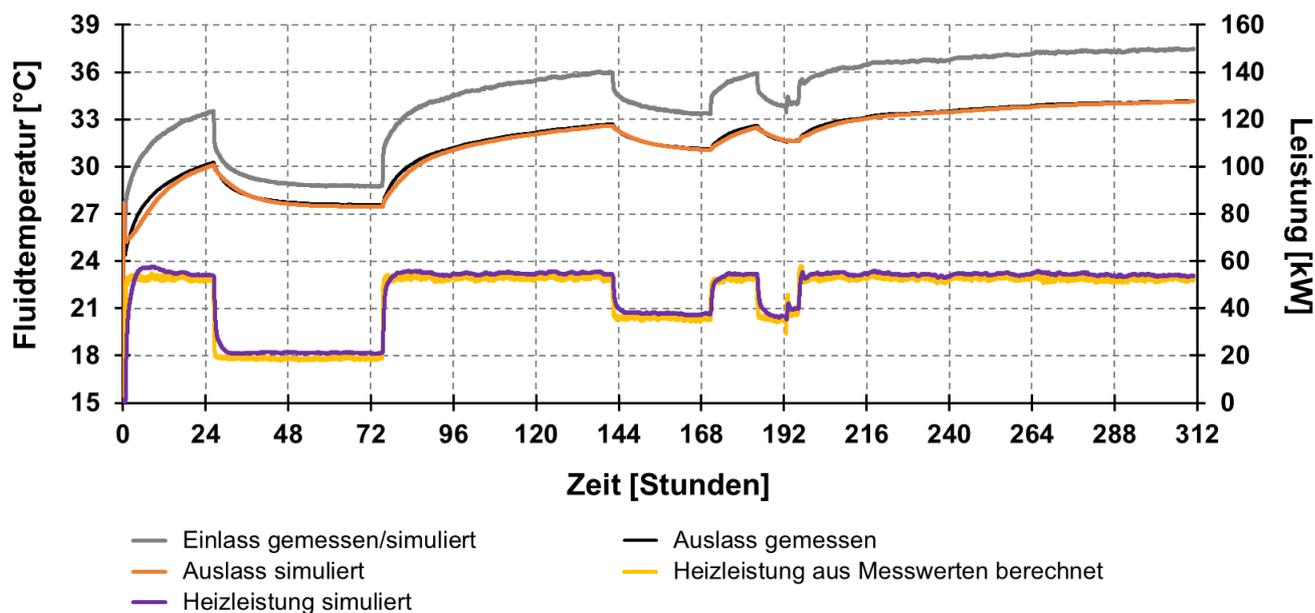


Abbildung 27: Ergebnis des Mehrschichtmodells MV.GRT.02. Als Randbedingung für den Betrieb wurde die Zeitreihe der gemessenen Einlasstemperatur eingelesen.

#### 4.2.1.2. Modellvalidierung an den Betriebsdaten

Die Simulationen zur Validierung der Untergrundparameter wurden mit dem Lösungsansatz nach AL-KHOURY ET AL. (2005 & 2006) berechnet. Dadurch konnte das transiente Verhalten der EWS infolge kurzfristiger Lastwechsel modelliert werden. Die in Abbildung 28 dargestellten gemessenen Temperaturverläufe des Wärmeträgermediums sind charakteristisch für den Betrieb der mitteltiefen EWS in Heubach. Zu Beginn eines Entzugszyklus werden sowohl für den Einlass als auch für den Auslass sinkende Fluidtemperaturen beobachtet. Dies ist auf ein anfängliches Vorbeiströmen des erkalteten oberflächennahen Wassers an den Temperaturfühler beim Einsetzen der Umwälzung zurückzuführen. Die Einlass- und Auslasstemperaturen steigen sobald das in größeren Tiefen erwärmte Sondenfluid bei den Temperaturfühler des WMZ 2 ankommt. Dem Höchststand der gemessenen Fluidtemperaturen innerhalb eines Entzugszyklus folgt ein sukzessives Abkühlen. Dabei werden der mittleren Temperatur, die sich im zirkulierenden Fluid eingestellt hat, von einer Wärmepumpe konstant 4 K entzogen. Der aus Abbildung 28 ersichtliche Versatz im Verlauf der simulierten zur gemessenen Auslasstemperatur kann auf das zeitversetzte Einschalten der Umwälzpumpe und der Wärmepumpe zurückgeführt werden. Durch das vorzeitige Zirkulieren des Fluids wird ein gemessener Abfall der Temperatur verzeichnet. Eine Temperaturdifferenz der Messwerte wird aber erst ab dem Einschalten der Wärmepumpe verzeichnet. Das Einsetzen der Umwälzung hatte bei der Modellierung (MV.07) jedoch eine sofortige Temperaturspreizung zur Folge, da das Einschalten der Umwälzpumpe und der Wärmepumpe bei den gewählten Betriebsparametern nicht separat geregelt werden konnte.

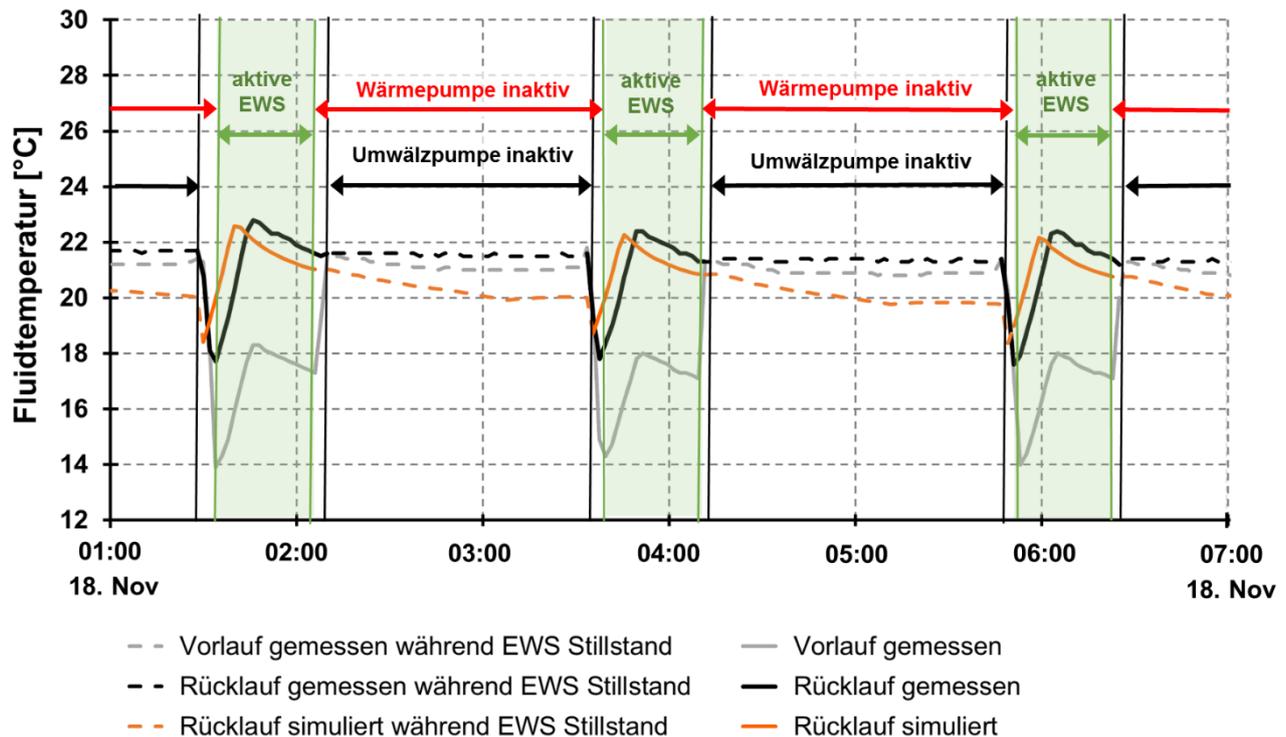


Abbildung 28: Typischer Verlauf der gemessenen Einlass (Vorlauf)- und Auslasstemperaturen (Rücklauf) der EWS in Heubach am Beispiel dreier Entzugsphasen. Das zeitversetzte Einschalten von Umwälzpumpe und Wärmepumpe bewirkt einen zeitlich verschobenen Verlauf der simulierten Auslasstemperatur zu den Messwerten.

Wird anstatt der gemessenen Einlasstemperaturen ein entsprechender Lastgang als Betriebsparameter für die Simulation festgelegt, kann ein zeitlich versetzter Betrieb der Umwälzpumpe und der Wärmepumpe ermöglicht werden. Zur Validierung der Untergrundparameter sollen jedoch die Unsicherheiten durch die Betriebsparameter minimiert werden. Durch die Vorgabe der Einlasstemperaturen kann anhand der resultierenden Auslasstemperaturen der Einfluss des Untergrunds deutlicher bemessen werden. Eine zuverlässigere iterative Bestimmung der gesteinspezifischen Parameter und des geothermischen Gradient wurde somit ermöglicht. Um nun den dadurch hervorgerufenen Versatz zwischen gemessenen und simulierten Auslasstemperaturen zu vermeiden, ist ein gleichzeitiges Einsetzen von Umwälzpumpe und Wärmepumpe angenommen worden. Hierfür wurde die für die Modellierung verwendete Durchflussrate entsprechend modifiziert (Szenario *MV.11*). Der Temperaturverlauf der sich daraus ergibt, ist in Abbildung 29 dargestellt. Analog zu den Modellen *MV.GRT.01* und *MV.07* liegt dem Einschichtmodell *MV.11* ein geothermischer Gradient von  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ , eine Wärmeleitfähigkeit von  $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  und eine volumetrische Wärmekapazität von  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  zugrunde.

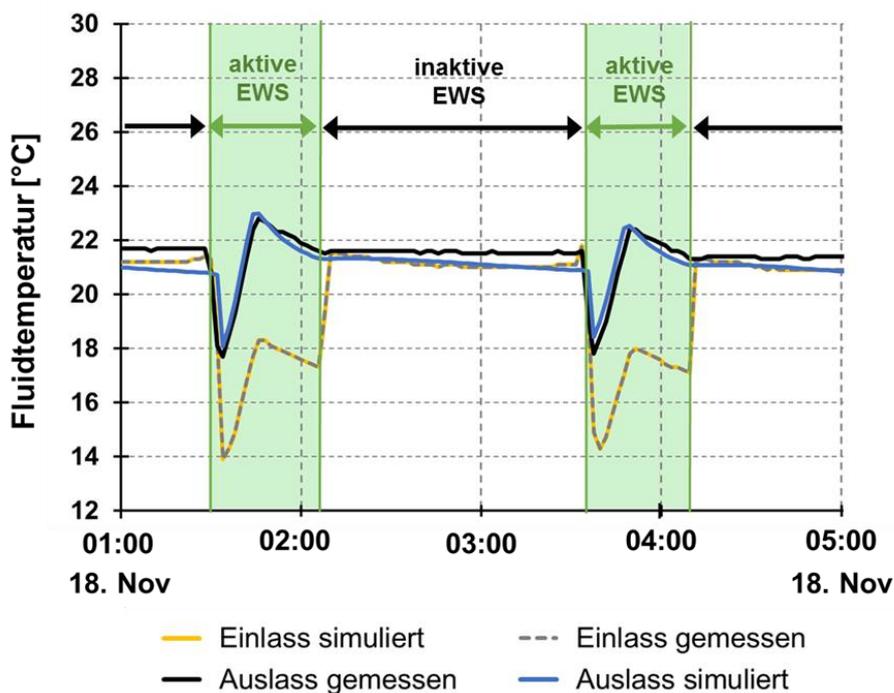


Abbildung 29: Dargestellt ist das Ergebnis des Szenarios MV.11. Durch ein Angleichen der Durchflussrate an die Betriebszeiten der Wärmepumpe konnte der Versatz zwischen simulierten und gemessenen Auslasstemperaturen vermieden werden.

Für die Berechnungen der mittleren Fluidtemperatur in dieser, sowie in den folgenden Auswertungen, sind nur Werte bei aktiver EWS herangezogen worden. Als Kriterium hierfür wurde ein aktiver Durchfluss ( $Q > 5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) und eine Temperaturspreizung  $\Delta T > 2 \text{ °C}$  festgelegt. Mit einer mittleren Fluidtemperatur von  $19,8 \text{ °C}$  über den Betrachtungszeitraum erreichte das Szenario MV.11 die höchste Übereinstimmung im Zuge der Validierung an den Betriebsdaten. Verglichen mit der aus den Messwerten berechneten mittleren Temperatur von  $19,7 \text{ °C}$  stellt das eine Abweichung von nur  $0,6 \%$  ( $0,12 \text{ K}$ ) dar. Aus den Messwerten kann eine entzogene Wärmemenge von  $1859 \text{ kWh}$  berechnet werden. Die Entzugsmengen der Simulation machen mit  $1802 \text{ kWh}$  einen um  $3,1 \%$  geringeren Wert aus. Bezogen auf die mittlere Fluidtemperatur kann auch ohne ein Aufbereiten der Durchflussrate eine hinreichend gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden (Abbildung 30). Die aus dem Einschichtmodell MV.07 resultierende mittlere Fluidtemperatur von  $19,89 \text{ °C}$  weist, verglichen mit den Messwerten, eine Abweichung von  $1 \%$  ( $0,20 \text{ K}$ ) auf. Mit  $1789 \text{ kWh}$  sind die über den Betrachtungszeitraum entzogenen Wärmemengen des Szenarios um  $3,9 \%$  geringer als die des realen Betriebs.

Aus den Validierungen am GRT und an den Betriebsdaten ergibt sich somit ein kalibriertes Einschicht-Grundmodell mit den gesteinspezifischen Kennwerten von  $3 \text{ °W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  für die Wärmeleitfähigkeit und  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  für die volumetrische Wärmekapazität sowie einem geothermischen Gradienten von  $3,26 \text{ °C}/100 \text{ m}$ . Somit konnte die im Rahmen des GRT ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit von

3 W/(m·K) durch die Modellvalidierung verifiziert werden. Die Wahl des geothermischen Gradienten geht ebenfalls auf die Temperaturmessungen im Zuge des GRT zurück (GRT 2012). Die verifizierte volumetrische Wärmekapazität wurde auf Basis der VDI 4640 (Blatt 1, 2010) festgelegt.

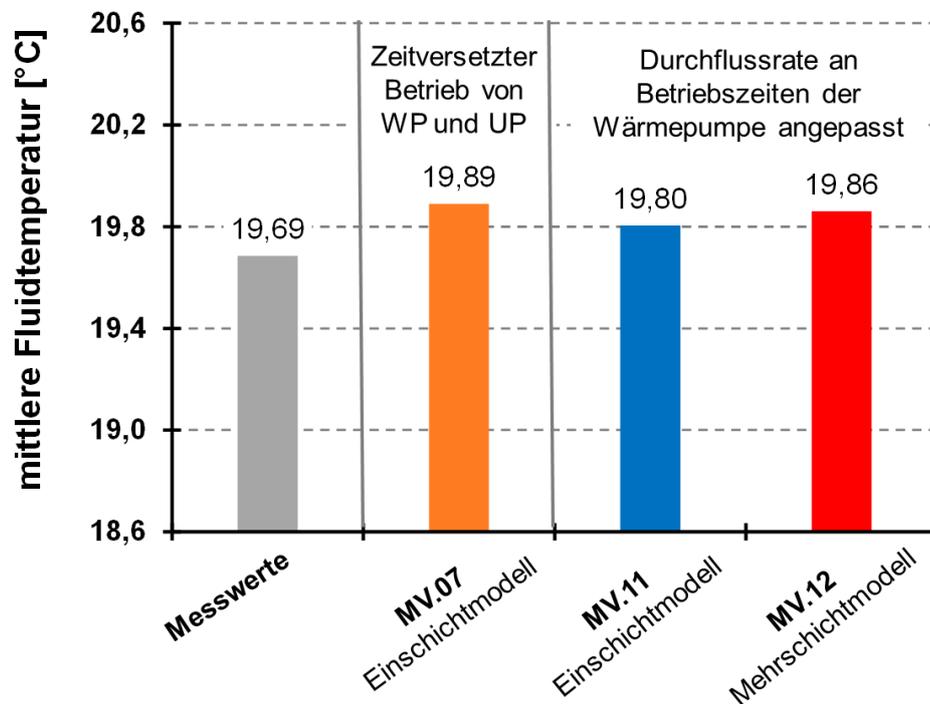


Abbildung 30: Vergleich der verschiedenen simulierten mittleren Fluidtemperaturen. Mit: WP: Wärmepumpe; UP: Umwälzpumpe

Für die Modellierung des Mehrschichtmodells *MV.12* wurde durch eine entsprechend angepasste Durchflussrate ein gleichzeitiges Einschalten von Umwälzpumpe und Wärmepumpe simuliert. Die mittlere Fluidtemperatur die sich aus dem Modell *MV.12* ergab liegt bei 19,9 °C. Damit zeigt dieses Modell mit einer Abweichung von 0,9 % (0,18 K) zu den Messwerten ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Im Vergleich zum Einschichtmodell *MV.11* ist hinsichtlich der Entzugsmenge eine geringere Abweichung erzielt worden. Diese macht bei einer Wärmemenge von 1821 kWh nur 2,1 % aus. Durch die, den einzelnen Schichten zugewiesenen Wärmeleitfähigkeiten (aus WELSCH 2012) ergibt sich eine mittlere Wärmeleitfähigkeit über die Gesamtteufe von 2,98 W/(m·K). Dieser Wert passt gut zur kalibrierten Wärmeleitfähigkeit des Einschichtmodells *MV.11*. Die mittlere volumetrische Wärmekapazität über die Gesamtteufe beträgt 2,15 MJ/(m<sup>3</sup>·K). Sie setzt sich aus den, den Schichten zugewiesenen Labormesswerten der trockenen Gesteine zusammen. Unter Berücksichtigung des wassergefüllten Porenraums von 1 % würde sich eine volumetrische Wärmekapazität von 2,17 MJ/(m<sup>3</sup>·K) ergeben.

#### 4.2.2. Validierung der Aufbereitungsmethoden für Lastgänge zur Langzeitbetrachtung

Die Validierung der Aufbereitungsmethoden erfolgte zunächst an den Messwerten der Woche vom 14. bis 20. Nov. 2013. Um die Gültigkeit über längere Zeiträume zu prüfen, wurden die Messwerte vom 01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014 herangezogen.

Tabelle 7: Übersicht der erstellten Modelle zur Methodvalidierung.

Modellnummer	Methode	Betrachtungszeitraum	Durchfluss
<i>MM.01.1h-Q</i>	Mittelwert-Methode 1-Stunden-Intervall	14. bis 20. Nov. 2013	variabel
<i>MM.02.8h-Q</i>	Mittelwert-Methode 8-Stunden-Intervall	14. bis 20. Nov. 2013	variabel
<i>MM.03.1h-Q.konstant</i>	Mittelwert-Methode 1-Stunden-Intervall	14. bis 20. Nov. 2013	konstant
<i>MM.04.8h-Q.konstant</i>	Mittelwert-Methode 8-Stunden-Intervall	14. bis 20. Nov. 2013	konstant
<i>MM.01.1h-Q.365d</i>	Mittelwert-Methode 1-Stunden-Intervall	01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014	variabel
<i>MM.02.8h-Q.365d</i>	Mittelwert-Methode 8-Stunden-Intervall	01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014	variabel
<i>MM.03.1h-Q.konstant.365d</i>	Mittelwert-Methode 1-Stunden-Intervall	01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014	konstant
<i>MM.04.8h-Q.konstant.365d</i>	Mittelwert-Methode 8-Stunden-Intervall	01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014	konstant
<i>ZM.01.Q</i>	Zyklen-Methode	14. bis 20. Nov. 2013	variabel
<i>ZM.02.Q-konstant</i>	Zyklen-Methode	14. bis 20. Nov. 2013	konstant
<i>ZM.01.Q.365d</i>	Zyklen-Methode	01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014	variabel
<i>ZM.02.Q-konstant.365d</i>	Zyklen-Methode	01. Apr. 2013 bis 31. Mrz. 2014	konstant

Die Modellierungen erfolgten nach dem Lösungsansatz von ESKILSON & CLAEISSON (1988). Allen Szenarien liegt das bereits kalibrierte Einschichtmodell mit einem geothermischen Gradienten von 3,26 °C/100 m zugrunde. Die Gesteinskennwerte wurden mit 3 W/(m·K) für die Wärmeleitfähigkeit und 2,3 MJ/(m<sup>3</sup>·K) für die volumetrische Wärmekapazität festgelegt. Eine Übersicht der Modelle zur Methodvalidierung ist in Tabelle 7 dargestellt. Mit konstanten Durchflussraten würde eine schnellere Simulationszeit gewährleistet werden. Es sind daher sowohl Modelle mit konstantem Durchfluss, als auch variablem Durchfluss erstellt worden. Um eine variable, dem Entzugsverhalten angepasste Durchflussrate zu erreichen wurden die Messwerte anhand der jeweiligen Aufbereitungsmethode

modifiziert. Anhand eines Vergleichs der Messwerte mit den Simulationsergebnissen der entzogenen Wärmemengen und der mittleren Fluidtemperaturen soll untersucht werden ob es signifikante Unterschiede in den Modellergebnissen gibt. Die mittleren Fluidtemperaturen sind anhand der Mittelwerte aus Einlass- und Auslasstemperaturen bei aktiver EWS gebildet worden.

#### 4.2.2.1. Mittelwert-Methode

Die Datenglättung nach der Mittelwert-Methode fand für Stundenintervalle und für Acht-Stunden-Intervalle statt. Die Aufbereitung der Messwerte für Acht-Stunden-Intervalle erfolgte dabei analog zu der in Kapitel 3.2.2. beschriebenen Methode für Ein-Stunden-Intervalle.

##### *Mittelwert-Methode in 1-Stunden-Intervallen*

In Abbildung 31 sind die Temperaturverläufe der Simulation (mit der Modellnummer *MM.01.1h-Q*) exemplarisch für einen Tag dargestellt. Als Randbedingung für den Betrieb liegt dem Modell ein mit der Mittelwert-Methode in 1-Stunden-Intervallen modifizierter Lastgang zugrunde. Die verwendete Durchflussrate beruht ebenfalls auf Messwerten, die mit der Mittelwert-Methode aufbereitet wurden. Der Stillstand beziehungsweise Betrieb der EWS kann am Diagramm anhand des Verlaufs der Einlasstemperatur (Vorlauf) und der Auslasstemperatur (Rücklauf) erkannt werden. Nähern sich die Kurven soweit an, dass keine nennenswerte Temperaturdifferenz mehr vorherrscht ( $< 1\text{ °C}$ ) wird dem Sondenfluid von der Wärmepumpe keine Wärme mehr entzogen. Das Aussetzen der Fluidumwälzung bei einer inaktiven Phase der EWS macht sich durch ein gleichzeitiges Sinken der Einlass- und Auslasstemperaturen bemerkbar. Die Fluidtemperaturen passen sich allmählich dem Temperaturniveau der Geländeoberkante ( $10\text{ °C}$ ) an. Aus Abbildung 32 sind hingegen die Temperaturverläufe aus einem Modell (*MM.03.1h-Q.konstant*) mit einem konstanten Durchfluss von  $5\text{ l/s}$  ersichtlich. Neben den simulierten Temperaturen können der Abbildung 31 und Abbildung 32 auch die gemessenen Einlass- und Auslasstemperaturen entnommen werden. Die im realen Betrieb von der Wärmepumpe angelegte durchschnittliche Temperaturspreizung von  $4\text{ K}$  ist in den Abbildungen Abbildung 32 und Abbildung 31 anhand der Verläufe der gemessenen Einlass- und Auslasstemperaturen ersichtlich.

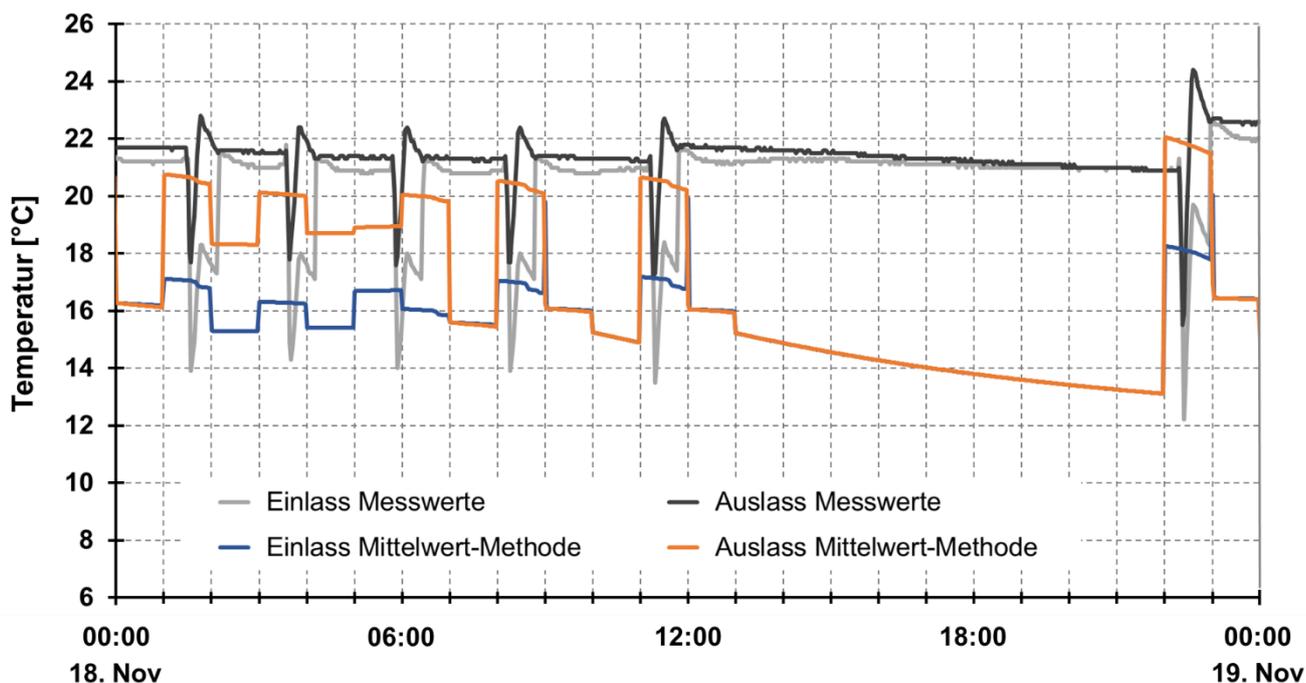


Abbildung 31: Ergebnisse aus Modell MM.01.1h-Q: Der verwendete Lastgang und die Durchflussrate wurden anhand der Mittelwert-Methode modifiziert. Bei einem Stillstand der EWS gleichen sich die Einlass- und Auslasstemperaturen an und sinken sukzessive auf die vorherrschende Oberflächentemperatur (10 °C) ab.

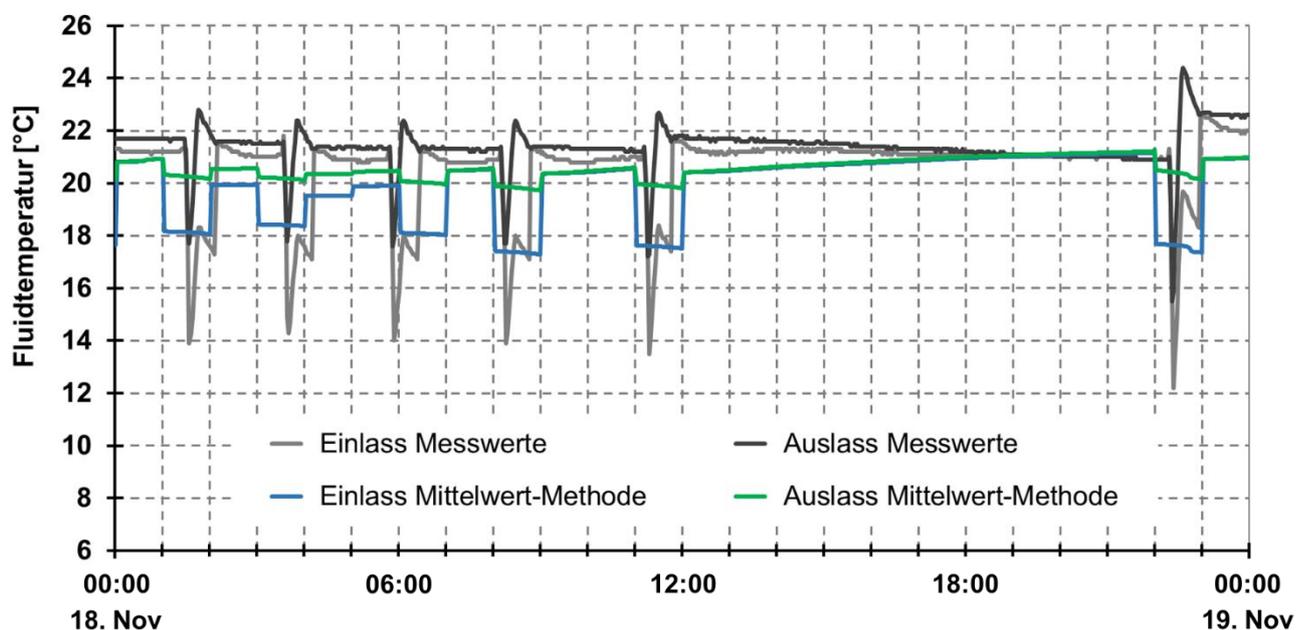


Abbildung 32: Ergebnisse aus Modell MM.03.1h-Q.konstant: Der verwendete Lastgang wurde anhand der Mittelwert-Methode modifiziert. Die Durchflussrate betrug konstant 5 l/s. Bei einem Stillstand der EWS gleichen sich die Einlass- und Auslasstemperaturen an und steigen langsam an. Die, im Rahmen des GRTs bestimmte, ungestörte mittlere Temperatur des zirkulierenden Fluids liegt bei etwa 24 °C.

Die mittlere Temperaturdifferenz der Simulation mit durchgehendem Durchfluss (*MM.03.1h-Q.konstant*) beträgt 2,4 K und ist somit geringer als die der Messwerte. Die mittlere Temperaturspreizung des Modells mit modifiziertem Durchfluss (*MM.01.1h-Q*) liegt bei 3,6 K. Durch eine zusätzliche Aufbereitung der Durchflussrate können Temperaturspreizungen erreicht werden die eher denen des realen Betriebs entsprechen. Da sich durch die Annahme einer konstanten Durchflussrate die Temperaturdifferenz verringert wurde als Kriterium zur Berechnung der mittleren Fluidtemperatur (aktive EWS) eine Differenz von  $\Delta T > 1$  K festgelegt. Ein Vergleich der resultierenden, täglichen mittleren Fluidtemperaturen ist in Abbildung 33 dargestellt. Aus dem Modell mit konstantem Durchfluss ergibt sich eine etwas bessere Übereinstimmung mit den Messwerten. Die mittlere Fluidtemperatur über den gesamten betrachteten Zeitraum macht 19,48 °C aus. Die aus den Messwerten bestimmte mittlere Fluidtemperatur liegt bei 19,69 °C. Das Szenario mit konstantem Durchfluss erreicht dabei eine Abweichung von nur einem Prozent. Die mittleren Fluidtemperaturen des variablen Durchflusses (*MM.01.1h-Q*) weisen mit einem Wert von 19,09 °C eine Abweichung von 3 % auf.

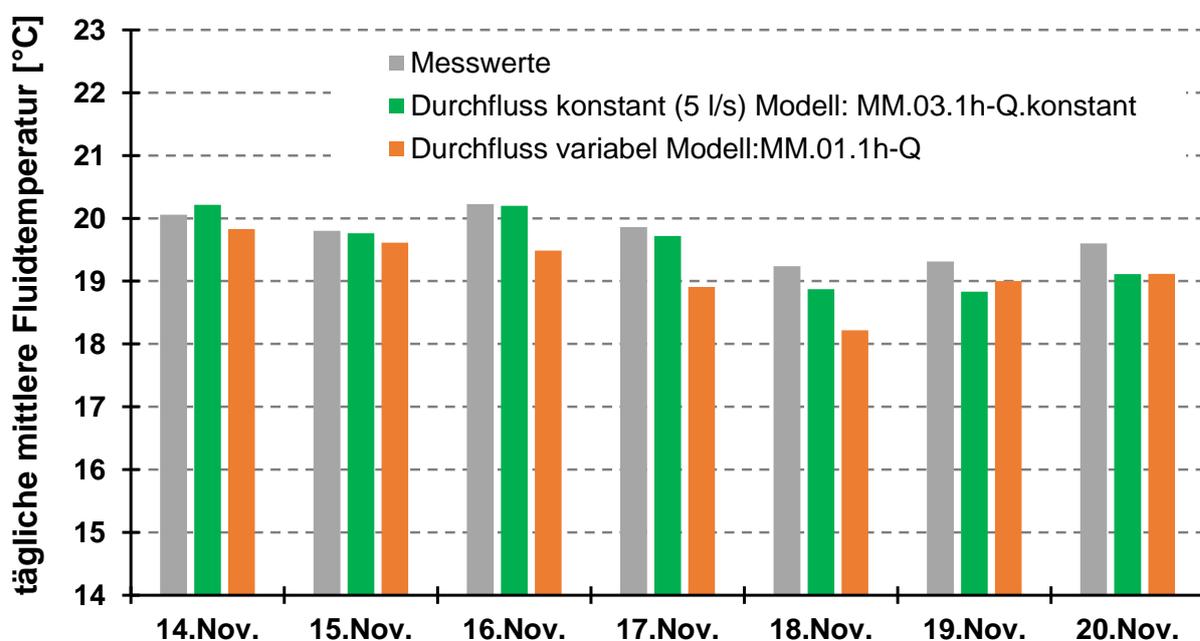


Abbildung 33: Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen zwischen einer Simulation mit konstantem Durchfluss (5 l/s) und einem Modell mit einer nach der Mittelwert-Methode modifizierten Durchflussrate. Beiden Szenarien wurde als Randbedingung ein nach der Mittelwert-Methode in 1-Stunden-Intervallen aufbereiteter Lastgang eingelesen.

Aus den Messwerten vom 14.11. bis 20.11.2013 ergibt sich insgesamt eine entzogene Wärmemenge von 1860 kWh. Trotz der Aufbereitung der Lastkurve soll sich die Summe der Wärmemenge über den Betrachtungszeitraum nicht wesentlich verändern. Mit 2000 kWh ergeben sich bei dem Modell mit konstantem Durchfluss um 7,6 % höhere Wärmemengen. Das Szenario *MM.01.1h-Q* hingegen erreicht mit 1804 kWh eine Abweichung von nur 3 % (Abbildung 42). Beide Modellvariationen (*MM.01.1h-Q*

und *MM.03.1h-Q.konstant*) wurden ebenfalls für einen Betrachtungszeit von einem Jahr verifiziert. Dafür sind die gemessenen Betriebsdaten von April 2013 bis März 2014 den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt worden. Die Randbedingungen der Modelle umfassten einerseits wieder nach der Mittelwert-Methode in 1-Stunden-Intervallen aufbereitete Datensätze sowohl des Lastgangs als auch des Durchflusses. Andererseits wurden auch die Ergebnisse bei konstantem Durchfluss untersucht. Ein Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen ist in Abbildung 34 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Ergebnisse des Modells mit dem konstanten Durchfluss bessere Übereinstimmungen mit den Messwerten erzielten. Dies spiegelt sich auch in der mittleren Fluidtemperatur über den gesamten Betrachtungszeitraum wieder. Aus den Messwerten von April 2013 bis März 2014 ergibt sich eine mittlere Fluidtemperatur von 16,7 °C. Aus dem Szenario mit konstantem Durchfluss konnte eine mittlere Fluidtemperatur von 16,2 °C und somit eine Abweichung von 3,3 % ermittelt werden. Das Modell mit aufbereitetem Durchfluss weist hingegen mit einem Wert von 15,9 °C eine um 4,5 % geringere Fluidtemperatur auf.

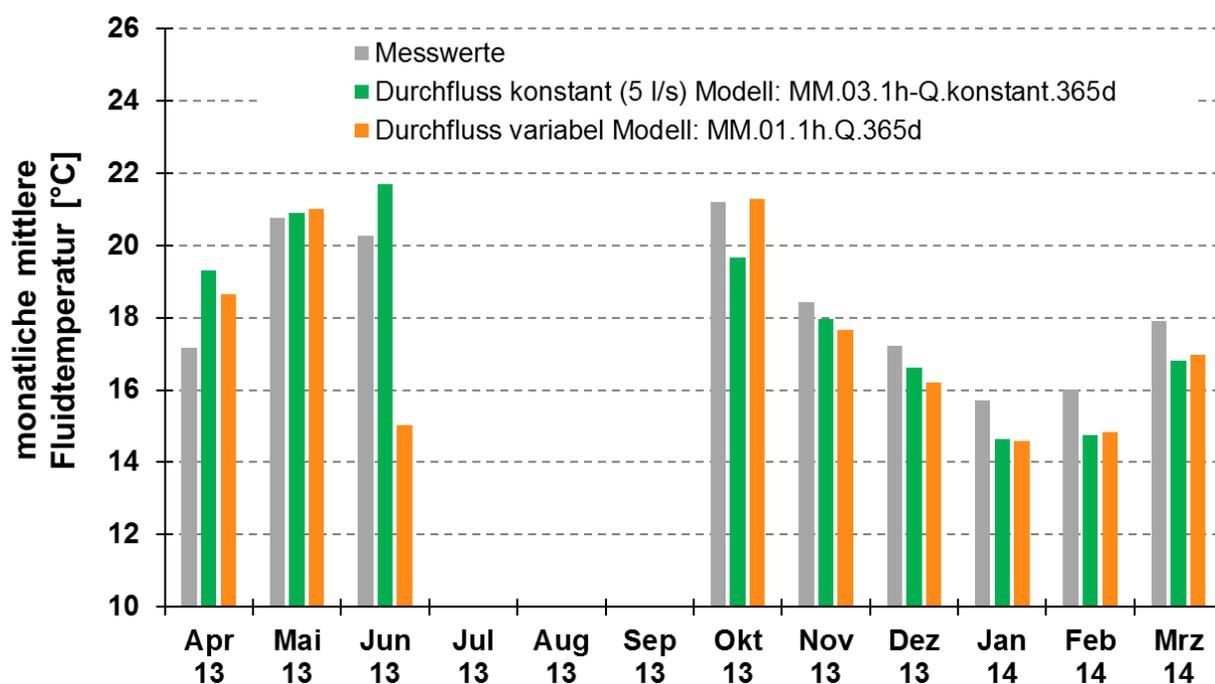


Abbildung 34: Monatliche mittlere Fluidtemperaturen der Szenarien mit konstantem Durchfluss (grüne Balken) und variablem Durchfluss (orange Balken) im Vergleich zu den aus den Messwerten ermittelten mittleren Fluidtemperaturen (graue Balken). Beiden Modellen liegt ein nach der Mittelwert-Methode aufbereiteter Lastgang zugrunde.

Die über den gesamten Betrachtungszeitraum entzogene Wärmemenge der Simulation mit modifiziertem Durchfluss ergab im Vergleich zu den Messwerten einen um 2,7 % geringeren Wert. Mit konstantem Durchfluss sind um 11,8 % höhere Wärmemengen erreicht worden. Dies entspricht um 6165 kWh mehr an Wärmemenge als im tatsächlichem Betrieb entzogen wurde.

### Mittelwert-Methode in 8-Stunden-Intervallen

Durch die Glättung in 8-Stunden-Intervallen ergab sich eine Lastkurve mit Spitzenleistungen von nur 27 kW. Bei einem konstanten Durchfluss von 5 l/s sind daher nur Temperaturdifferenzen von höchstens 1,3 °C erreicht worden. Das Kriterium zur Berechnung der mittleren Fluidtemperatur (aktive EWS) wurde daher für eine Differenz von  $\Delta T > 0$  °C festgelegt. Die Modellierung mit einer aufbereiteten Durchflussrate als Randbedingung ergab Temperaturspreizungen von bis zu 3,9 °C. Um solche Temperaturdifferenzen zu erhalten musste eine entsprechend niedrige Durchflussrate vorherrschen. Zwischen dem Modell mit konstantem Durchfluss und der Simulation, die auf einem in 8-Stunden-Intervallen geglätteten Durchfluss basiert, ergaben sich zum Teil große Abweichungen. Abbildung 35 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Simulationen und den Messwerten. Die täglichen mittleren Fluidtemperaturen des Modells mit variablem Durchfluss weisen dabei durchgehend niedrigere Werte auf. Auch hinsichtlich der mittleren Fluidtemperatur über den gesamten Betrachtungszeitraum von 14.11. bis 20.11.2013 wurde für das Modell mit modifiziertem Durchfluss (MM.02.8h-Q) ein Wert von 15,3°C ermittelt. Dies bedeutet eine Abweichung von 22,5 % gegenüber den Messwerten. Beim Szenario mit konstantem Durchfluss wurde mit 21,3°C eine um 8,2 % höhere mittlere Fluidtemperatur festgestellt.

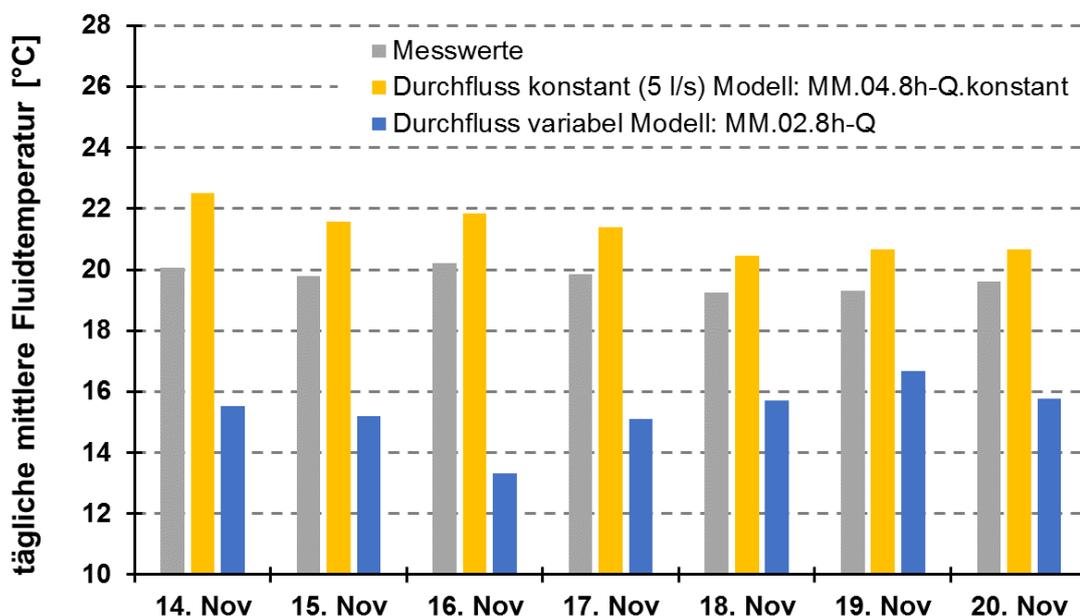


Abbildung 35: Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen zwischen Simulationen mit konstantem Durchfluss (5 l/s) und einer nach der Mittelwert-Methode modifizierten Durchflussrate. Beiden Szenarien liegt als Randbedingung ein nach der Mittelwert-Methode in 8-Stunden-Intervallen aufbereiteter Lastgang zugrunde.

Aus Abbildung 36 sind die monatlichen mittleren Fluidtemperaturen ersichtlich. Die jährliche mittlere Fluidtemperatur der Simulation mit konstantem Durchfluss ist mit 21,0°C um 25,8 % höher als die gemessene mittlere Fluidtemperatur von 16,7 °C. Aus dem Modell in dem sowohl ein modifizierter

Lastgang als auch ein modifizierter Durchfluss als Randbedingung festgelegt wurde, konnte eine mittlere Fluidtemperatur von 13,7°C ermittelt werden. Dies entspricht einer Abweichung von 18,0 %. Bei den insgesamt entzogenen Wärmemengen konnten von beiden Szenarien hinreichend gute Übereinstimmungen erreicht werden. Das Szenario mit variablem Durchfluss erreichte um 1,3% geringere Wärmemengen. Aus der Simulation mit konstantem Durchfluss ergaben sich um 4,9 % höhere Werte.

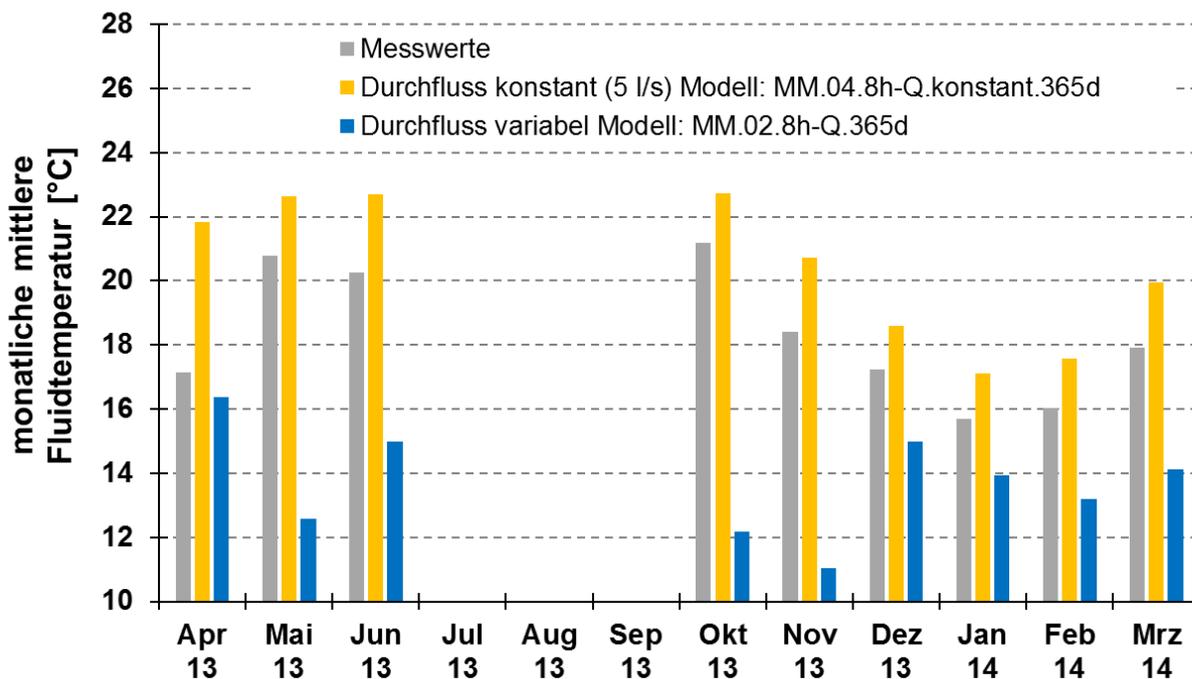


Abbildung 36: Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der Simulationen mit variablem und konstantem Durchfluss. Die Lastgänge wurden nach der Mittelwert-Methode in 8-Stunden-Intervallen aufbereitet.

#### 4.2.2.2. Zyklen-Methode

Die Validierung der Zyklen-Methode erfolgt ebenfalls sowohl für eine modifizierte Durchflussrate als auch für einen konstanten Durchfluss von 5 l/s. Allen Modellen liegt ein nach der Zyklen-Methode aufbereiteter Lastgang zugrunde. Um bei dem, nach der Zyklen-Methode aufbereiteten Durchfluss einen Stillstand der Umwälzpumpe zu simulieren, wurde der Durchfluss auf 0,01 l/s gedrosselt. Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Einlass- und Auslasstemperaturen des Modells ZM.01.Q. Diesem Modell liegt sowohl ein modifizierter Lastgang als auch eine aufbereitete Durchflussrate zugrunde. Die Temperaturspreizung bei aktiver EWS im Betrachtungszeitraum 14.11.2013 bis 20.11.2013 liegt zwischen 3,6°C und 4,2°C und passt somit gut zu den Temperaturdifferenzen die sich aus den Messwerten ergeben. Als Kriterium zur Berechnung der mittleren Fluidtemperatur kann somit, analog zu den Messwerten, eine Temperaturspreizung von  $\Delta T > 2$  K festgelegt werden.

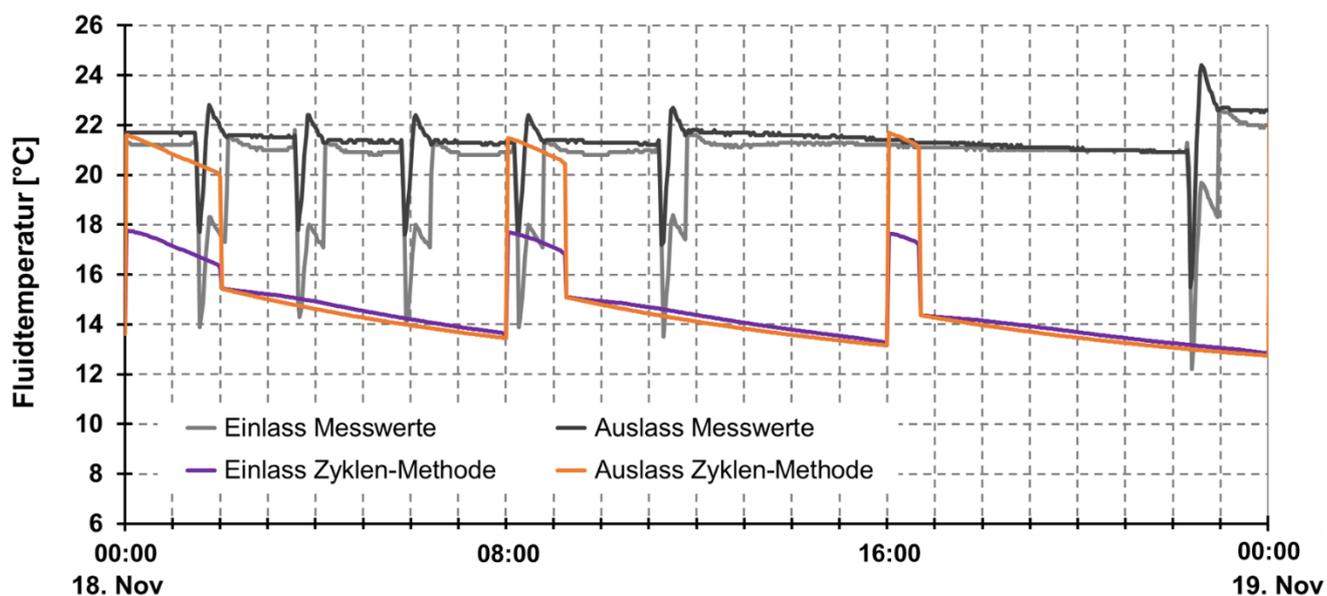


Abbildung 37: Ergebnisse aus Modell ZM.01.Q: Dargestellt sind die Einlass- und Auslasstemperaturen des Wärmeträgermittels über die Zeit. Die Fluidtemperaturen gleichen sich während des Stillstands der EWS an und nähern sich langsam dem Temperaturniveau der Oberfläche (10 °C) an.

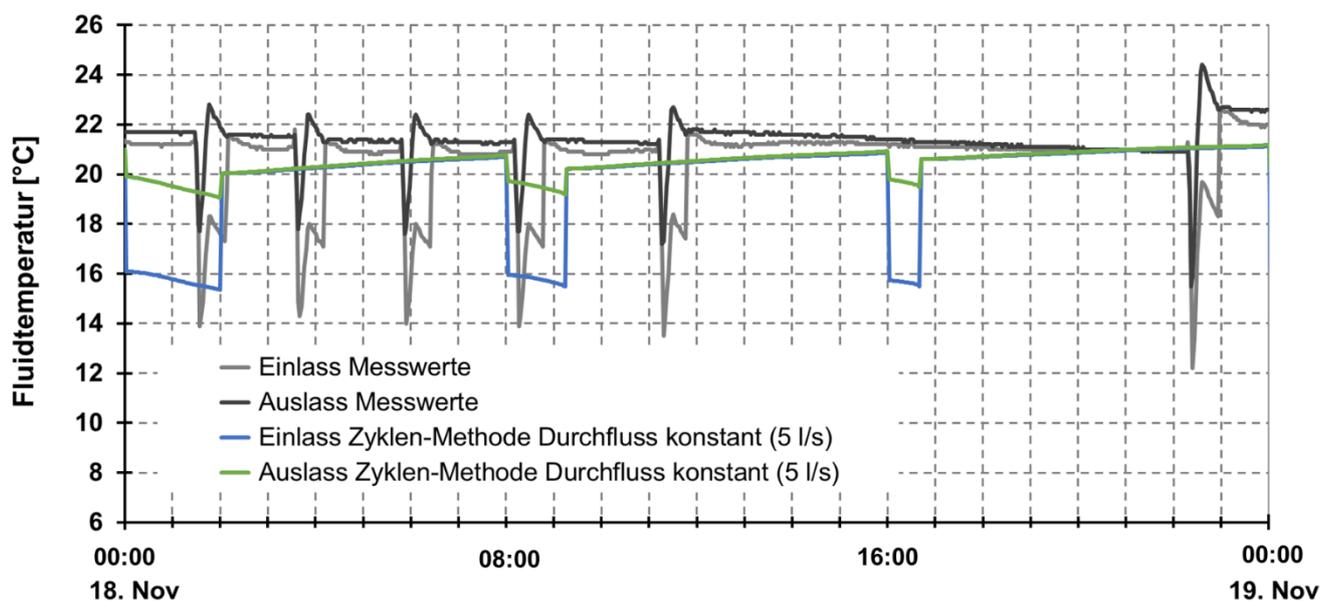


Abbildung 38: Ergebnisse aus Modell ZM.02.Q-konstant: Abgebildet sind die resultierenden Temperaturverläufe des Sondenfluids bei einem konstantem Durchfluss von 5 l/s.

Die in Abbildung 38 dargestellten Temperaturverläufe resultieren aus der Simulation mit konstantem Durchfluss (ZM.02.Q-konstant). Durch die gleichbleibende Durchflussrate nähern sich die Fluidtemperaturen während den inaktiven Phasen einer durchschnittlichen ungestörten Untergrundtemperatur an. Gemessen an den mittleren Fluidtemperaturen des Betrachtungszeitraums

14.11.2013 bis 20.11.2013 erreichte das Szenario mit modifiziertem Durchfluss (ZM.01.Q), mit einem Wert von 19,8 °C und somit einer Abweichung von nur 0,5 %, eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die mittleren Fluidtemperaturen die sich aus einem konstanten Durchfluss ergaben, liegen bei 18,3 °C was einen um 6,9 % geringeren Wert bedeutet. Ein Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen ist in Abbildung 39 dargestellt.

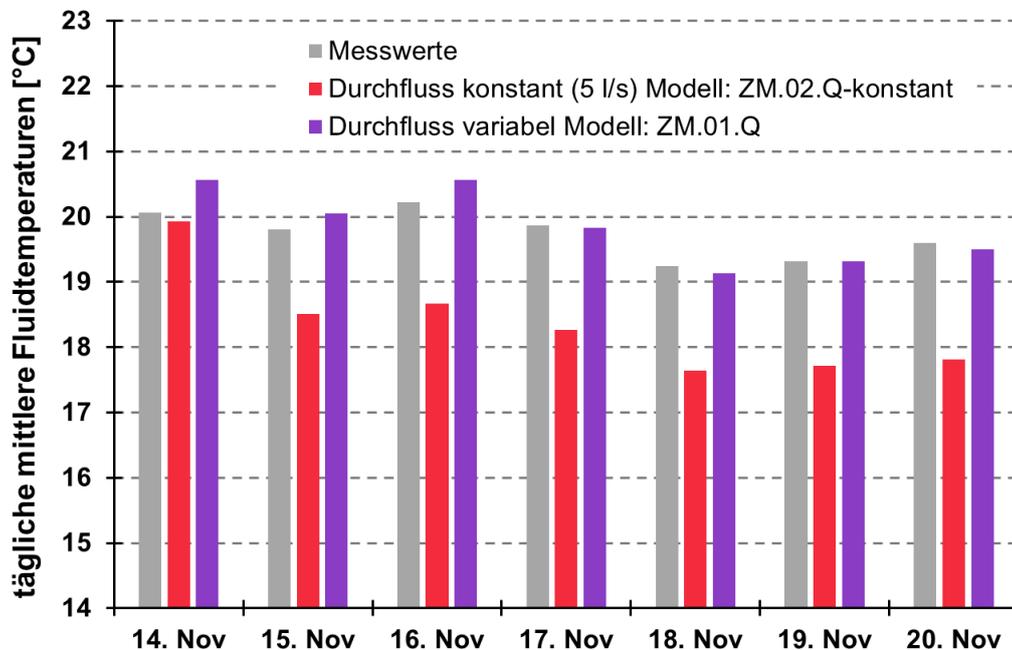


Abbildung 39: Vergleich der täglichen mittleren Fluidtemperaturen: Das Modell mit variablem, nach der Zyklen-Methode aufbereiteten Durchfluss zeigt eine bessere Übereinstimmungen mit den Messwerten als die Simulation mit einer konstanten Durchflussrate.

Die erreichten Entzugsmengen von 14.11.2013 bis 20.11.2013 bei aktiver EWS machten bei Modell ZM.01.Q (variabler Durchfluss) 1,88 MWh und somit eine Abweichung zu den Messwerten von 1,3 % aus. Die aus der Simulation mit einer konstanten Durchflussrate ermittelte Wärmemenge von 1,91 MWh bedeutet eine Abweichung von 2,7 %. Die Zyklen-Methode wurde für Langzeitbetrachtungen ebenfalls an den Messwerten von April 2013 bis März 2014 verifiziert. Ein Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen ist in Abbildung 40 dargestellt. Bezüglich des Szenarios mit aufbereitetem Durchfluss (ZM.01.Q.365d) konnte eine simulierte mittlere Fluidtemperatur von 16,6 °C über den gesamten Betrachtungszeitraum berechnet werden. Die aus den Messwerten ermittelte durchschnittliche Fluidtemperatur liegt bei 16,7 °C. Daraus ergibt sich eine Abweichung von nur 0,6 %. Aus einer konstanten Durchflussrate ergaben sich mittlere Fluidtemperaturen von 15,0 °C. Dies entspricht einer Abweichung von 10,4 %.

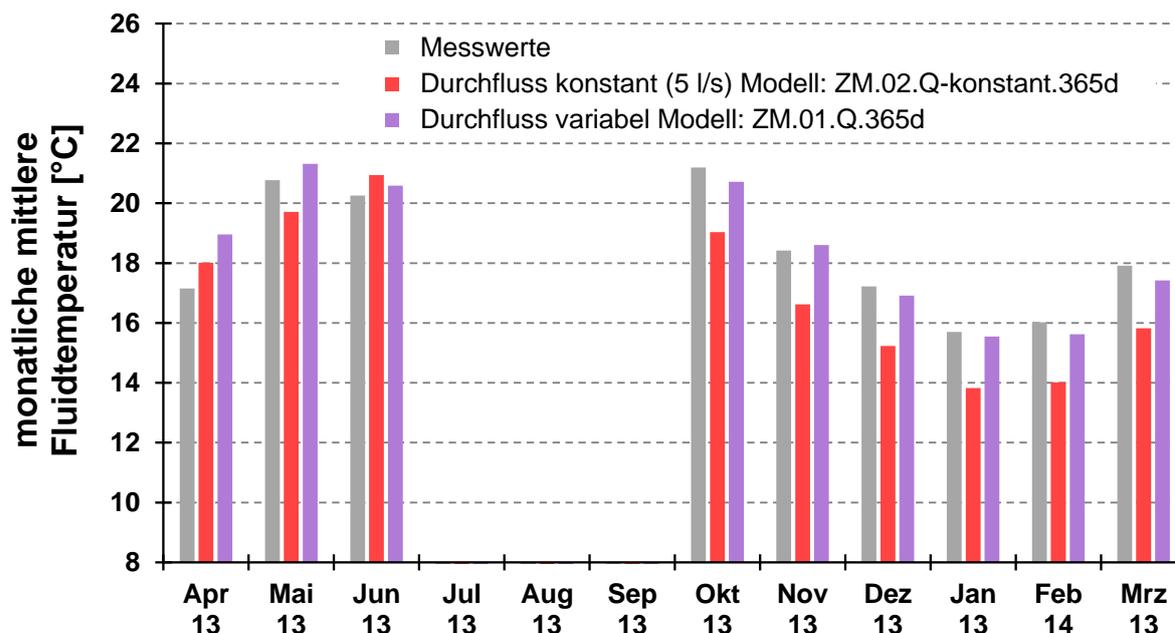


Abbildung 40: Vergleich der mittleren monatlichen Fluidtemperaturen der Modelle mit aufbereitetem Durchfluss und mit konstanter Durchflussrate zu den aus den Messwerten berechneten mittleren Fluidtemperaturen.

Die aufgrund des modifizierten Lastgangs erreichten Entzugsmengen von April 2013 bis März 2014 liegen bei Modell *ZM.01.Q.365d* (variabler Durchfluss) bei 53,37 MWh. Aus Modell *ZM.01.Q-konstant.365d* (konstanter Durchfluss) wurde eine entzogene Wärmemenge von 53,16 MWh ermittelt. Beide Simulationen erreichen mit 2,4 % beziehungsweise 2,0 % geringe Abweichungen zur gemessenen Entzugsmenge von 52,11 MWh.

#### 4.2.2.3. Vergleich der Methoden zur Eingangsdatenaufbereitung

Zur Bestimmung der geeignetsten Datenaufbereitungsmethode für Langzeitbetrachtungen werden die Ergebnisse der Modelle den Messwerten gegenübergestellt. Abbildung 41 zeigt eine Übersicht der mittleren Fluidtemperatur aller Modelle über den Betrachtungszeitraum April 2013 bis März 2014. In Abbildung 42 sind die simulierten Entzugsmengen der verschiedenen Szenarien dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei der *Mittelwert-Methode* jene Lastgänge die nach 1-Stunden Intervallen modifiziert wurden bessere Übereinstimmungen zu den Messwerten erreichen konnten als jene Lastkurven die nach 8-Stunden Intervallen aufbereitet wurden. Die geringste Abweichung zur mittleren Fluidtemperatur ist dabei bei der Simulation *MM.03.1h-Q.konstant.365d* (konstanter Durchfluss) verzeichnet worden.

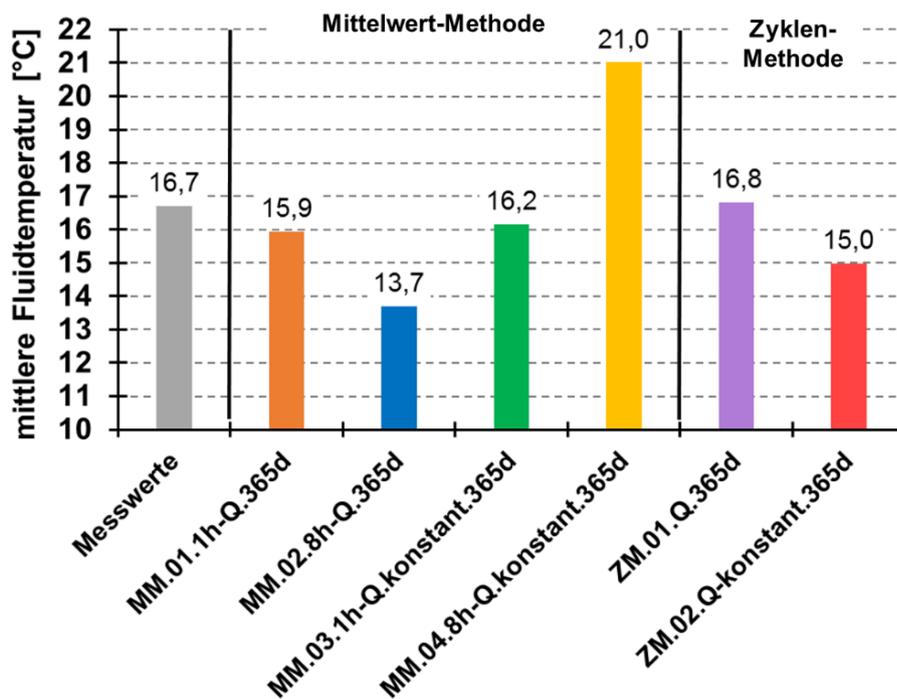


Abbildung 41: Übersicht der jährlichen mittleren Fluidtemperaturen aller Modelle zur Methodvalidierung.

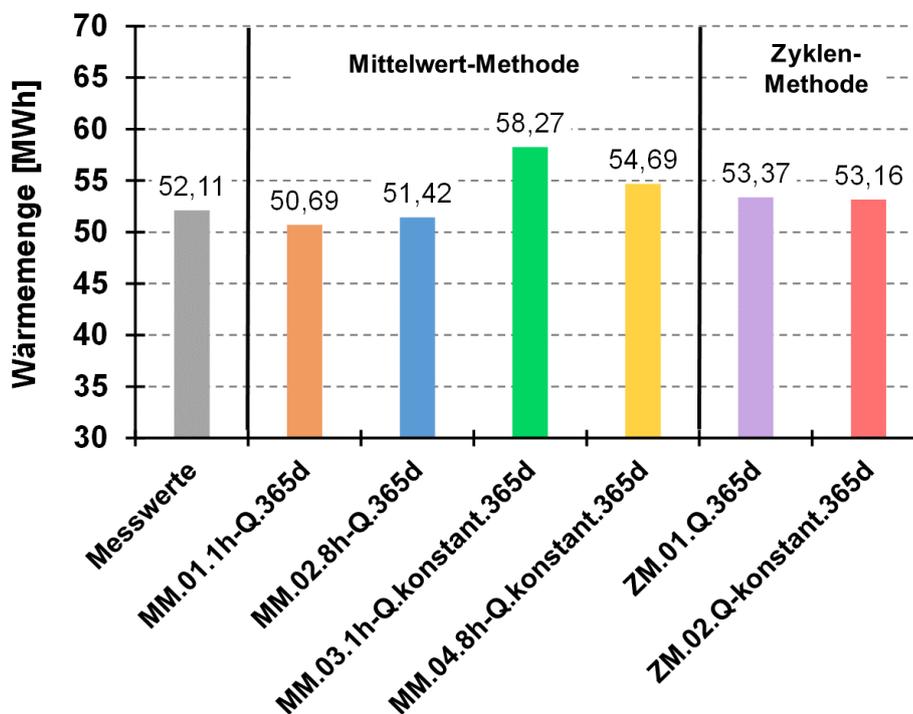


Abbildung 42: Übersicht der simulierten Entzugsmengen der Mittelwert-Methode und der Zyklen-Methode im Vergleich zu gemessenen Wärmemengen.

Hinsichtlich der entzogenen Wärmemenge hat sich aus dieser Modellierung aber die schlechteste Übereinstimmung ergeben. Insgesamt erreichte die Modellierung bei der sowohl der Lastgang als auch der Durchfluss nach 1-Stunden-Intervallen aufbereitet wurde (*MM.01.1h-Q.365d*), unter den Modellen der *Mittelwert-Methode*, die geringsten Abweichungen zum realen Betrieb. Werden die Modelle nach der *Zyklen-Methode* betrachtet, konnte die größte Übereinstimmung von gemessen zu simulierten mittleren Fluidtemperaturen bei dem Szenario *ZM.01.Q.365d* ermittelt werden. Der Simulation lag neben einer modifizierten Lastkurve auch eine aufbereitete Durchflussrate zugrunde.

Ein in Abbildung 43 dargestellter Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der Modelle *MM.01.1h-Q.365d* und *ZM.01.Q.365d* zeigt eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten durch die *Zyklen-Methode*.

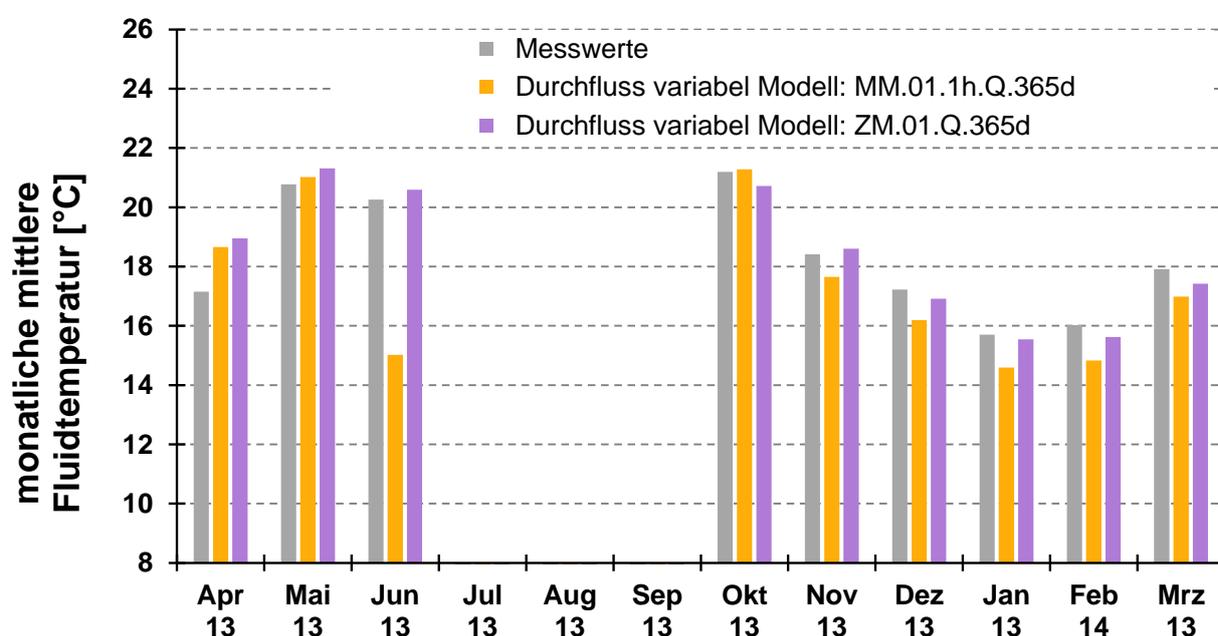


Abbildung 43: Gegenüberstellung der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen. Das Modell nach der Mittelwert-Methode (orange Balken) weist insgesamt eine schlechtere Übereinstimmung mit den Messwerten auf als die auf der Zyklen-Methode basierende Simulation (lila Balken).

### 4.2.3. Betrachtungen zur Prognoseunsicherheit

#### 4.2.3.1. Wärmeleitfähigkeit

Die Modelle zur Untersuchung der, durch eine Variation der Wärmeleitfähigkeit hervorgerufenen Unsicherheiten basieren auf den Standardeinstellungen von  $2,03 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  für die volumetrische Wärmekapazität und  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  für den geothermischen Gradienten. Durch den gewählten Lastgang wurden  $121 \text{ MWh/a}$  an Wärme mit Spitzenlasten von  $70,2 \text{ kW}$  entzogen. Die verschiedenen Modellvariationen und zugehörigen Modellbenennungen wurden bereits in Tabelle 5 vorgestellt.

Die Werte der betrachteten Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen  $1,73 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und  $3,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . In Abbildung 44 sind die Verläufe der täglichen mittleren Fluidtemperaturen der ersten Heizperiode von Oktober bis Mai dargestellt. Die Lücken in den Temperaturverläufen stellen Zeitabschnitte dar, in denen durch die mitteltiefe EWS laut Lastprofil kein Entzug stattfand. In solchen Zeiträumen wird der meist geringe Bedarf ausschließlich durch das oberflächennahe Sondenfeld gedeckt. Das Temperaturniveau aller Modelle sinkt von anfänglichen  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  bis Mitte Februar um durchschnittlich  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mit einer Differenz von  $21,6 \text{ }^\circ\text{C}$  zwischen Ausgangstemperatur und den niedrigsten mittleren Fluidtemperaturen ergibt sich aus dem Modell *MU.1* ( $1,73 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) die stärkste Abkühlung. Anhand der Temperaturverläufe ist ersichtlich, dass diese Abkühlung nicht linear verläuft. Besonders nach inaktiven Phasen der EWS (Lücken im Verlauf) sind deutlich höhere Temperaturen zu beobachten. Auch nach dem allmählichen Nachlassen des Heizenergiebedarfs ab Mitte Februar kann ein allgemeines Ansteigen der mittleren Fluidtemperaturen verzeichnet werden.

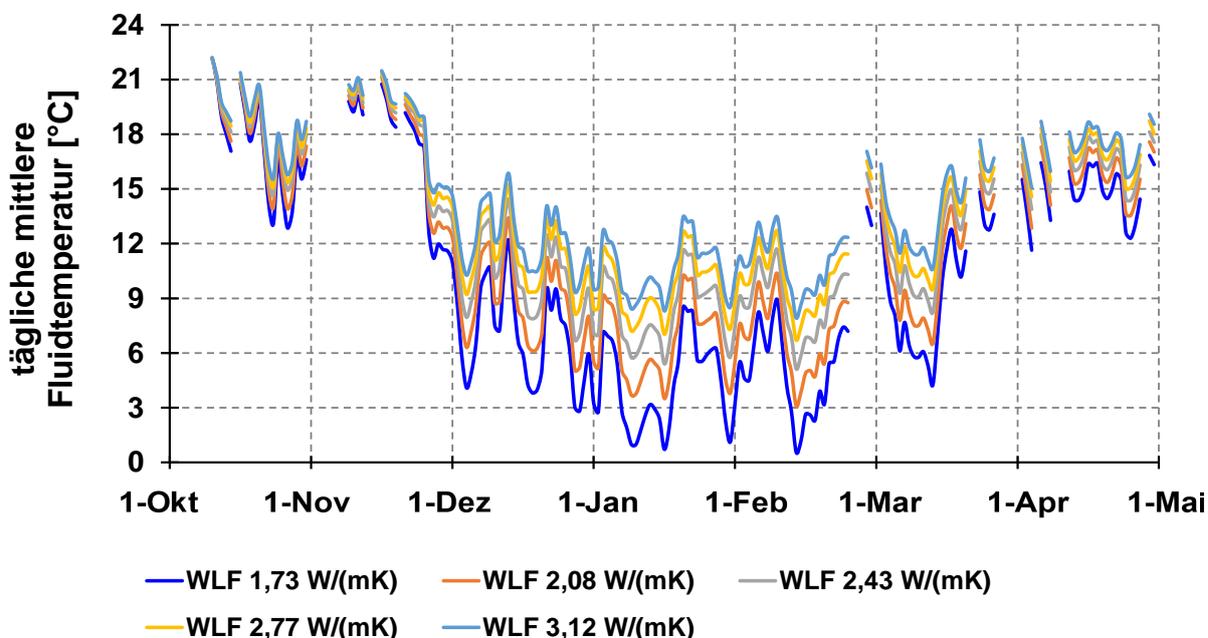


Abbildung 44: Verlauf der mittleren täglichen Fluidtemperaturen im ersten Betrachtungsjahr. Modellzuordnung: *MU.1*:  $1,73 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; *MU.2*:  $2,08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; *MU.3*:  $2,43 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (Mittelwert-Modell); *MU.4*:  $2,77 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; *MU.5*:  $3,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Abbildung 45 zeigt die Abweichungen der mittleren Fluidtemperaturen der verschiedenen Modelle relativ zum *Mittelwert-Modell (MU.3)*. Die Nulllinie stellt dabei die mittleren täglichen Fluidtemperaturen des Mittelwert-Modells *MU.3* mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $2,43 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  dar. Der dunkelgraue Bereich wird durch die Verläufe der Temperaturdifferenzen der Modelle *MU.2* ( $-\sigma$ ,  $2,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) und *MU.4* ( $+\sigma$ ,  $2,77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) zum Mittelwert-Modell definiert. Werden nur die Unsicherheiten durch die Wärmeleitfähigkeiten betrachtet liegt die Wahrscheinlichkeit, dass die mittleren Fluidtemperaturen innerhalb dieser Spannweite liegen, bei  $68,3 \%$ . Mit einer Wahrscheinlichkeit von  $95,5 \%$  liegen die Fluidtemperaturen im von den Modellen *MU.1* ( $-2\sigma$ ,  $1,73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) und *MU.5* ( $+2\sigma$ ,  $3,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) aufgespannten hellgrauen Bereich. Die größten Temperaturdifferenzen sind in der besonders heizintensiven Zeit von Dezember bis Mitte Februar zu beobachten. Das Modell *MU.5* mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $3,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  erreichte im ersten Betriebsjahr bis zu  $2,90 \text{ K}$  höhere mittlere Fluidtemperaturen. Nach vier Jahren stieg die Differenz auf  $3,32 \text{ °K}$ , was eine Zunahme der Abweichung um  $14,3 \%$  bedeutet. Eine Wärmeleitfähigkeit von  $2,77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  resultierte im ersten Jahr in bis zu  $1,62 \text{ °K}$  wärmeren Temperaturen. Binnen vier Jahren stieg die Abweichung um  $8,9 \%$  auf  $1,76 \text{ °K}$ . Die Fluidtemperaturen bei  $2,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  waren, verglichen mit dem Mittelwert-Modell, im ersten Jahr bis zu  $2,09 \text{ °K}$  und im vierten Jahr bis zu  $2,20 \text{ °K}$  kälter. Dies entspricht einer Zunahme der Abweichung um  $4,9 \%$ .

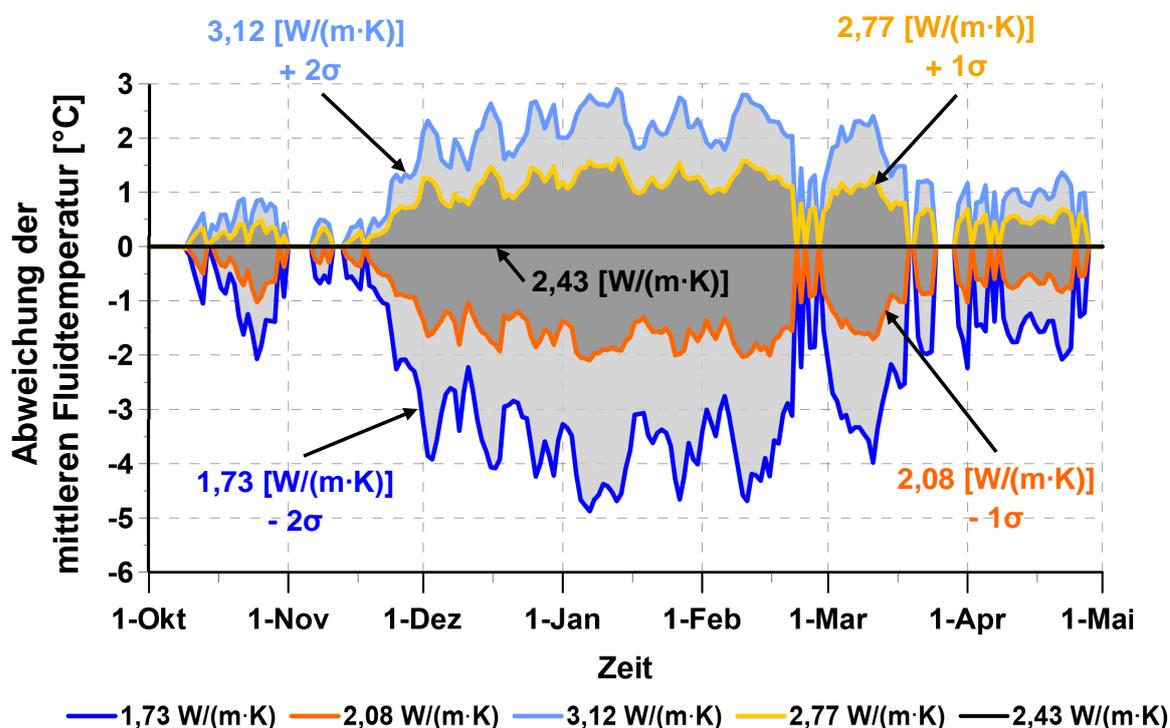


Abbildung 45: Abweichungen (Differenzen) der mittleren Fluidtemperaturen vom Mittelwert-Modell *MU.3* im ersten Betriebsjahr.

Das Modell *MU.1* erreichte mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $1,73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  während der ersten Heizperiode Abweichungen von  $4,88 \text{ °K}$ . Nach vier Jahren äußerten sich die im Vergleich zum *Mittelwert-Modell* um  $0,69 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  geringeren Wärmeleitfähigkeiten durch um  $5,07\text{°C}$  kältere mittlere Fluidtemperaturen. Dies entspricht einer Zunahme der Abweichungen um  $4,0 \%$ . Allgemein konnte eine Abnahme der jährlichen mittleren Fluidtemperaturen mit der Zeit verzeichnet werden. Der Mittelwert der Fluidtemperatur des Standardmodells (*MU.3*) ist von  $12,68 \text{ °C}$  im ersten Jahr auf  $11,78 \text{ °C}$  im vierten Betriebsjahr um  $7,1 \%$  gesunken. Die geringste Abnahme mit  $5,1 \%$  hat sich aus dem Modell mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit ( $3,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) ergeben. Die jährliche mittlere Temperatur des Wärmeträgermittels aus Modell *MU.1* ( $1,73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) ist nach anfänglichen  $10,07\text{°C}$  auf  $8,83\text{°C}$  gesunken. Dies entspricht mit  $12,3 \%$  der stärksten Abnahme. Die aus den verschiedenen Modellkonfigurationen resultierenden monatlichen mittleren Fluidtemperaturen sind in Abbildung 46 dargestellt. Analog zu Abbildung 45 liegt die Wahrscheinlichkeit, dass die mittleren Fluidtemperaturen innerhalb des durch die Modelle *MU.2* ( $-\sigma$ ,  $2,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) und *MU.4* ( $+\sigma$ ,  $2,77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) aufgespannten dunkelgrauen Bereich liegen, bei  $68,3 \%$ . Mit einer Wahrscheinlichkeit von  $95,5 \%$  liegen die Fluidtemperaturen im durch die Modelle *MU.1* ( $-2\sigma$ ,  $1,73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) und *MU.5* ( $+2\sigma$ ,  $3,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) definiertem hellgrauen Bereich. Umgekehrt lässt sich dadurch aber auch festhalten, dass mittlere Fluidtemperaturen außerhalb der grau markierten Temperaturbereiche eher unwahrscheinlich sind.

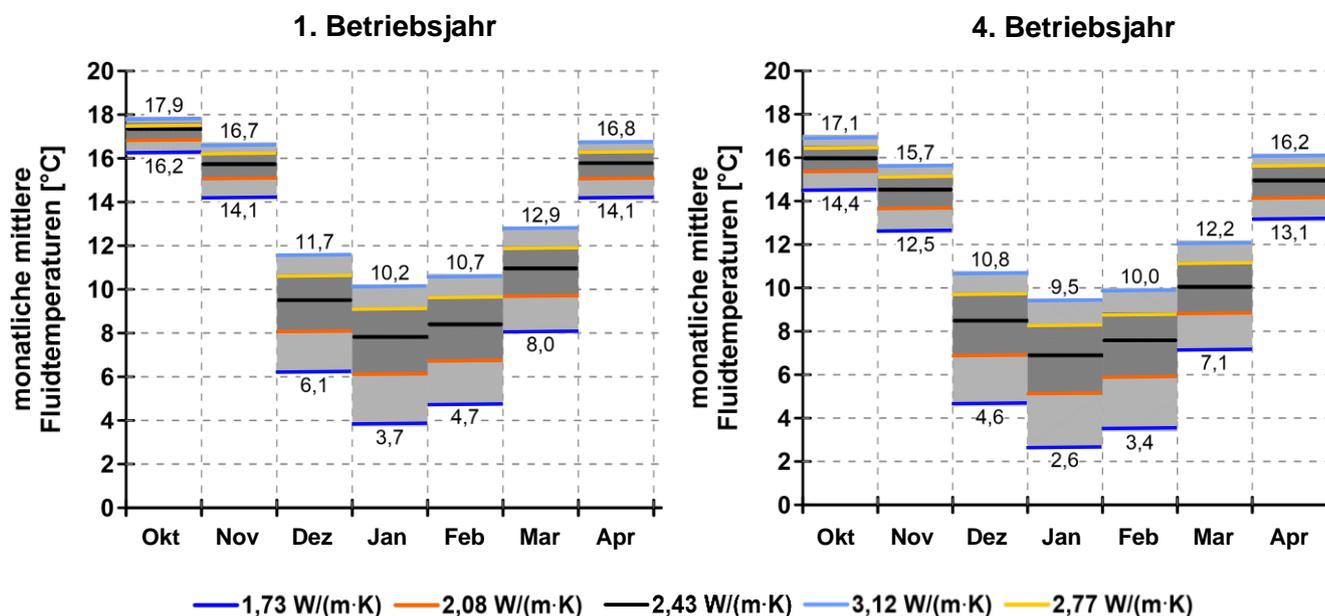


Abbildung 46: Die Abbildung zeigt die monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der verschiedenen Modelle im ersten und im vierten Betriebsjahr.

## 4.2.3.2. Volumetrische Wärmekapazität

Für die Modelle zur Betrachtung der Prognoseunsicherheit infolge einer Variation der vol. Wärmekapazität wurden eine Wärmeleitfähigkeit von  $2,43 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  und ein geothermischer Gradient von  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  festgelegt. Der simulierte Betrieb der EWS ist anhand des, nach der Zyklen-Methode aufbereiteten *Lastgangs*<sub>(Prognose2010)</sub> mit einer Entzugsmenge von  $121 \text{ MWh/a}$  gesteuert worden. Die Werte der betrachteten vol. Wärmekapazität liegen zwischen  $1,70 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  ( $-2\sigma$ ) und  $2,36 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  ( $+2\sigma$ ). Das *Mittelwert-Modell* (MU.3) weist dabei eine vol. Wärmekapazität von  $2,03 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$  auf. Abbildung 47 zeigt die Abweichungen der mittleren täglichen Fluidtemperaturen relativ zum Standardmodell (MU.3) im ersten Betriebsjahr. Die daraus ersichtlichen geringen Temperaturdifferenzen machen bei allen Modellen Werte kleiner  $1 \text{ }^\circ\text{K}$  aus. Bezogen auf das vierte Betriebsjahr ist die stärkste Abweichung mit nur noch  $0,63 \text{ }^\circ\text{K}$  kälteren mittleren Temperaturen durch das Modell MU.7 ( $1,86 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ) verursacht worden. Das Modell MU.7 stellt damit die einzige Simulation dar, bei der eine Zunahme der Abweichung über die Zeit beobachtet wurde. Aus den übrigen Modellen ergaben sich im vierten Jahr um bis zu  $53,8 \%$  geringere Abweichungen.

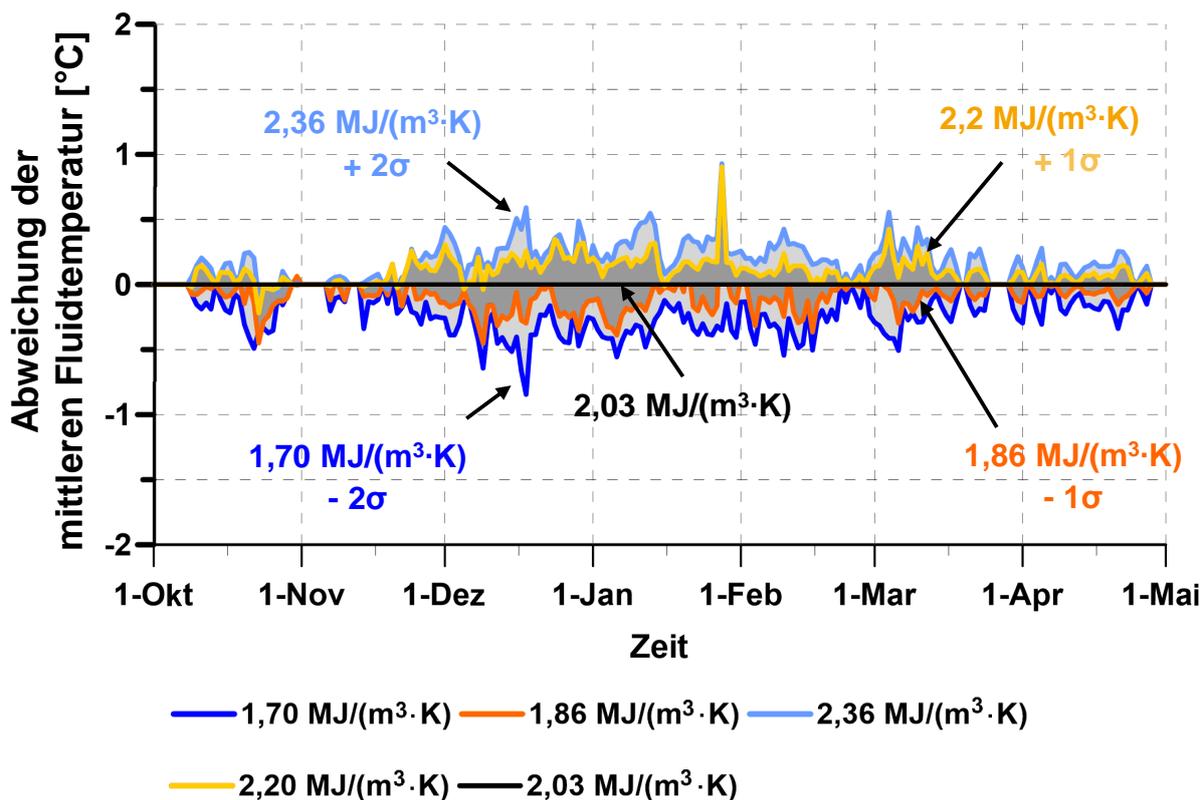


Abbildung 47: Abweichungen der mittleren Fluidtemperaturen relativ zum Mittelwert-Modell im ersten Betriebsjahr. Modellzuordnung: MU.6:  $1,70 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ; MU.7:  $1,86 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ; MU.8:  $2,20 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ; MU.9:  $2,36 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

Die mittleren jährlichen Fluidtemperaturen des ersten Betriebsjahres befanden sich bei allen Modellen mit  $(12,67 \pm 0,19)$  K auf einem ähnlichem Niveau. Nach vier Jahren wurden bei allen Szenarien um durchschnittlich  $(0,98 \pm 0,05)$  K geringere mittlere jährliche Fluidtemperaturen beobachtet. Die in Abbildung 48 dargestellten mittleren monatlichen Fluidtemperaturen im ersten und vierten Betriebsjahr verdeutlichen den geringen Einfluss der vol. Wärmekapazität am Modellergebnis.

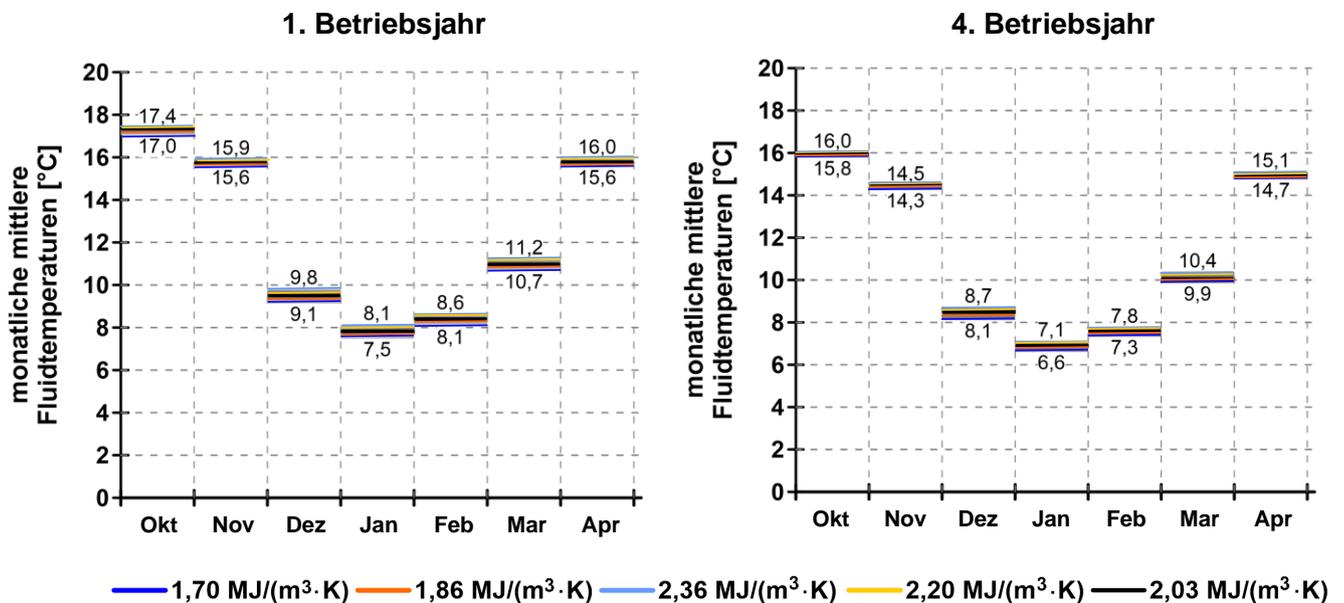


Abbildung 48: Übersicht der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen aller Modelle zur Untersuchung des Einflusses durch die vol. Wärmekapazität im ersten und vierten Betriebsjahr.

#### 4.2.3.3. Gekoppelter Einfluss von Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität

Um eine mögliche Überlagerung der Auswirkungen einer variablen Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit einer sich ändernden volumetrischen Wärmekapazität zu untersuchen, wurden Modelle erstellt, in denen beide Parameter gemeinsam variiert wurden. Um anhand der Simulationen einen möglichen Ergebnisbereich abzugrenzen, sind zunächst die maximalen ( $+2\sigma$ ) beziehungsweise minimalen ( $-2\sigma$ ) Werte in jeweils einem Modell als Randbedingung festgelegt worden. Neben der Parameterkonfiguration des *Mittelwert-Modells* (MU.3) sind die Werte für den Mittelwert plus die Standardabweichung ( $+\sigma$ ), sowie die Werte für den Mittelwert minus die Standardabweichung ( $-\sigma$ ) in jeweils einem Modell zusammengeführt worden. Die Standardeinstellungen von  $3 \text{ °C}/100 \text{ m}$  für den geothermischen Gradienten und der modifizierte Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub> blieben dabei bei jedem Modell konstant. Abbildung 49 zeigt den Verlauf der täglichen mittleren Fluidtemperaturen des ersten Betriebsjahres. Die Lücken in den Temperaturverläufen deuten auf inaktive Phasen der EWS hin. In Vergleich der Ergebnisse aus einer reinen Variation der Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 44) ergibt sich

aus einer gemeinsamen Parametervariation von Wärmeleitfähigkeit und vol. Wärmekapazität nur ein geringer Effekt. Dieser äußerte sich am stärksten bei den Modellen mit zweifacher Standardabweichung *MU.10* (1,73 W/(m·K); 1,70 MJ/(m<sup>3</sup>·K)) und *MU.13* (3,12 W/(m·K); 2,36 MJ/(m<sup>3</sup>·K)). Der jährliche Mittelwert im ersten Betriebsjahr ergab für Modell *MU.10* einen Wert von 9,82 °C. Der Mittelwert für Modell *MU.1* (1,73 W/(m·K)), bei dem nur die Wärmeleitfähigkeit verändert wurde, lag hingegen bei 10,07 °C. Für Modell *MU.13* konnte mit 14,47 °C ein um nur 0,2 K höherer Mittelwert im Vergleich zu *MU.5* (nur Wärmeleitfähigkeit variiert, 3,12 W/(m·K)) für das erste Jahr ermittelt werden. Eine zusätzliche Auswirkung auf die Entwicklung des jährlichen Mittelwertes über die Zeit durch eine Variation beider Parameter konnte nicht beobachtet werden. Die Abnahme des Jahresmittelwertes des Wärmeträgermediums vom ersten bis zum vierten Betriebsjahr ist dabei mit jenen Werten der Modelle *MU1.* bis *MU.5* vergleichbar.

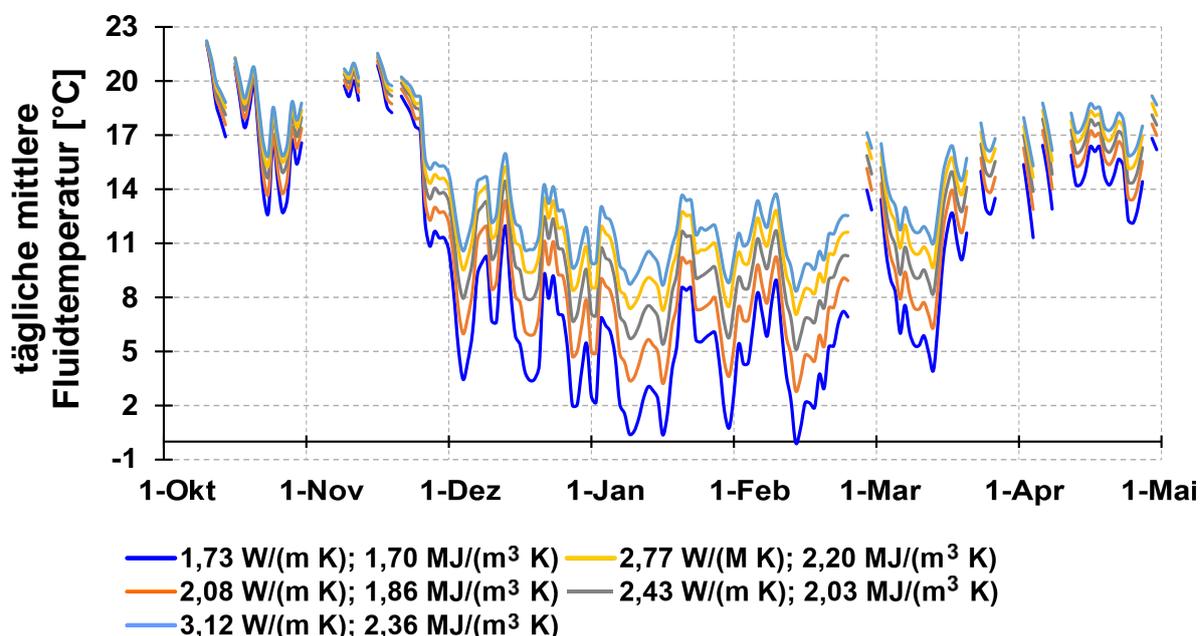


Abbildung 49: Verlauf der täglichen mittleren Fluidtemperaturen der kombinierten Variation von Wärmeleitfähigkeit und vol. Wärmekapazität.

Abbildung 50 zeigt die durch die verschiedenen Parameterkonfigurationen hervorgerufenen Abweichungen der mittleren Fluidtemperatur relativ zum *Mittelwert-Modell*. Aus Modell *MU.10* (1,73 W/(m·K); 1,70 MJ/(m<sup>3</sup>·K)) ergaben sich im ersten Betriebsjahr bis zu 5,32 K kältere Temperaturen. Nach vier Jahren betrug die Differenz zu Modell *MU.3* 5,73 K. Im vierten Betriebsjahr konnten bei Modell *MU.11* (orange Kurve) bis zu 2,54 K geringere und bei Modell *MU.12* (gelbe Kurve) bis zu 1,81 K höhere mittlere Fluidtemperaturen verzeichnet werden. Mit Modell *MU.13* (3,12 W/(m·K); 2,36 MJ/(m<sup>3</sup>·K)) wurden in der ersten Heizperiode 3,27 K und im vierten Jahr 3,49 K wärmere mittlere Temperaturen des Wärmeträgermittels beobachtet. Die Werte befinden sich daher ebenfalls in vergleichbaren Größenordnungen wie die Ergebnisse aus der reinen Variation der Wärmeleitfähigkeiten. Ein Einfluss durch die vol. Wärmekapazität ist demnach als gering einzuschätzen.

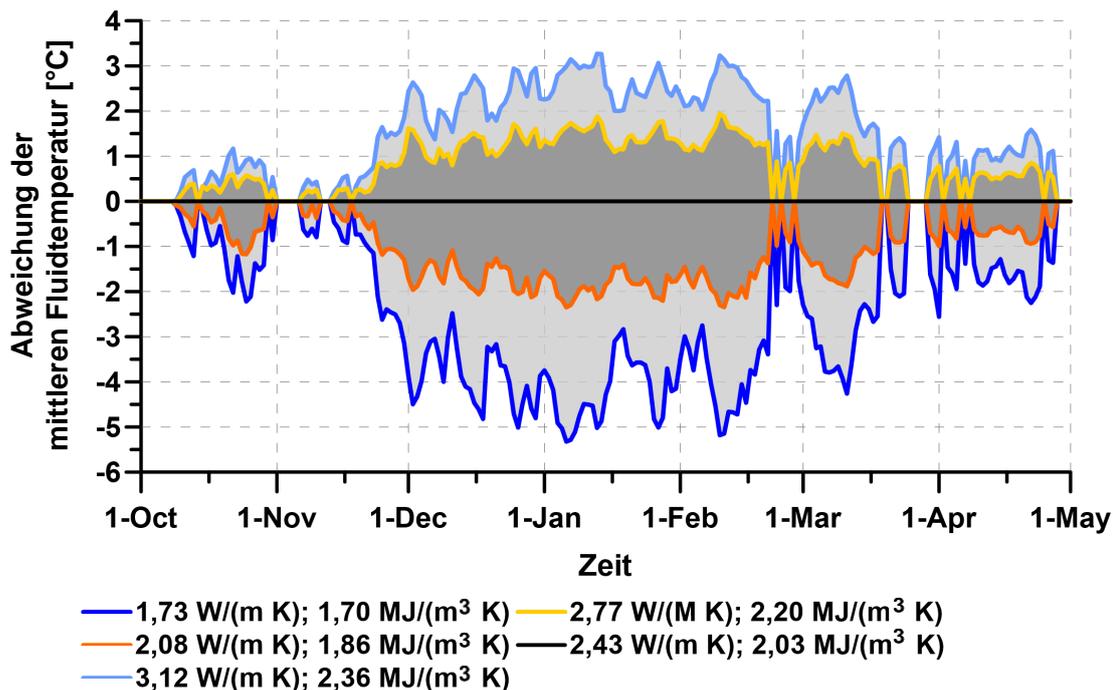


Abbildung 50: Differenz der mittlere Fluidtemperaturen relativ zum Mittelwert-Modell (MU.3).  
 Modellzuordnung: MU.10: 1,73 W/(m·K) und 1,70 MJ/(m<sup>3</sup>·K); MU.11: 2,08 W/(m·K) und 1,86 MJ/(m<sup>3</sup>·K); MU.12: 2,77 W/(m·K) und 2,20 MJ/(m<sup>3</sup>·K); MU.13: 3,12 W/(m·K) und 2,36 MJ/(m<sup>3</sup>·K)

#### 4.2.3.4. Geothermischer Gradient

Die Variation des geothermischen Gradienten fand von 2,5 °C/100 m bis 3,5 °C/100 m in 0,25 °C/100 m-Schritten statt. Für das Standardmodell wurde ein Gradient von 3 °C/100 m gewählt. Der markanteste Unterschied im Verlauf der mittleren Fluidtemperaturen zu den Ergebnissen der übrigen untersuchten Parameter ist aus Abbildung 51 ersichtlich. Während bei den Modellen MU.1 bis MU.13 und MU.19 bis MU.22 insbesondere zu Beginn jeder Heizperiode eine ähnliche Temperatur als Ausgangswert verzeichnet wurde, sind bei den Modellen zur Betrachtung der Prognoseunsicherheit bei einer Variation des geothermischen Gradienten (MU.14 bis MU.18) bereits von Anfang an entsprechende Differenzen der Fluidtemperaturen zu beobachten. Hinsichtlich der Abweichungen zum Standardmodell ergaben sich ebenfalls Unterschiede zu den restlichen Simulationen. Durch eine Variation des geothermischen Gradienten sind annähernd konstant bleibende Abweichungen über die Zeit zu beobachten (Abbildung 52 und Abbildung 53). Durch eine Variation der übrigen Parameter haben sich ein Minimum der Temperaturabweichung zu Beginn der Heizperiode sowie ein Maximum der Abweichungen von Dezember bis Mitte Februar gebildet. Die aus Modell MU.14 (2,5 °C/100 m) resultierenden täglichen mittleren Fluidtemperaturen erreichten Mitte Februar mit 2,2 K den niedrigsten Wert. Ausgehend vom höchsten Wert (18,74 °C) zu Beginn der Heizperiode entspricht das einer durch den Entzug

hervorgerufenen Abkühlung von  $16,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eine Abkühlung dieser Größenordnung ist auch bei den restlichen Modellen der Variation des geothermischen Gradienten beobachtet worden.

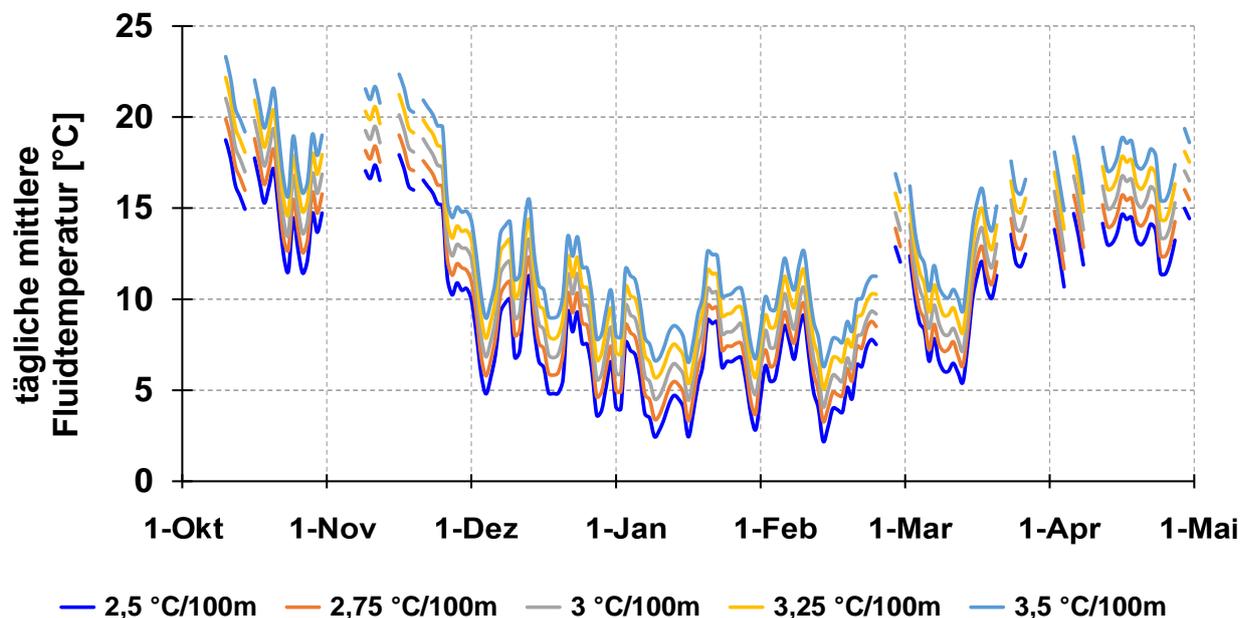


Abbildung 51: Dargestellt ist der Verlauf der täglichen mittleren Fluidtemperaturen im ersten Betriebsjahr. Modellzuordnung: MU.14:  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ; MU.15:  $2,75\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ; MU.16:  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ; MU.17:  $3,25\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ; MU.18:  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$

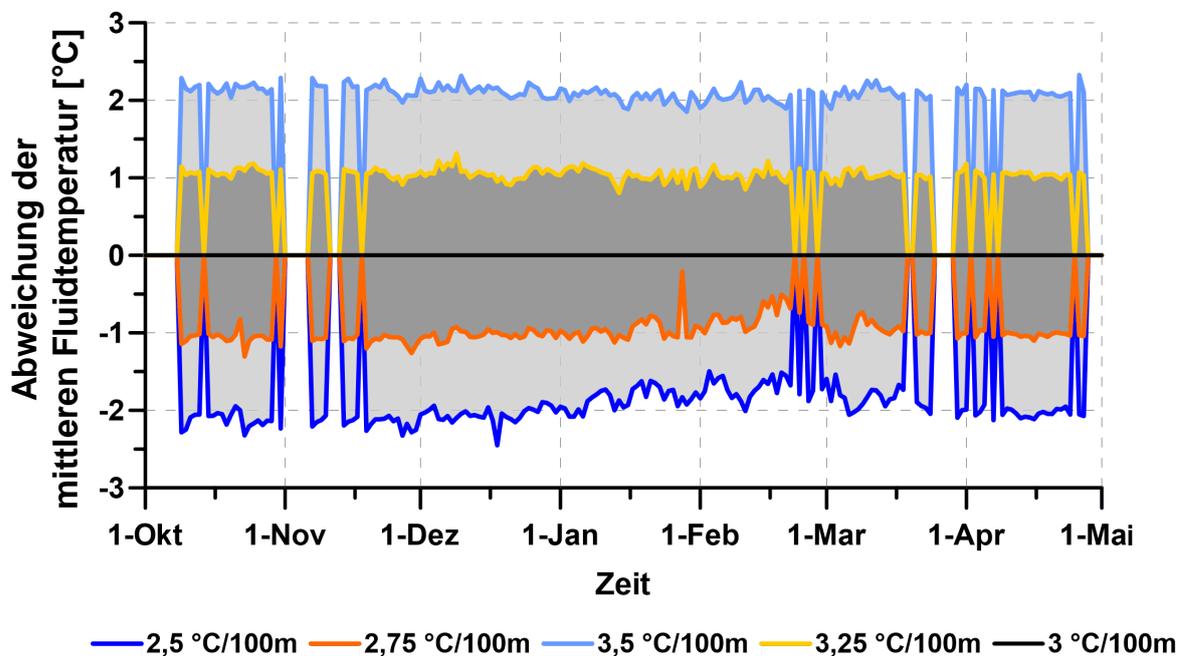


Abbildung 52: Abweichung der aus einer Variation des geothermischen Gradienten resultierenden mittleren Fluidtemperaturen im ersten Betriebsjahr, gemessen am Mittelwert-Modell.

Abbildung 53 zeigt einen Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen des ersten Betriebsjahres zu jenen des vierten Jahres. Daran lässt sich eine Abnahme der mittleren Fluidtemperatur erkennen die innerhalb von vier Jahren bei allen Modellen monatlich in etwa 1 °K ausmacht.

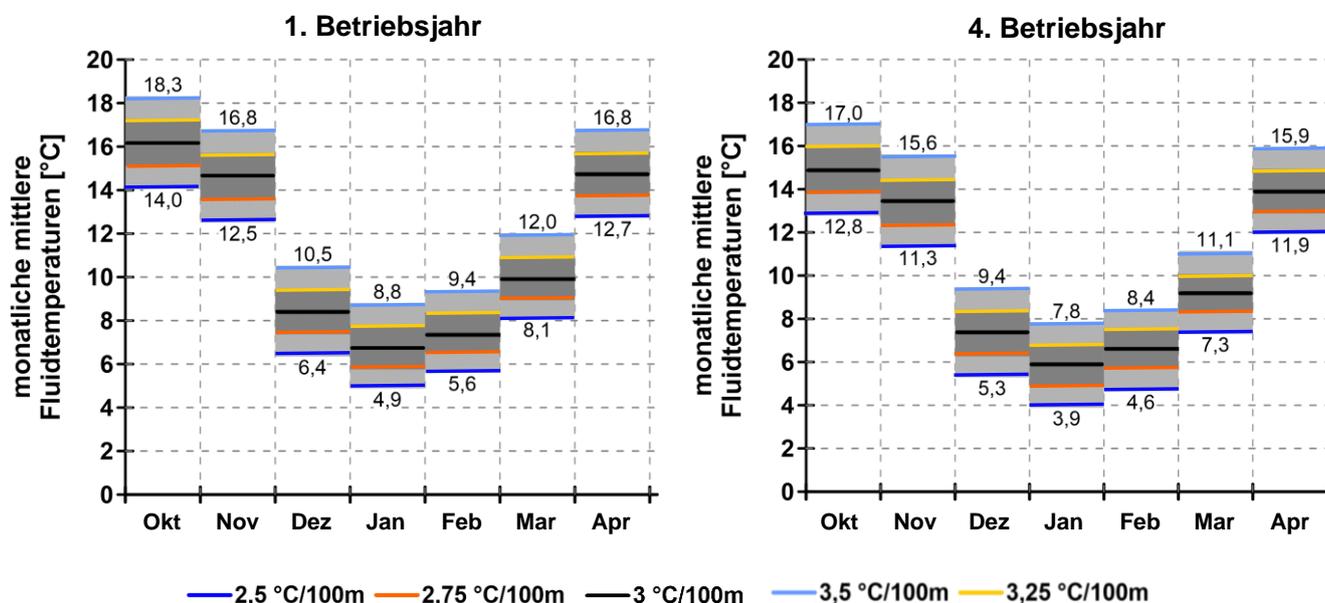


Abbildung 53: Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen im ersten (links) und im vierten (rechts) Betriebsjahr.

#### 4.2.3.5. Lastgang

Für die Untersuchung der Unsicherheiten, die aus einem wechselnden Wärmebedarf hervorgehen, wurden Modelle mit verschiedenen Lastgängen erstellt. Um unterschiedlich hohe Entzugsmengen zu erreichen, ist lediglich die simulierte Dauer der aktiven EWS variiert worden. Dadurch konnte bei allen Simulationen die Durchflussrate, die thermische Entzugsleistung und die Temperaturspreizung zwischen Einlass und Auslass konstant gehalten werden. Die Variation reichte von einem sehr kalten Winter mit einem Bedarf an 143 MWh/a (MU.22) bis zu den prognostizierten 55 MWh/a (MU.21) an Wärme für einen milden Winter. Der Lastgang mit einer Entzugsmenge von 121 MWh wurde dabei als Referenz verwendet, da diese Lastkurve die Grundlage für die Auslegung der mitteltiefen EWS in Heubach darstellte (HSE 2011). An den in Abbildung 54 dargestellten Differenzen der mittleren Fluidtemperatur ist ersichtlich, dass sich die Abweichungen, verglichen mit den Modellen zur Variation der Wärmeleitfähigkeit rascher ausbilden. Bei einer Gegenüberstellung mit den Ergebnissen aus der Variation des geothermischen Gradienten ergaben sich größere Schwankungen im Temperaturverlauf. Im ersten Betriebsjahr wurde für Modell MU.22 (143 MWh/a) eine durchschnittliche Abweichung vom Mittelwert-Modell (MU.3) von  $(1,3 \pm 0,9)$  °K ermittelt. Modell MU.21 (55 MWh/a) wies hingegen im Mittel

( $4,9 \pm 2,3$ ) K wärmere Fluidtemperaturen auf. Für das Modell *MU.20* (96 MWh/a) ist eine mittlere Abweichung im ersten Betriebsjahr von ( $3,3 \pm 1,6$ ) K verzeichnet worden. Die stärksten Schwankungen der Temperaturdifferenzen wurden mit ( $2,2 \pm 2,0$ ) K bei Modell *MU.19* (73 MWh/a) beobachtet.

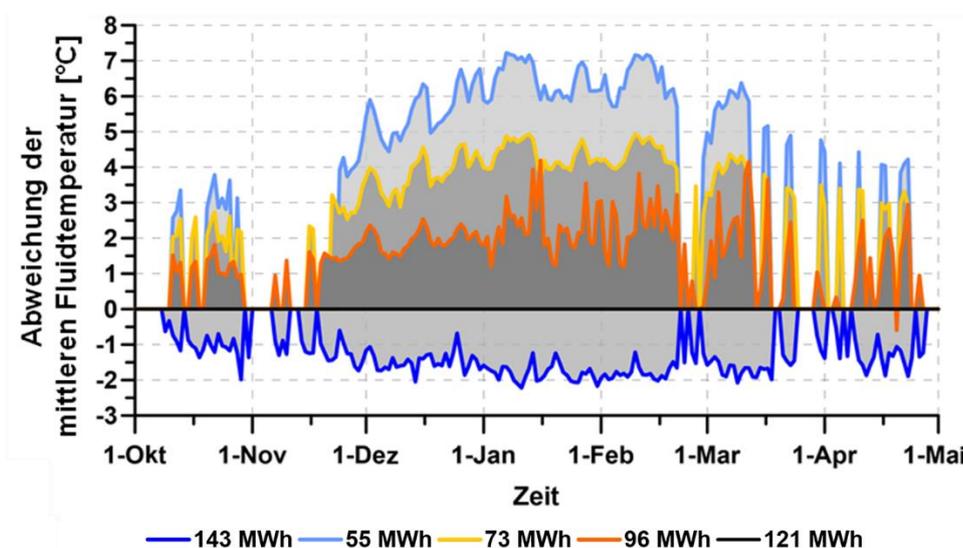


Abbildung 54: Temperaturdifferenzen der verschiedenen Modelle zur Bestimmung der Prognoseunsicherheit bezogen auf das Mittelwert-Modell (*MU.3*). Modellzuordnung: *MU.3*: 121 MWh/a (Mittelwert-Modell, entspricht der Nulllinie) *MU.19*: 96 MWh/a; *MU.20*: 73 MWh/a; *MU.21*: 55 MWh/a; *MU.22*: 143 MWh/a

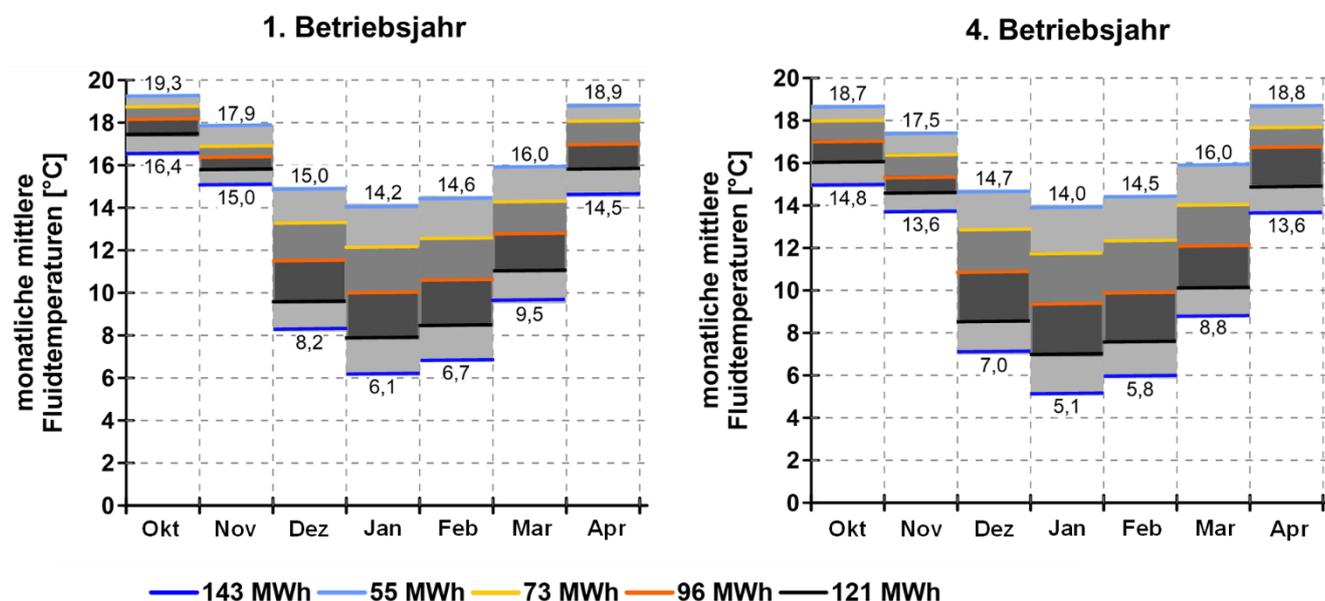


Abbildung 55: Vergleich der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen der Modelle zur Variation des Lastgangs im ersten und vierten Jahr.

Abbildung 55 zeigt eine Gegenüberstellung der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen des ersten und des vierten Betriebsjahres. Dabei fällt auf, dass sich die Fluidtemperaturen des Modells *MU.21*

(55 MWh/a) kaum veränderten, während bei Modell *MU.22* (143 MWh/a) nach vier Jahren Betrieb bis zu 1,4 K kältere Temperaturen des Wärmeträgermittels verzeichnet wurden.

#### 4.2.3.6. Vergleich der Einflussstärken der Parameter

Ein Vergleich der, durch eine Variation der verschiedenen Parameter hervorgerufenen Auswirkungen auf die mittleren Fluidtemperaturen ist in Abbildung 56 dargestellt. Die Einflussstärke kann anhand der prozentualen Abweichungen vom *Mittelwert-Modell* verdeutlicht werden. Der Nullpunkt entspricht damit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,43 W/(m·K), einer vol. Wärmekapazität von 2,03 MJ/(m<sup>3</sup>·K), sowie einer Entzugsmenge von 121 MWh. Für die Variation des geothermischen Gradienten wird von einem mittleren Wert von 3 °C/100 m (im Nullpunkt) ausgegangen. Im Rahmen der gewählten Parameterkonstellation kann ein starker Einfluss des geothermischen Gradienten auf die Fluidtemperatur beobachtet werden. Die Beziehung beschreibt dabei eine lineare Abhängigkeit. Einen ebenfalls verhältnismäßig großen Einfluss ist durch die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes gegeben. Dabei wird durch eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit eine größere Abweichung der mittleren Fluidtemperatur verursacht als bei einem Anstieg. Aus der Variation des Lastgangs ergibt sich bei einem Anstieg der entzogenen Wärmemenge eine Abkühlung der mittleren Fluidtemperatur. Diese Abkühlung ist ebenfalls höher einzuschätzen als die resultierende Temperaturerhöhung die sich aus einer Verringerung der Entzugsmenge ergeben würde. Die Wärmekapazität des Untergrundes zeigt unter gegebenen Bedingungen einen relativ geringen Einfluss auf die mittlere Fluidtemperatur.

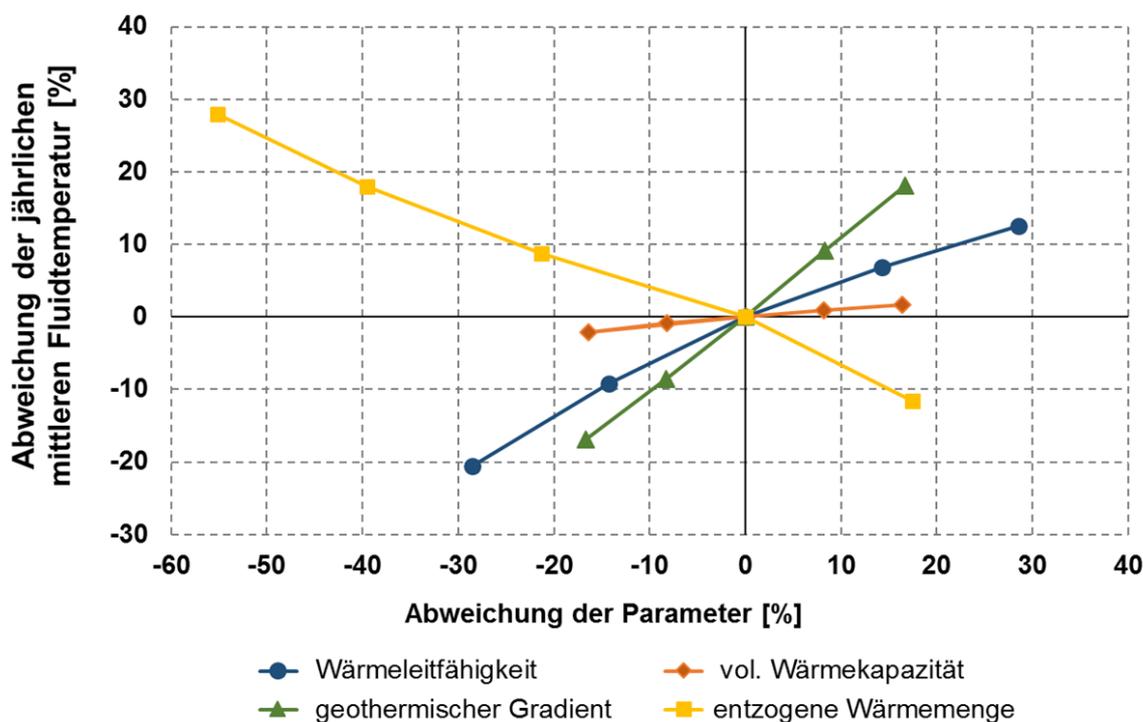


Abbildung 56: Einfluss der verschiedenen Parameter auf die mittlere Fluidtemperatur.

#### 4.2.4. Prognosemodellierung und modifizierte Betriebsszenarien

Für die Prognosebetrachtungen wurde der Betrieb der mitteltiefen EWS über 15 Jahre simuliert. Dafür ist der Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub> nach der Zyklen-Methode aufbereitet worden. Aus den Betriebsdaten der EWS hat sich eine durchschnittliche thermische Leistung von 85 kW bei einer Temperaturspreizung von 4°C zwischen Einlass- und Auslasstemperatur und einer mittleren Durchflussrate von 5 l/s ergeben. Durch den Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub> würde der Entzug jedoch lediglich mit Spitzenleistungen von 70,2 kW erfolgen. Um eine auf den tatsächlichen Betriebsbedingungen basierende Prognose zu erstellen, wurde die Leistung des modifizierten Lastgangs<sub>(Prognose2010)</sub> auf 85 kW gesetzt. Um dennoch einen Wärmeentzug von 121 MWh/a zu erreichen, ist die Entzugsdauer je Zyklus entsprechend verkürzt worden. Die längste Dauerentzugsphase liegt dadurch bei 6,5 Stunden. Das daraus resultierende Modell *PM.01* entspricht einem gleichmäßigen Entzugsverhalten in einem kalten Winter. Die Durchflussrate bei inaktiver EWS wurde von 5 l/s auf 0,01 l/s gedrosselt. Eine Übersicht der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen kann Abbildung 57 entnommen werden. Der monatliche Mittelwert setzt sich dabei aus den mittleren Fluidtemperaturen aller entsprechenden Monate über den gesamten Betrachtungszeitraum von 15 Jahren zusammen. Da für die Berechnung der mittleren Fluidtemperatur wieder das Kriterium der aktiven EWS ( $\Delta T > 2 \text{ K}$  und  $Q > 1,4 \text{ l/s}$ ) festgelegt wurde, ergaben sich für die Monate in denen die EWS nicht betrieben wurde (Mai bis September) keine Temperaturwerte. Für die heizintensive Zeitspanne von Dezember bis Februar sind mittlere Fluidtemperaturen von 10 °C bis 11,2 °C ermittelt worden.

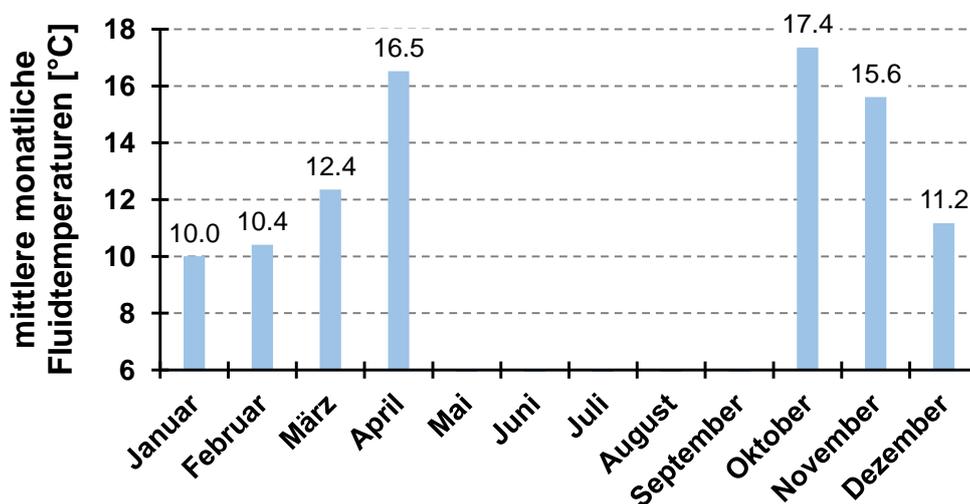


Abbildung 57: Übersicht der monatlichen, über den gesamten Betrachtungszeitraum von 15 Jahren gemittelten, Fluidtemperaturen.

Über die Zeit gesehen ist ein Sinken der monatlichen Mittelwerte beobachtet worden. Die Abkühlung fand dabei jedoch nicht linear statt. Auf die Jahresmitteltemperaturen bezogen nahm die Abkühlungsrate sukzessive ab. In den Monaten Dezember bis Februar von der ersten auf die zweite

Heizperiode sind im Mittel um 0,41 K kältere monatliche mittlere Fluidtemperaturen verzeichnet worden. Vom 14. auf das 15. Betriebsjahr (von Dezember bis Februar) wurden hingegen nur noch um durchschnittlich 0,03 K geringere monatliche Mittelwerte verzeichnet. Diesen Zusammenhang sollen die in Abbildung 58 gegenübergestellten monatlichen mittlere Fluidtemperaturen vom ersten, vierten und 15. Betriebsjahr verdeutlichen. Binnen der ersten vier Betriebsjahre fand, bezogen auf die Jahresmitteltemperaturen, eine Abkühlung von 0,83 K statt. In den elf Jahren ab dem vierten Betriebsjahr bis zur 15. Heizperiode sank die Jahresmitteltemperatur um insgesamt nur noch 0,61 K.

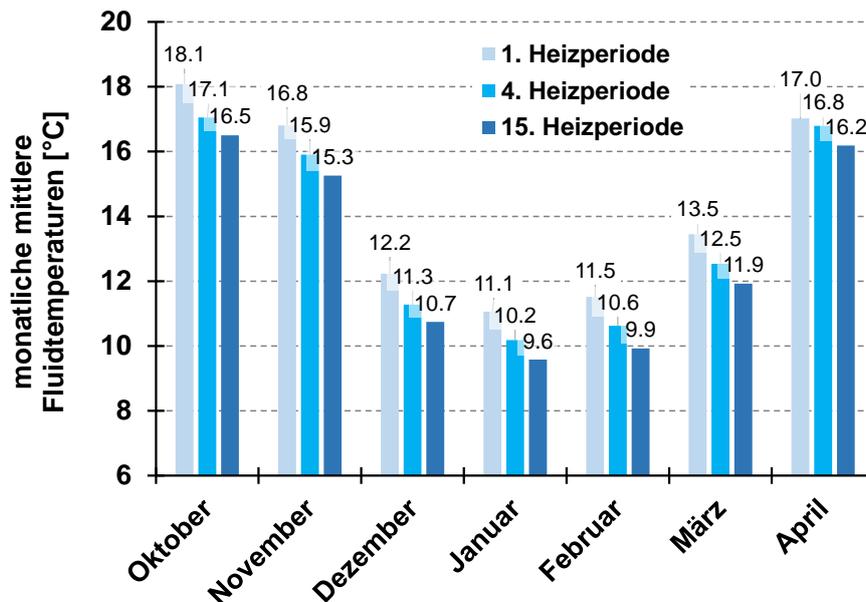


Abbildung 58: Dargestellt ist die Abnahme der monatlichen mittleren Fluidtemperatur über die Zeit.

Neben der Simulation für kalte Winter wurde auch eine auf den Messwerten basierende Prognosemodellierung durchgeführt. Der Simulationszeitraum betrug ebenfalls 15 Jahre. Mit einer jährlichen Entzugsmenge von 52 MWh/a ist diese Simulation (PM.02) auf den Heizenergiebedarf eines milden Winters ausgelegt. Im ersten Betriebsjahr wurden im Januar mit einem Wert von 14,8 °C die geringsten mittleren Fluidtemperaturen ermittelt. Nach 15 Jahren Betrieb sank die ebenfalls im Januar verzeichnete, geringste Monatstemperatur auf 14,4 °C. Bezogen auf die Monate Dezember bis Februar konnten in der 15. Heizperiode um durchschnittlich nur 0,44 K kältere mittlere Fluidtemperaturen gegenüber dem ersten Betriebsjahres festgestellt werden. Die mittlere jährliche Abkühlungsrate bei Modell PM.02 infolge von geringem Wärmeentzug ist demnach sehr gering. Die in PM.01 simulierte Abfolge kalter Winter basiert auf einem gleichmäßigen Lastprofil. Zusätzlich wurde anhand der Zyklen-Methode und basierend auf den gemessenen Betriebszeiten von April 2013 bis März 2014 ein Lastgang zur Deckung des Heizenergiebedarfs eines kalten Winters (121 MWh/a) generiert. Um die entsprechenden Entzugsmengen zu erreichen wurde die Betriebsdauer in den Zyklen mit aktiver EWS verlängert. Die thermische Leistung wurde auf 85 kW bei einem Durchfluss von 5 l/s während des aktiven Entzugs festgelegt. Die resultierende Lastkurve beschreibt ein unregelmäßiges

Entzugsverhalten mit zwei Dauerentzugsphasen. Neben langen Stillstandzeiten von 22. bis 26. Dezember und 06. bis 09. Januar wurden eine drei-tägige Dauerentzugsphase vom 16. bis 18. Dezember und ein vier-tägiger Entzug vom 12. Januar bis einschließlich 15. Januar festgelegt. Daran soll die Auswirkung auf die mittlere Fluidtemperatur infolge von Lastgängen mit Dauerentzugsphasen verdeutlicht werden. In Abbildung 59 sind die auf den gesamten Betrachtungszeitraum von 15 Jahren gemittelten monatlichen Fluidtemperaturen der Modelle *PM.01*, *PM.02* und *PM.03* gegenübergestellt. Das Fehlen der mittleren monatlichen Temperaturen für Mai und Juni bei dem Modell *PM.01* lässt sich durch den Lastgang begründen, der in diesen Monaten keinen aktiven Betrieb der EWS vorgesehen hat. *PM.02* und *PM.03* liegt der gemessene Lastgang zugrunde. Im Mai 2013 und Juni 2013 wurden noch einzelne kurze Entzugszyklen dokumentiert (Abbildung 12).

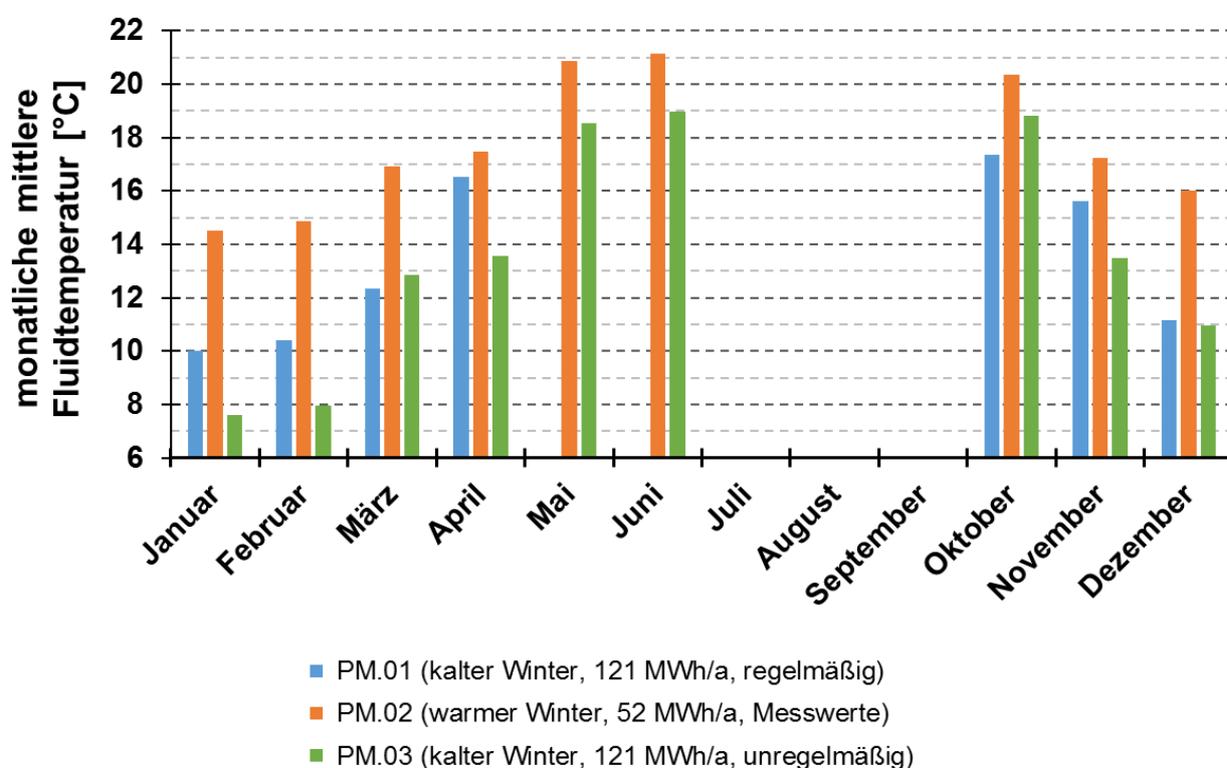


Abbildung 59: Übersicht der Prognosemodelle mit regelmäßigem Lastgang (*PM.01*, kalter Winter), auf Grundlage der gemessenen Leistungskurve (*PM.02*, warmer Winter), sowie mit einem unregelmäßigen Lastgang (*PM.03*, kalter Winter).

Der Vergleich der monatlichen Fluidtemperaturen infolge eines kalten Winters mit regelmäßigem Entzugsverhalten (*PM.01*) mit jenen Temperaturen die sich aus einem unregelmäßigen Lastgang (*PM.03*) ergaben zeigt, dass in den heizintensiven Monaten (Dezember bis Februar) zum Teil deutlich niedriger mittlere Fluidtemperaturen erreicht werden. Außerdem waren bei der Simulation *PM.03* stärkere Schwankungen der mittleren Fluidtemperaturen zu beobachten. In Abbildung 60 werden die Temperaturverläufe im 15. Betriebsjahr dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich allein aus der

Dauerentzugsphase vom 12. Januar bis 15. Januar eine Verringerung der mittleren Fluidtemperatur um 9,32 K ergeben hat. Die Temperaturverläufe des milden und des kalten Winters weisen hingegen weniger stark ausgeprägte Schwankungen auf. Die Ergebnisse aus Modell *PM.03* können daher als Extremwerte betrachtet werden. Die Lücken in den, in Abbildung 60 dargestellten Temperaturverläufen weisen auf inaktive Phasen der EWS hin. Im Hinblick auf eine realistische Prognosemodellierung sollte bedacht werden, dass nicht 15 Jahre in Folge gleiche klimatische Bedingungen vorherrschen. Die Ergebnisse der Simulation *PM.01* können demnach eine Untergrenze der zu erwartenden mittleren Fluidtemperaturen aufgrund vieler aufeinander folgender kalter Winter darstellen. Die Ergebnisse aus *PM.02* hingegen, werden vermutlich nur erreicht werden, wenn die nächsten 15 Jahre derart milde Winter vorherrschen wie es zur Heizperiode 2013/14 der Fall war. Unter normalen klimatischen Bedingungen können die Ergebnisse aus *PM.01* und *PM.02* daher den prognostizierten Bereich der mittleren Fluidtemperaturen nach 15 Jahre Betrieb für die mitteltiefe EWS in Heubach definieren (siehe graue Fläche in Abbildung 60).

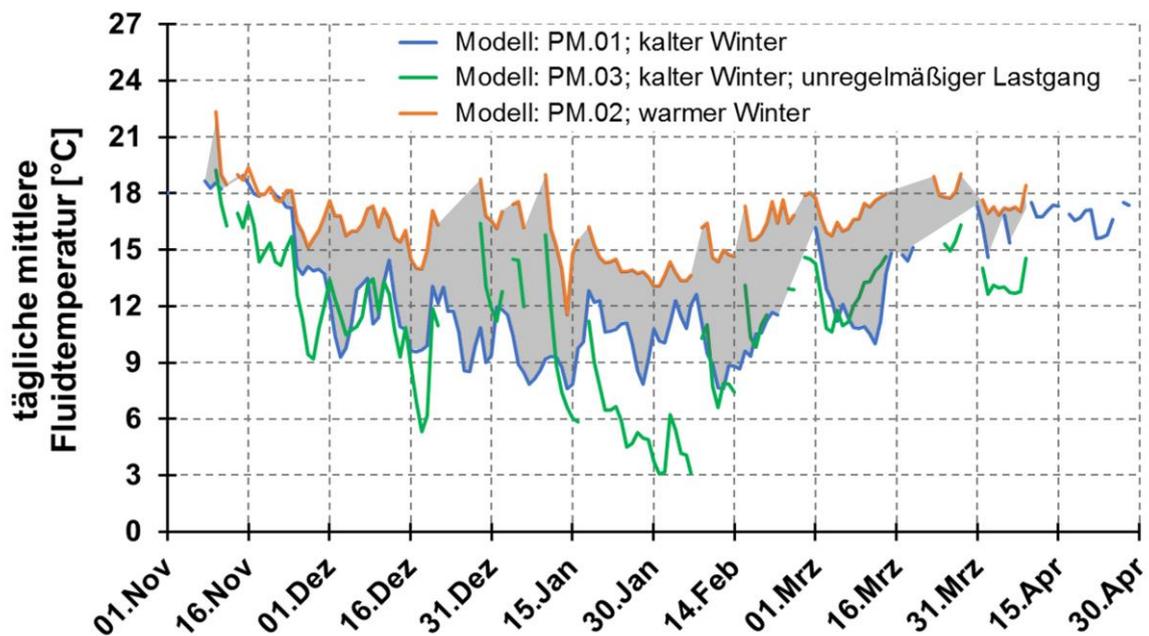


Abbildung 60: Vergleich der Verläufe der täglichen mittleren Fluidtemperaturen eines kalten (blaue Kurve, *PM.01*) und warmen Winters (orange Kurve, *PM.02*) im 15. Betriebsjahr. Die grüne Kurve ist das Ergebnis aus einem unregelmäßigem Entzugsverhalten (*PM.03*). Lücken des Temperaturverlaufs stellen Stillstandzeiten der EWS dar.

Der zu erwartende Temperaturbereich der monatlichen Mittelwerte (grauer Bereich) nach 15 Jahren Betrieb ist in Abbildung 61 dargestellt. Die Obergrenze wird durch das Prognosemodell *PM.02* mit der Annahme von 15 milden Wintern in Folge definiert. Die Ergebnisse aus Modell *PM.01* bestimmen dabei die untere Abgrenzung des Temperaturbereichs. Die Voraussetzung dafür ist ein, einem kalten Winter entsprechendes, gleichmäßiges Entzugsverhalten über 15 Jahre. Die grün dargestellten monatlichen

mittleren Temperaturen des Wärmeträgermediums stellen aus Dauerbelastung bei unregelmäßigen Entzugsverhalten resultierende Extremwerte dar.

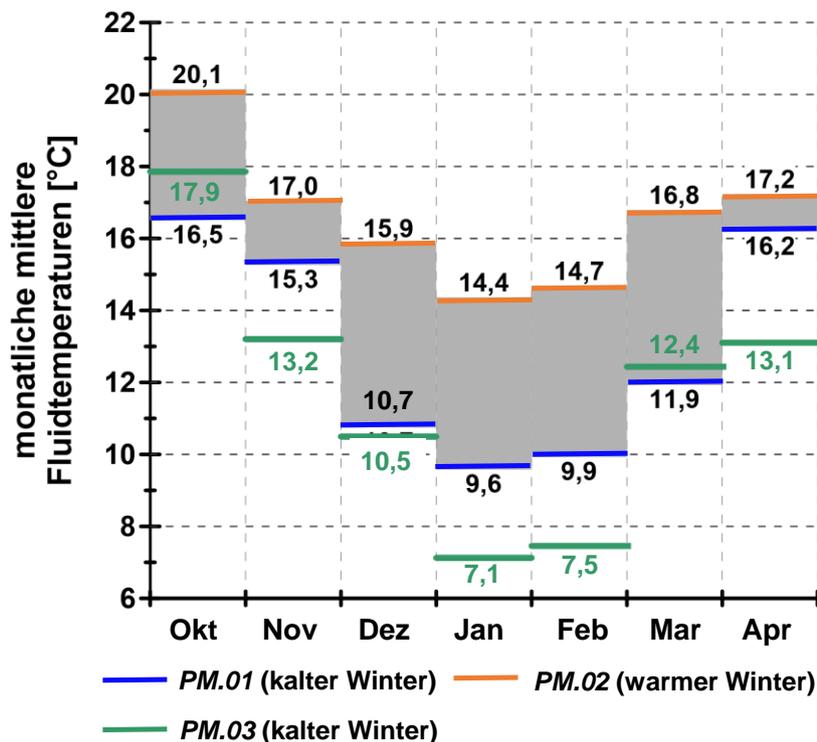


Abbildung 61: Abgebildet ist der zu erwartende Temperaturbereich (graue Fläche) nach 15 Jahren Betrieb. Die grün dargestellten monatlichen mittleren Fluidtemperaturen entsprechen durch Dauerbetrieb hervorgerufenen Extremwerten.

In Heubach werden dem Untergrund im Sommer über das oberflächennahe Erdwärmesondenfeld 20,5 MWh/a an Wärme zugeführt. Anhand des Modells *PM.04* wurde untersucht ob ein Einbringen dieser thermischen Energie über die mitteltiefe EWS einen Einfluss auf die Regeneration des Untergrundes hat. Durch die Simulation sollte geprüft werden, ob sich durch eine verbesserte Regenerationsrate höhere Fluidtemperaturen und damit auch eine Einsparung der benötigten Sondenmeter erreichen lassen würde. Die Einspeisung im Sommer erfolgte in den Monaten Juli bis August. Die Leistung für die Einspeisung wurde auf 45 kW festgelegt. Mit einer Durchflussrate von 5 l/s bei einer aktiven Einspeisung ergab sich eine Temperaturspreizung von etwa 2 K zwischen Einlass- und Auslasstemperatur. Zur Steuerung des Wärmeentzugs wurde der modifizierte Lastgang<sup>(Prognose2010)</sup> verwendet. Abbildung 62 zeigt die monatlichen mittleren Fluidtemperaturen des Modells *PM.04* im Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Modell *PM.01* (kalter Winter). Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass der Eintrag von 20,5 MWh/a an Wärme im Sommer, keine deutliche Erhöhung der mittleren Fluidtemperaturen während der Entzugsphasen im Winter nach sich zieht.

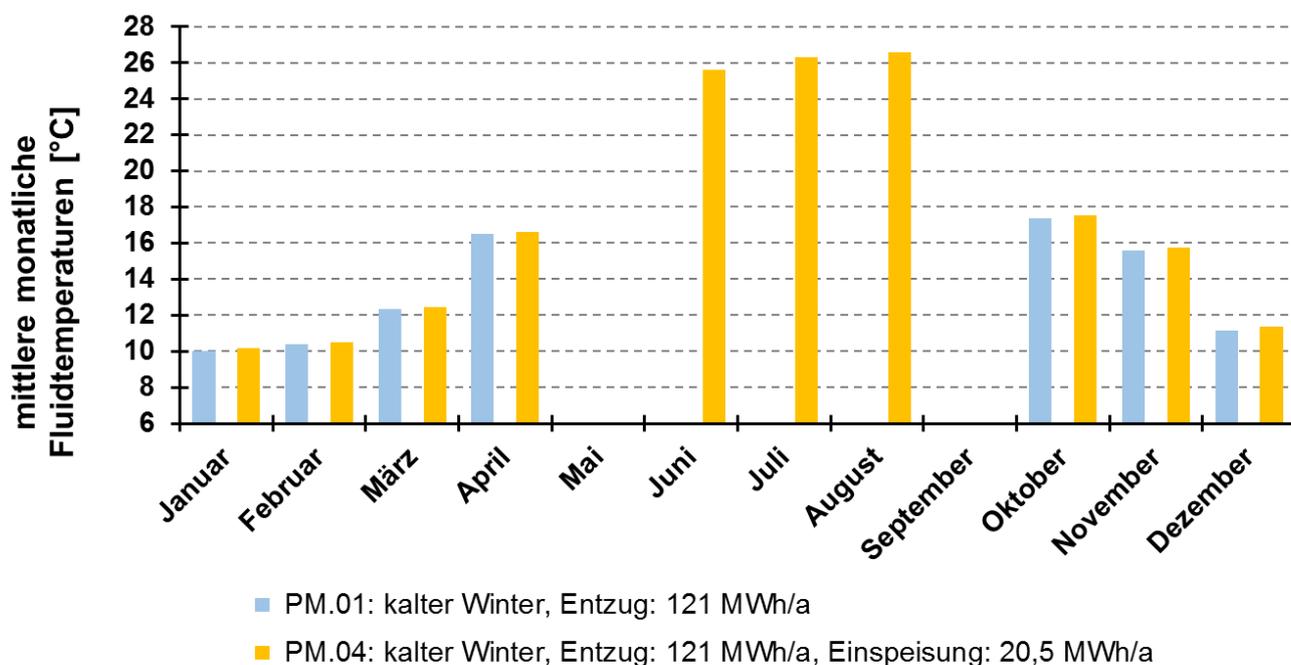


Abbildung 62: Gegenüberstellung der monatlichen Mittelwerte der Fluidtemperaturen des Modells ohne (PM.01) und mit Einspeisung (PM.04). Zur Berechnung der monatlichen mittleren Fluidtemperaturen wurde der gesamte Betrachtungszeitraum von 15 Jahren herangezogen.

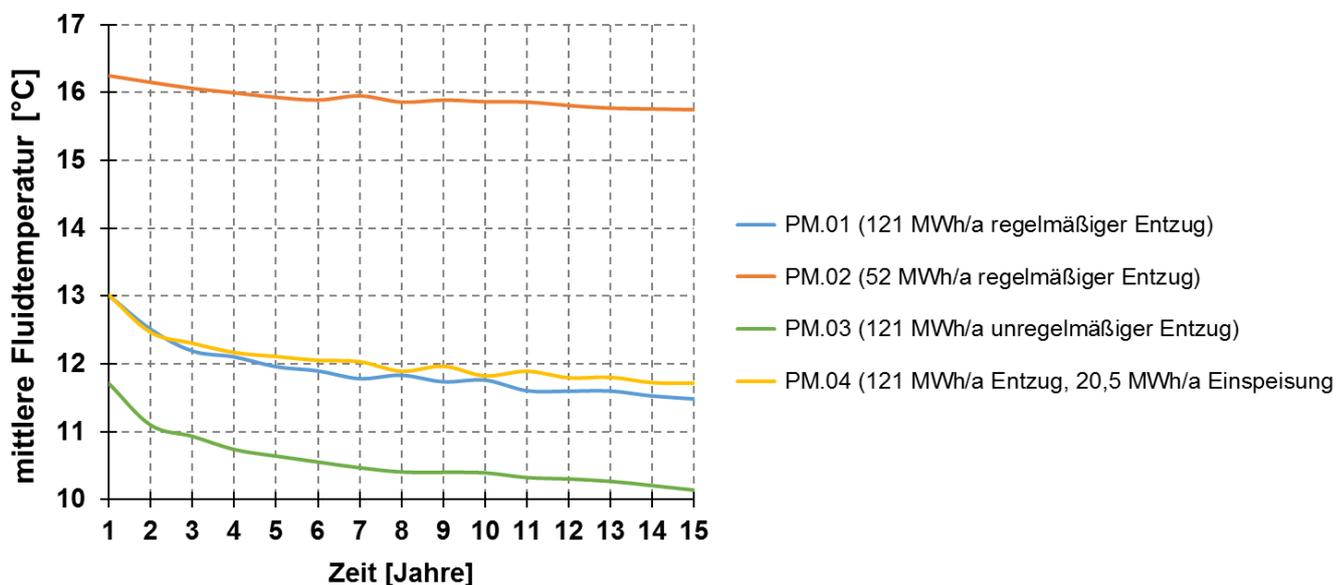


Abbildung 63: Übersicht des Abkühlungsverhaltens in Folge verschiedener Betriebsszenarien. Betrachtet werden die mittleren Fluidtemperaturen von November bis März der jeweiligen Heizperiode.

Das durch den Wärmeentzug der mitteltiefen EWS verursachte Abkühlungsverhalten über die Jahre für die verschiedenen Betriebsszenarien ist in Abbildung 63 dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen wurden für die Bildung des jährlichen Mittelwertes nur die Fluidtemperaturen der Monate November bis März berücksichtigt. Alle Modellierungen weisen die stärksten Abkühlungen zu Beginn des Entzugs auf. Aus dem Temperaturverlauf in Folge des milden Winters (*PM.02*) geht die geringste Abkühlung hervor. Ab dem ersten Betriebsjahr können bei *PM.01* (regelmäßiger Lastgang) und *PM.03* (Lastgang mit Dauerentzugsphasen) und *PM.04* ähnliche Abkühlungsraten beobachtet werden. Der Temperaturverlauf aus der Modellierung *PM.03* weist dabei allerdings ein geringeres Temperaturniveau auf.

## 5 Diskussion

### 5.1. Interpretation der Modellergebnisse

#### 5.1.1. Modelle zur Validierung der Untergrundparameter

Für die Modellvalidierung wurden insgesamt 30 verschiedene Simulationen erstellt. Dies beinhaltet sowohl die Modelle zur Validierung am realen Betrieb in Heubach als auch die am GRT kalibrierten Simulationen. Die Validierung der Untergrundparameter sowohl an den gemessenen Betriebsdaten als auch an den Messwerten des GRT war wegen der lokalen Anordnung der Messdatenerfassung in Heubach notwendig. Vom Sondenkopf bis zum, zur Datenaufzeichnung der mitteltiefen EWS zuständigen WMZ 2 (Abbildung 7), erfolgt ein etwa 55 m langer Zulauf über ein PE-Rohr. Für die Modellvalidierung in FEFLOW wurden die Messdaten direkt als Randbedingung eingelesen und daher angenommen, dass die Messwerte am WMZ 2 jenen am Sondenkopf entsprechen. Um dennoch eine korrekte Validierung der Untergrundparameter zu gewährleisten wurde das Grundmodell zusätzlich an den Messwerten des GRT kalibriert. Dies ergab für das Einschichtmodell eine sehr gute Übereinstimmung mit einer Abweichung der gemessenen zur simulierten mittleren Fluidtemperaturen von nur 0,04 % (0,012 K). Anhand der am GRT validierten Untergrundparameter konnte auch bei einer Validierung am realen Betrieb, mit einer Abweichung der mittleren Fluidtemperatur von 0,60 % (0,12 K), gute Übereinstimmungen erzielt werden. Basierend auf diesen Modellergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass durch die 55 m lange Zuleitung nur geringe Wärmeverluste entstehen.

#### 5.1.2. Simulationen zur Langzeitbetrachtung

Anhand der Untersuchungen zur Prognoseunsicherheit konnte verdeutlicht werden, dass die Wärmeleitfähigkeit und der geothermische Gradient unter den untergrundbezogenen Parametern den stärksten Einfluss auf die Modellergebnisse ausüben. Durch die Variation des geothermischen Gradienten konnte die lineare Abhängigkeit der mittleren Fluidtemperatur verdeutlicht werden. Die Temperaturen des Wärmeträgermittels (Abbildung 51) verliefen daher nahezu parallel. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch den geothermischen Gradienten die allgemeine Temperaturverteilung im Modell bestimmt wird. Aus diesem Grund konnten bei den verschiedenen Modellierungen zur Variation des geothermischen Gradienten auch unterschiedliche Ausgangstemperaturen beobachtet werden (Abbildung 51). Bei den Modellergebnissen, die sich aus der Variation der Wärmeleitfähigkeit ergaben, ist hingegen kein derart ausgeprägter paralleler Verlauf der mittleren täglichen Fluidtemperaturen beobachtet worden. Da bei allen Modellen zur Variation der Wärmeleitfähigkeit derselbe geothermische

Gradient festgelegt wurde, sind bei allen Szenarien die Temperaturverteilung im Untergrund und damit auch die Ausgangstemperatur des Fluids im ersten Betriebsjahr gleich. Ausgehend davon ergibt sich ein Temperaturverlauf des Wärmeträgermittels (Abbildung 44), der maßgeblich vom Lastgang und damit vom Entzugsverhalten der Erdwärmesonde bestimmt wird. Dabei kann am Beispiel der Variation der Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden, dass der entzugsbedingte Schwankungsbereich bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten verschieden stark ausgeprägt ist. So fluktuiert beispielsweise der Temperaturverlauf des Modells mit  $1,73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  stärker als die der restlichen Szenarien (Abbildung 44 und Abbildung 45). Dies kann auf den Wärmetransport in der näheren Sondenumgebung zurückgeführt werden. Da bei der Modellierung von einem rein konduktivem Wärmetransport ausgegangen wurde, ist hier die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) des umgebenden Gesteins der wesentliche Faktor. Die dabei zugrunde liegende Gesetzmäßigkeit kann anhand der Fourier'schen Gleichung für den Wärmetransport in zylindrischen homogenen Körpern beschrieben werden:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (16)$$

Die Variable  $A$  ist die von Wärme ( $Q$ ) durchströmte Fläche und  $\frac{\partial Q}{\partial t}$  die thermische Leistung.  $\frac{\partial T}{\partial x}$  gibt den Temperaturgradienten im betrachteten System wieder (GRATZ 2006). Bei einer Übertragung des in (16) beschriebenen Zusammenhangs auf den Wärmetransport im zur EWS angrenzenden Gestein, wird jener Temperaturgradient berücksichtigt der sich durch den Wärmeentzug radial zur EWS ausbildet (Abbildung 64.)

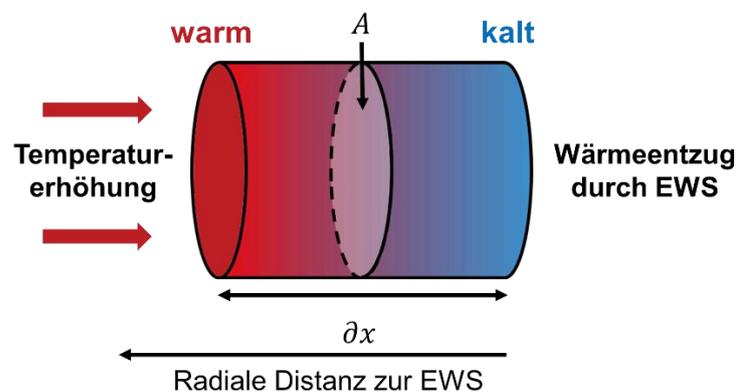


Abbildung 64: Schematische Darstellung des konduktivem Wärmetransports nach Fourier (verändert, nach GRATZ, 2006).

Die Wärmeleitfähigkeit quantifiziert die Wärme, die bei gegebenen Temperaturgradienten durch die Fläche  $A$  fließt (GRATZ 2006). Bei einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit kann in einer Entzugsphase mit gegebener Dauer weniger Wärme vom umgebenden Gestein nachströmen. Dies führt zu einer stärkeren Abkühlung, was die stärkeren Fluktuationen des Temperaturverlaufs bei  $1,73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  erklärt. Bei einer Variation des geothermischen Gradienten weisen die Abweichungen der mittleren

Fluidtemperaturen relativ zum Mittelwert-Modell vergleichsweise geringere Fluktuationen auf, da durch den geothermischen Gradienten die allgemeine Temperaturverteilung im Modell beschrieben wurde (Abbildung 52). Die Wechselwirkungen des geothermischen Gradienten mit dem gegebenen Lastgang können daher als eher gering interpretiert werden. Die Abweichungen der Temperaturverläufe relativ zum Mittelwert-Modell bei variierender Wärmekapazität (Abbildung 47) bewegen sich allgemein in einem eher geringen Schwankungsbereich. In Formel (9) wird der konduktive Wärmetransport beschrieben. Durch den Zusammenhang der zeitlich bedingten Temperaturänderung mit der vol. Wärmekapazität geht hervor, dass der Einfluss der vol. Wärmekapazität mit der Transienz steigt. Umgekehrt vereinfacht sich (9) beim Vorliegen stationärer Wärmeströmung und unter der Annahme dass keine inneren Wärmequellen (kein Wärmeentzug / Einspeisung durch die EWS) vorhanden ist zu:

$$0 = \lambda \nabla^2 T \quad (17)$$

Die Auswertung der Betriebsdaten der mitteltiefen EWS in Heubach hat einen sehr kurzfristigen Lastenwechsel ergeben. Um eine Modellierung von Langzeitbetrachtungen zu ermöglichen mussten diese kurzfristigen Entzugsphasen, anhand der Zyklen-Methode, zu größeren Intervallen zusammengefasst werden. Obwohl durch die Zyklen-Methode bereits eine gute Annäherung an reale Betriebsbedingungen gelungen ist, könnte durch das Zusammenfassen der Entzugszyklen die aus den Unsicherheitsbetrachtungen resultierende Einflussstärke der volumetrischen Wärmekapazität etwas unterschätzt werden. Anhand der Ergebnisse aus den Betrachtungen zur Prognoseunsicherheit konnte außerdem der Einfluss auf die mittlere Fluidtemperatur infolge eines variierenden Heizenergiebedarfs quantifiziert werden. Bei einer bestehenden Anlage wird die tatsächliche jährlich entzogene Wärmemenge von den vorherrschenden klimatischen Verhältnissen der jeweiligen Heizperiode bestimmt. Die Auswertung der Betriebsdaten aus Heubach hat ergeben, dass die zu entziehende Wärmemenge in einem milden Winter um mehr als die Hälfte geringer sein kann als in einem kalten Winter. Da die Sondenlänge für einen Heizenergiebedarf in kalten Wintern ausgelegt ist, werden als Folge daraus in milden Wintern um etwa 28% höhere mittlere Fluidtemperaturen erreicht.

Neben einer gegenseitigen Beeinflussung von Wärmeleitfähigkeit und dem gewählten Lastgang konnten im Zuge der verschiedenen Modellierungen auch Unterschiede in den Modellergebnissen beobachtet werden, die durch eine Veränderung der Betriebsparameter (Durchflussrate, Entzugsleistung, angelegte Temperaturspreizung zwischen Einlass- und Auslasstemperatur) oder des Entzugsverhaltens (Dauerentzugsphasen) hervorgerufen wurden. Am Vergleich der verschiedenen Prognosemodelle (Abbildung 61) wird deutlich, dass ein unregelmäßiges Entzugsverhalten, insbesondere mit Dauerentzugsphasen (länger als 8 Stunden), eine deutliche Auswirkung auf die mittlere Fluidtemperatur hat. Im Vergleich der Modelle PM.01 (regelmäßiger Lastgang) und PM.03 (unregelmäßiger Lastgang) wurden die gleichen jährlichen Wärmemengen entzogen. Die für das Modell PM.03 verwendete Lastkurve ist auf Grundlage der nach der Zyklen-Methode aufbereiteten

Messwerte generiert worden. Um eine entzogene Wärmemenge von 121 MWh/a zu erreichen, wurde die Dauer der Entzugsphasen in jenen Zyklen mit aktiver EWS entsprechend erhöht. Dadurch sind neben Dauerentzugsphasen auch mehrere, zum Teil mehrtägige Stillstandzeiten simuliert worden (Abbildung 64). Diese inaktiven Phasen reichten dennoch nicht aus, durch thermische Regeneration des Untergrunds die mittleren Fluidtemperaturen auf einem ähnlich hohen Temperaturniveau wie bei einem Lastgang ohne Dauerentzugsphasen (*PM.01*) zu halten. Als Grund ist hier insbesondere auch die starke Abkühlung als direkte Folge des Dauerentzugs zu nennen. Die anhand des Modells *PM.03* modellierten Extremfälle sollen daher die Einflussstärke des Entzugsverhaltens auf die Fluidtemperaturen verdeutlichen. Während eines in Modell *PM.03* simulierten, drei Tage andauernden Entzugs sank die mittlere Fluidtemperatur um etwa 10 °K (Abbildung 60). Als Folge eines 24-Stündigen Dauerbetriebs konnte bei *PM.03* außerdem eine Abnahme der mittleren Fluidtemperatur von etwa 4 °K beobachtet werden. Die Modellierungen zur Dimensionierung der mitteltiefen Erdwärmesonde basierten auf dem, von der HSE zur Verfügung gestellten Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub> (HSE 2012). Abbildung 65 zeigt einen zeitlichen Ausschnitt des Lastgangs der dem Modell *PM.03* zugrunde gelegt wurde im Vergleich mit dem nicht aufbereiteten Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub>.

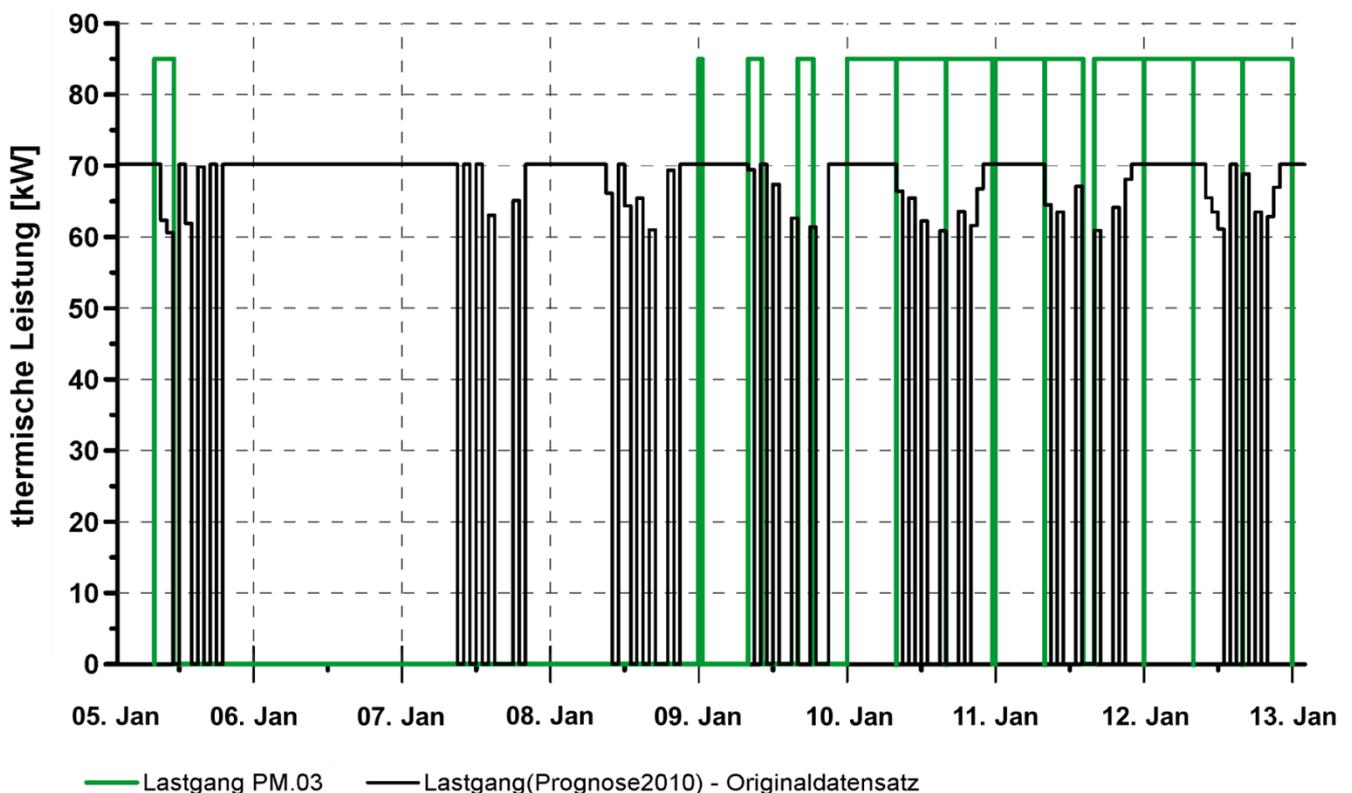


Abbildung 65: Vergleich des Lastgangs für das Prognosemodell *PM.03* mit dem Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub>.

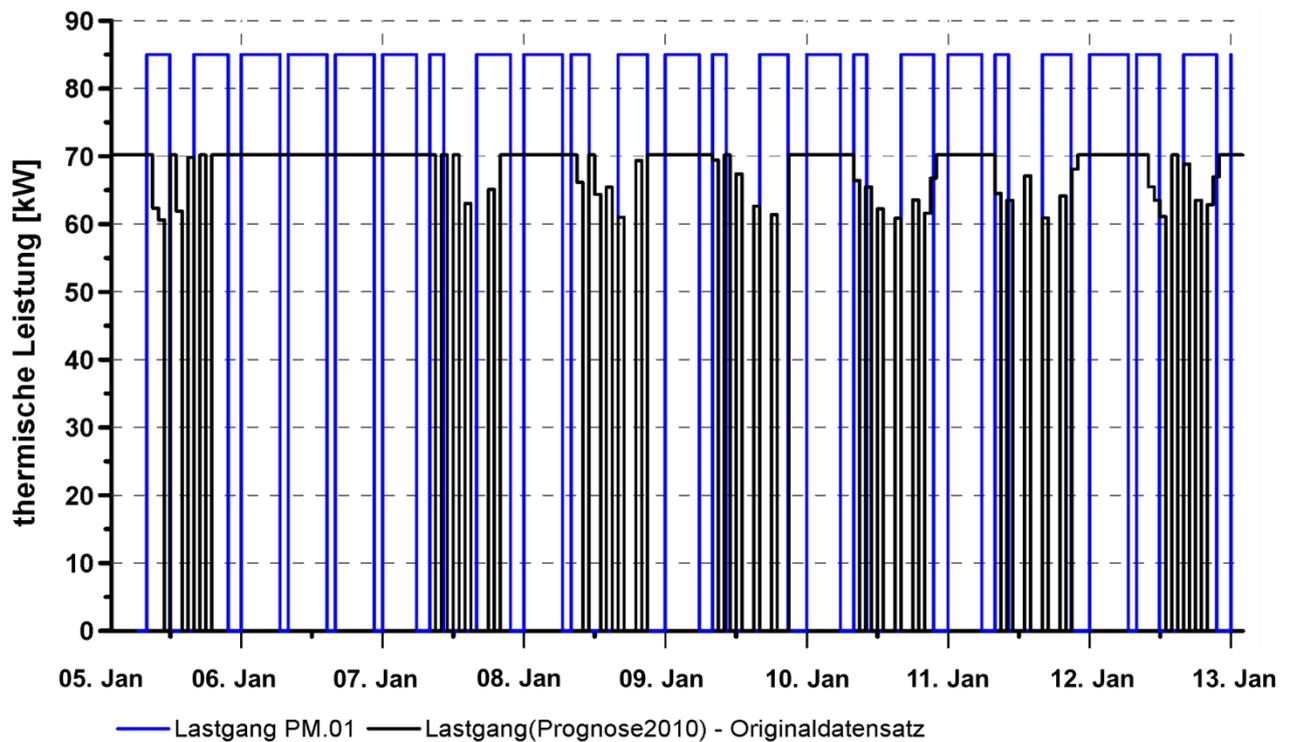


Abbildung 66: Vergleich des Lastgangs für das Prognosemodell PM.01 mit dem Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub>.

In Abbildung 66 ist der Vergleich des nicht modifizierten Lastgangs<sub>(Prognose2010)</sub> mit dem nach der Zyklensmethode aufbereiteten Lastgangs<sub>(Prognose2010)</sub> für einen gleichmäßigen Wärmeentzug von 121 MWh/a (PM.01) dargestellt. Dieser aufbereitete Lastgang wurde dem Modell PM.01 als Randbedingung eingelesen. Beim Lastgang<sub>(Prognose2010)</sub>, dem ebenfalls ein jährlicher Entzug von 121 MWh/a zugrunde liegt, werden Spitzenlasten von 70,2 kW erreicht. Um dennoch die benötigte Entzugsmenge für einen kalten Winter zu erreichen musste die Dauer der einzelnen Entzugsphasen entsprechend erhöht werden. Ähnlich wie beim Lastgang für PM.03 ergeben sich daraus viele, zum Teil mehrtägige Dauerentzugsphasen. Solche Dauerentzugsphasen konnten durch die Aufbereitung mit der Zyklensmethode, bei einem gleichzeitigen Erhöhen der thermischen Leistung auf 85 kW vermieden werden. Für den Lastgang des Modells PM.01 ergaben sich dadurch Entzugsphasen mit einer maximalen Dauer von 6,5 Stunden. Dies ermöglichte eine simulierte Taktung des Wärmeentzugs zu erreichen, die besser mit dem tatsächlichen Betrieb übereinstimmt. Ein über mehrere Tage andauernder Wärmeentzug durch die mitteltiefe EWS in Heubach ist unter normalen Umständen unwahrscheinlich. Für die Modellierungen zur Auslegung einer Erdwärmeanlage können solche Entzugsszenarien mit Dauerentzugsphasen, zum Teil auch wegen den Einschränkungen der Simulationsprogramme, aber durchaus angenommen werden. Dies kann zum Teil erhebliche Unsicherheiten in den Prognosemodellierungen zur Folge haben. Um solche Abweichungen zwischen der prognostizierten und der später tatsächlich umgesetzten Betriebsführung zu vermeiden ist bereits im Rahmen der

---

Modellerstellung zur Dimensionierung die detaillierte Auseinandersetzung mit dem geplanten Betriebsverhalten notwendig.

Die in (7) beschriebenen Wechselwirkungen der thermischen Leistung ( $P_{th}$  [W]), des Durchflusses ( $q$  [m<sup>3</sup>/s]) und der Temperaturdifferenzen des Wärmeträgermediums ( $\Delta T$  [K]) kamen deutlich in den Modellen zur Methodvalidierung zum Ausdruck. Bei der Eingangsdatenaufbereitung nach der Mittelwert-Methode in 8-Stunden-Intervallen wurden die größten Abweichungen der Betriebsparameter zum realen Betrieb generiert. Durch die Glättung des Lastgangs über acht Stunden sind sowohl aktive als auch inaktive Phasen der EWS berücksichtigt worden. Daraus ergab sich eine Lastkurve mit stark schwankenden aber allgemein geringen Entzugsleistungen (< 52 kW). Um dennoch die zu entziehende Wärmemenge über den Betrachtungszeitraum zu ermöglichen, ergaben sich zum Teil wochenlange Dauerentzugsphasen. Geringere thermische Leistung äußert sich bei gleichbleibendem Durchfluss in einer kleiner werdenden Temperaturspreizung zwischen Einlass- und Auslasstemperatur. Trotz des Dauerbetriebs resultierten daraus im Vergleich zu den Messwerten höhere mittlere Fluidtemperaturen. Um eine dem realen Betrieb entsprechende Temperaturspreizung von 4 K zu erreichen, mussten die Durchflussraten ebenfalls entsprechend verringert werden. Dies hatte insgesamt wesentlich geringere mittlere Fluidtemperaturen zur Folge. Bei den Aufbereitungen nach der Mittelwert-Methode sind im Vergleich zur realen Betriebsführung im Allgemeinen größere Abweichungen in den Betriebsparametern (Durchfluss, Lastgang, Temperaturspreizung) erzeugt worden, als bei der Zyklen-Methode. Aus diesem Grund ergaben, sich im Vergleich mit der Zyklen-Methode, bei einem Abgleich der Messwerte mit den Modellergebnissen schlechtere Übereinstimmungen. Dieser Umstand verdeutlicht ebenfalls die Abhängigkeit der nutzbaren Quelltemperaturen von der Entzugsdauer und den Betriebsparametern.

## 5.2. Regenerationsverhalten des Untergrunds während inaktiver Betriebsphasen

An den in Kapitel 2.2.1. beschriebenen Betriebsdaten kann während der Heizperiode (November bis März) eine Erhöhung der mittleren Fluidtemperatur mit abnehmendem Heizenergiebedarf beobachtet werden. Die mitteltiefe EWS wird bei Außentemperaturen von weniger als 5°C betrieben. Bis Mitte November und ab Mitte Februar sinkt die Außentemperatur meist nur nachts auf derart niedrige Temperaturen, sodass tagsüber längere Stillstandzeiten der EWS entstehen. Nach solchen inaktiven Phasen ist eine erhöhte mittlere Fluidtemperatur im Vergleich zum vorangegangenen Entzugszyklus zu beobachten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in dieser vergleichsweise kurzen Zeit bereits bis zu einem gewissen Grad eine thermische Regeneration des Untergrunds stattgefunden hat. Ein ähnliches Verhalten ergab sich aus den Modellierungen. Aus den numerischen Simulationen ist außerdem ersichtlich, dass sich der Bereich rund um die EWS während der Betriebsphasen abgekühlt.

Es entsteht ein *thermischer Trichter*, der mit einem Absenktrichter in der Hydraulik vergleichbar ist (STOBER & BUCHER 2012).

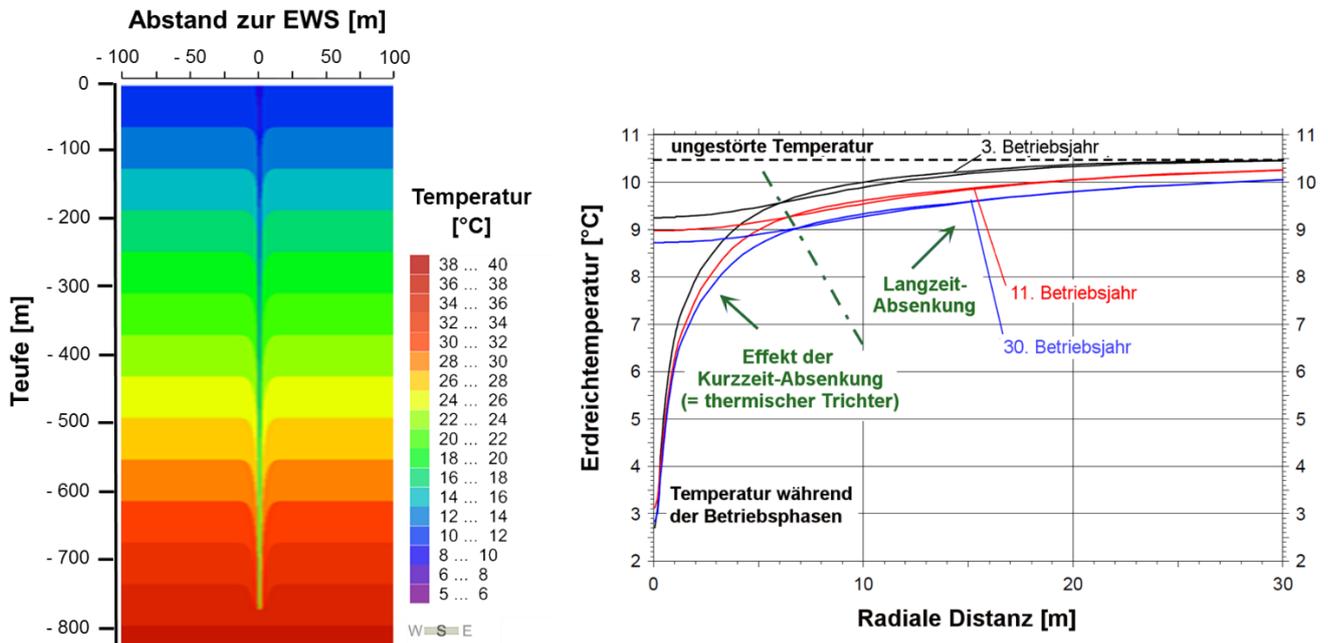


Abbildung 67: links: Temperaturverteilung während des simulierten Wärmeentzugs am kalibrierten Grundmodell für die mitteltiefe EWS in Heubach. Rechts: Beispiel einer dynamischen Temperaturabsenkung durch den Betrieb einer untiefen EWS (verändert nach RYBACH & EUGSTER 2002)

Abbildung 67 zeigt am Beispiel der mitteltiefen EWS in Heubach den Temperaturverlauf nach einer simulierten vier-tägigen Dauerentzugsphase (links) sowie die charakteristische Ausbildung eines thermischen Trichters für verschiedene Betriebsjahre am Beispiel einer untiefen EWS (rechts). Bei beiden Betrachtungen werden rein konduktive Transportmechanismen berücksichtigt. Die EWS kann während der Entzugsphasen als zylindrischer Kühlkörper gesehen werden. Die Abstände der resultierenden Isothermen verringern sich dabei mit abnehmender Distanz zur Sonde (siehe Abbildung 68). Dadurch entstehen insbesondere in unmittelbarer Nähe zur EWS starke Temperaturgradienten. Um das Defizit durch den Wärmeentzug wieder auszugleichen, bildet sich ein Wärmefluss mit Wärmestromdichten von bis zu einigen  $\text{W}/\text{m}^2$  radial zur EWS aus (RYBACH & EUGSTER 2002). Die mittlere Wärmestromdichte aus dem Erdinneren beträgt hingegen im Vergleich nur etwa  $65 \text{ mW}/\text{m}^2$  (KALTSCHMITT ET AL. 2006).

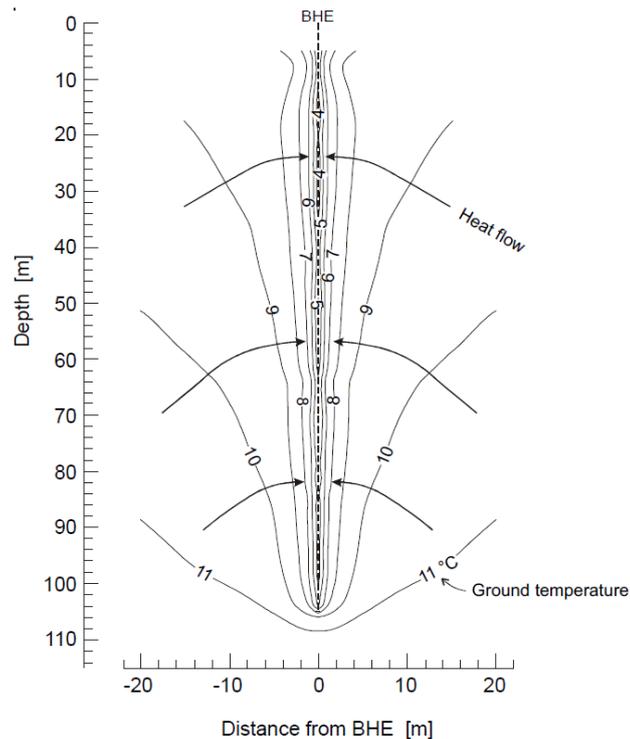


Abbildung 68: Berechnete Isolinien einer 105 m tiefen EWS. Der Wärmestrom in unmittelbarer Nähe der EWS liegt bei etwa  $3 \text{ W/m}^2$ . (nach Messungen und Berechnungen für die Anlage Elgg/Schweiz, RYBACH & EUGSTER 2002)

Um die Temperaturen im Erdreich sowohl bei aktiver als auch bei inaktiver EWS besser erfassen zu können, wurden am kalibrierten Grundmodell für Heubach verschiedene lange Entzugsphasen (von 8 Stunden bis 6 Tage) und die nach Abschalten der EWS vorherrschende Regeneration simuliert. Die Temperaturen sind dabei für Tiefen ab der Geländeoberkante (GOK) bis hin zu 800 m unter GOK in circa 100 m Abständen ermittelt worden. Aus dem in Abbildung 69 dargestellten Temperaturverlauf einer zweitägigen Entzugsphase lässt sich insbesondere ab Tiefen von 300 m unter GOK ein zunächst starker, mit der Zeit jedoch schwächer werdender Abfall der Temperaturen beobachten. Bis in Tiefen von etwa 190 m unter GOK geht der Temperaturabnahme ein kurzer Anstieg voraus. Dieser kann auf die einsetzende Zirkulation, die das in der Tiefe erwärmte Fluid zur GOK befördert, zurückgeführt werden. Nach dem Ausschalten der Wärme- und Umwälzpumpe ergab sich ein zunächst starker, mit der Zeit aber schwächer werdender Temperaturanstieg. Durch diesen anfänglich starken Anstieg wurden 2 Tage nach dem zweitägigen Entzug, je nach Tiefenlage, bereits wieder 90,2 % bis 98,4 % der jeweiligen Ausgangstemperaturen erreicht. Solch ein Temperaturverlauf während den inaktiven Phasen der EWS ist charakteristisch und konnte ebenfalls sowohl nach kürzeren als auch nach längeren Entzugsphasen beobachtet werden.

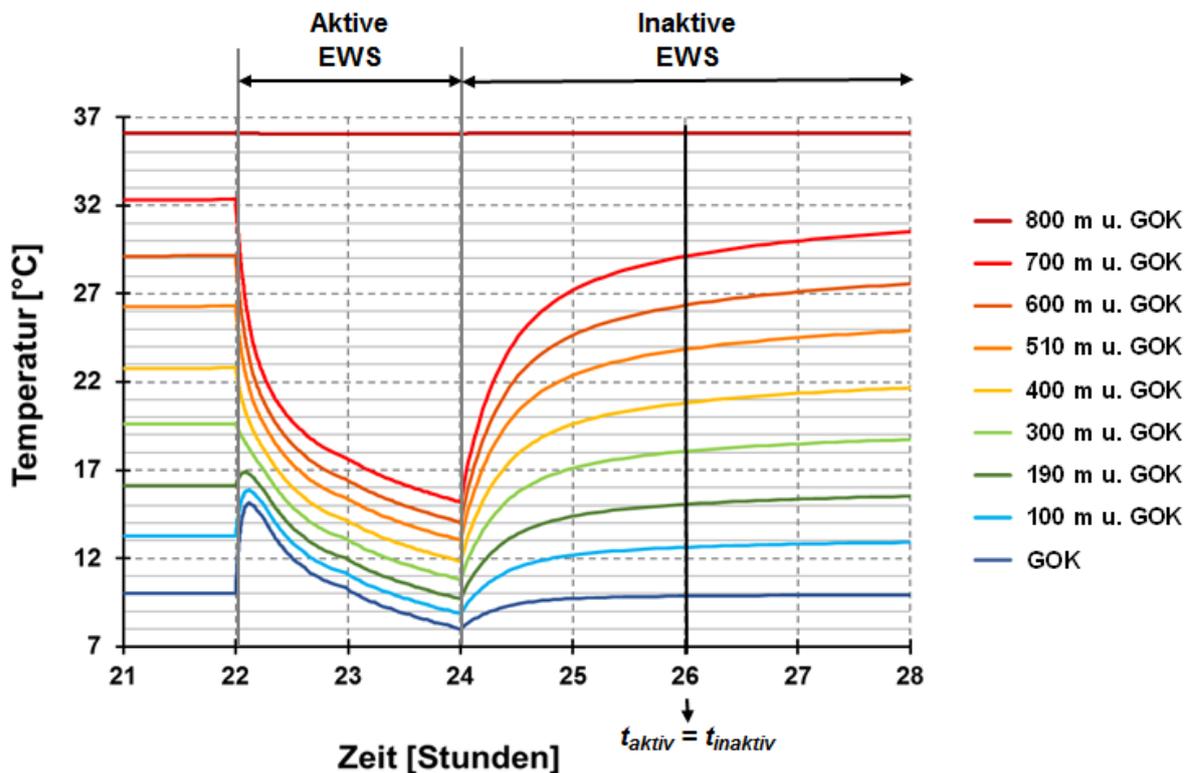


Abbildung 69: Simuliertes Temperaturverhalten bei Entzug und Regeneration des zur EWS angrenzenden Gesteins in verschiedenen Tiefen.

Die Temperaturen zum Zeitpunkt, an dem die EWS ebenso lang still stand, wie der voran gegangene Betrieb andauerte ( $t_{\text{aktiv}} = t_{\text{inaktiv}}$ ) erreichten bei allen simulierten Entzugsphasen (8 Stunden bis 6°Tage) im Mittel wieder 93,5 % ihrer Ausgangswerte. Insbesondere bei kürzeren Entzugsphasen und größeren Tiefen sind zum Zeitpunkt  $t_{\text{aktiv}} = t_{\text{inaktiv}}$  vergleichsweise niedrigere Temperaturen ermittelt worden. So hat sich beispielsweise in 700 m unter GOK nach 8 Stunden Stillstand, bei einem vorangegangenen achtstündigen Entzug, eine Temperatur ergeben, die bei 85,2 % des Ausgangswertes lag. Würde nun zu diesem Zeitpunkt die nächste Entzugsphase einsetzen, hätte dies eine Senkung des Temperaturniveaus allgemein zur Folge. Da im realen Betriebsfall in den kalten Wintermonaten kaum Stillstandphasen zustande kommen, die eine längere Dauer als die Entzugsphasen aufweisen, wird das Temperaturniveau allgemein gesenkt. Zwar können innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit wieder relativ hohe Untergrundtemperaturen erreicht werden, durch den asymptotischen Verlauf der thermischen Regeneration stellt sich der Ausgangszustand theoretisch aber erst nach unendlicher Zeit wieder ein (RYBACH ET AL. 2000). Wird der Langzeitbetrieb bei reinem Wärmeentzug betrachtet, ist daher ebenfalls ein Sinken der Jahresmitteltemperaturen zu verzeichnen (Abbildung 70). Während der ersten Jahre ist die Temperaturabnahme am stärksten und wird dann sukzessive schwächer. Das Langzeitverhalten der Untergrundtemperatur ist somit mit jenem eines einzelnen Entzugszyklus vergleichbar.

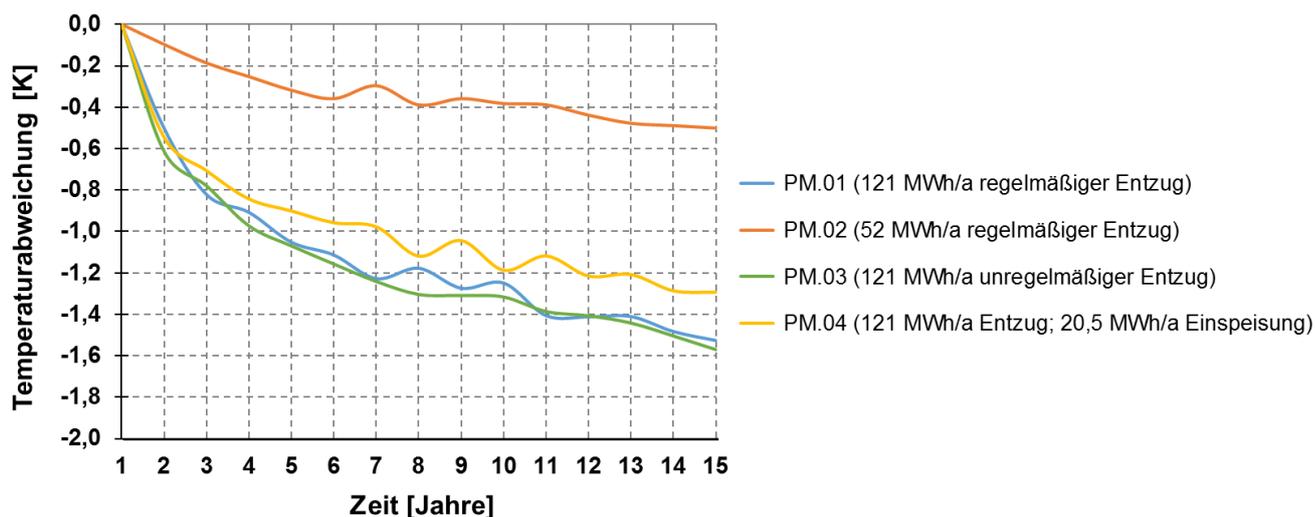


Abbildung 70: Änderung der mittleren jährlichen Fluidtemperatur der verschiedenen Prognosemodelle für die mitteltiefe EWS in Heubach

Die in Abbildung 70 dargestellten Temperaturverläufe jener Prognosemodelle mit reinem Wärmeentzug (Szenario *PM.01*, *PM.02* und *PM.03*) lassen darauf schließen, dass die Temperaturabnahme bei gegebener Sondenlänge primär von der entzogenen Wärmemenge abhängt. Das Entzugsverhalten hingegen übt insbesondere im ersten Betriebsjahr einen Einfluss auf das allgemeine Temperaturniveau aus. Dies wird vor allem in den Monaten November bis März deutlich und kann am Beispiel der Szenarien *PM.01* und *PM.03* in Abbildung 63 beobachtet werden.

Von RYBACH ET AL. (2000) wurden im Zuge von Nachhaltigkeitsuntersuchungen für geothermische Nutzungssysteme das Langzeitregenerationsverhalten einer untiefen EWS bei reinem Wärmeentzug simuliert (Abbildung 71). Die Temperaturen nach Abschalten der Anlage weisen, ähnlich wie die simulierten Temperaturverläufe der EWS in Heubach, einen asymptotischen Verlauf auf. Betrachtet wurde die Temperaturänderung des Erdreichs mit 1 m horizontalem Abstand zur EWS und 50 m Tiefe. Nach einer Stillstandphase von 30 Jahren, bei einem vorangegangenen 30-jährigen Betrieb, wurde die Ausgangstemperatur von 12,7 °C bis auf eine Abweichung von 0,1 K wiederhergestellt. Daher kann von einer benötigten Zeitspanne der Regeneration (*recovery time*) ausgegangen werden, deren Dauer der Betriebszeit entspricht (RYBACH ET AL. 2000).

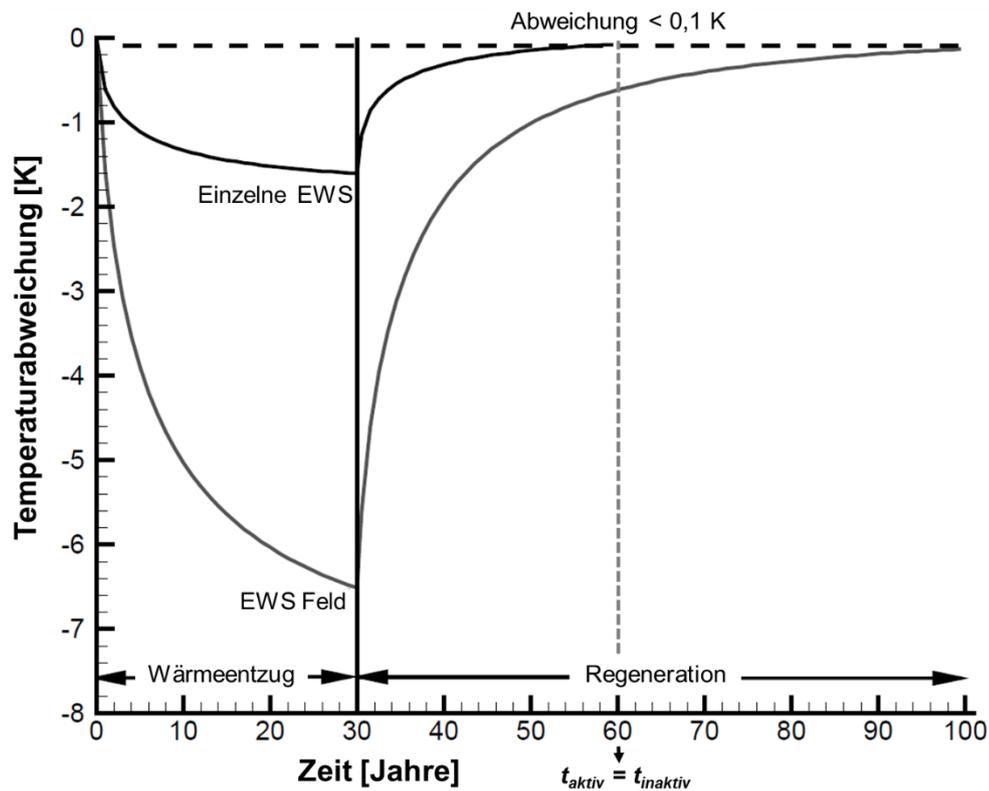


Abbildung 71: Simulierte Temperaturänderung in 50 m Tiefe und einem Meter Entfernung von der EWS für eine einzelne EWS und ein EWS Feld. Der Temperaturverlauf des EWS Feldes bezieht sich auf die zentrale EWS (verändert nach SIGNORELLI ET AL. 2005)

Aufbauend auf die Studie von RYBACH ET AL. (2000) wurde in SIGNORELLI ET AL. (2005) das Regenerationsverhalten eines oberflächennahes EWS Feldes untersucht. Hierfür ist für sechs in zwei Reihen angeordneten, 100 m langen EWS ein Betrieb von 30 Jahren simuliert worden. Sowohl der Temperaturverlauf während des Wärmeentzugs als auch der nach einem Stillstand der Anlage weisen, ähnlich wie bei beim Betrieb der einzelnen EWS, ein asymptotisches Verhalten auf. Durch den Betrieb mehrerer EWS hat der Untergrund eine stärkere Abkühlung erfahren. Die Dauer, bis nach einem Stillstand der Anlage wieder 95 % der Ausgangstemperatur erreicht wurden, hat sich dadurch auf 70 Jahre verlängert (SIGNORELLI ET AL. 2005).

Um einen besseren Vergleich gewährleisten zu können, beziehen sich die in Abbildung 70 dargestellten Temperaturabweichungen der Prognosemodelle für Heubach auf die jeweiligen mittleren Fluidtemperaturen der ersten Heizperiode. Im Zuge des GRT wurde das Sondenfluid zunächst im Zirkulationsbetrieb gefahren, um es auf die durchschnittliche ungestörte Untergrundtemperatur zu bringen. Es wurde dabei eine mittlere Fluidtemperatur von 24,5 °C ermittelt. Unter Berücksichtigung dieser Ausgangstemperatur würden sich durch den Wärmeentzug deutlich größere Temperaturdifferenzen ergeben, als bei den Untersuchungen durch RYBACH ET AL. (2000). Allein aus diesem Grund könnte die Zeitspanne die benötigt wird, damit nach einem endgültigen Abschalten der

---

Anlage wieder 95 % der Ausgangstemperaturen erreicht werden, länger als der vorangegangene Betrieb andauern. Das wesentlichste Kriterium, das bedacht werden sollte, wenn anhand der Ergebnisse von RYBACH ET AL. (2000) eine mögliche Regenerationszeit für Heubach abgeschätzt werden soll, ist die Länge der EWS. Durch die mitteltiefe EWS in Heubach werden Gesteinsschichten mit höherem Temperaturniveau erschlossen. Dieser Umstand kann, neben der Betriebsdauer der Anlage, ebenfalls einen Einfluss auf das Regenerationsverhalten ausüben.

### **5.3. Einschränkungen singulärer Prognose-Modelle**

Die Güte und Zuverlässigkeit von einer einzelnen Prognosemodellierung ist abhängig vom Grad der Kenntnis des geologischen Untergrunds und seiner Eigenschaften. Sofern die genauen Untergrundverhältnisse nicht durch eine Bohrung erschlossen wurden, basiert die Prognosemodellierung auf Annahmen der Gesteinskennwerte und der Temperaturverteilung. Eine einzelne Prognosemodellierung spiegelt dabei nur einen für die angenommenen Verhältnisse gültigen Fall wieder. Wie stark diese Prognose mit einer Unsicherheit behaftet ist, kann daraus nicht abgeleitet werden. Je nach Art und Anforderung der geplanten Geothermieanlage variiert auch die Bedeutung der geothermischen, hydrogeologischen und reservoirgeologischen Eigenschaften (siehe Tabelle 8). Insbesondere bei großen und kostenintensiven geothermischen Nutzungssystemen kann es sinnvoll sein, begleitend zu einem Prognosemodell, dem die am ehesten zu vermutenden Parameter zugrunde liegen, ein Ensemble an Prognosesimulationen mit variierenden Ausgangsbedingungen zu erstellen. Analog zu der in Kapitel 4.2.3. dargestellten Betrachtung zur Prognoseunsicherheit kann dadurch ein zu erwartender Temperaturbereich definiert werden. Dadurch kann außerdem der für das spezifische Projekt geltende Einfluss der verschiedenen Parameter in einer vergleichsweise frühen Planungsphase abgeschätzt werden. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführte Unsicherheitsbetrachtung hat für die mitteltiefe EWS in Heubach einen vernachlässigbaren Einfluss der Wärmekapazität ergeben. Bei einem geplanten mitteltiefen Erdwärmesondenspeicher könnte die Wärmekapazität aber einen höheren Stellenwert einnehmen. Durch eine Prognosemodellierung anhand mehrerer Szenarien werden die Unsicherheiten bei gegebenem Wissenstand in Form der Spannweite der Modellergebnisse wiedergegeben. Durch zusätzliche Vorerkundungsmaßnahmen können solche Unsicherheiten eingegrenzt werden. Eine Prognose auf Basis eines Ensembles an Simulationen kann bei der Projektentwicklung also als zusätzliche Entscheidungshilfe für etwaige zusätzliche Vorerkundung dienen.

Tabelle 8: Bewertungsschema für die Bedeutung geothermischer, hydrogeologischer und reservoirgeologischer Eigenschaften bei unterschiedlicher Nutzungsarten der tiefen Geothermie. Mit: ++ = sehr wichtig; + = wichtig; +/- = nicht wichtig; - = unwichtig (nach SASS 2011, aus: BÄR 2012)

Kennwert		Einheit	Hydro-thermal	Petro-thermal	Geschlossene Systeme
Temperatur		°C oder K	++	++	++
Geothermische Eigenschaften	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	+/-	+	++
	Temperaturleitfähigkeit	10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	+/-	+	++
	Gesteinsdichte	t/m <sup>3</sup>	+/-	+	++
	Wärmekapazität	J/(kg·K)	+/-	+	++
Hydraulik	Permeabilität/Durchlässigkeit	m <sup>2</sup> / ms <sup>-1</sup>	++	+	+/-
	Transmissibilität/-missivität	m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	++	+	+/-
	(effektive) Porosität	%	+	+/-	+/-
	Hydraulische Testdaten	diverse	++	++	-
Fluideigenschaften	Dichte, Viskosität, Kompressibilität	diverse	++	+	-
	Eh, pH, K, TDS	diverse	++	++	-
	Gasparameter im Fluid	diverse	++	++	+
	Kationen und Anionen	[C] <sup>n+/n-</sup>	++	++	+
	Nichtionisierte Substanzen	[C]	++	++	-
	Problemstoffe (radioaktiv etc.)	[C]	+	+	-
Reservoir-Eigenschaften	Schichtung	deskriptiv	++	+/-	++
	Tektonik/Spannungsfeld	diverse	++	++	+
	Petrologie/Petrographie	diverse	+	++	+
	Geometrie	3D num. visuell	++	++	++

#### 5.4. Übertragbarkeit des Modells

Ein für einen spezifischen Standort erstelltes Modell kann nicht uneingeschränkt auf andere Standorte übertragen werden. Aus den in Kapitel 4.2.3. vorgestellten Ergebnissen der Unsicherheitsbetrachtungen zur Prognosemodellierung geht hervor, dass die thermische Energie die anhand einer Erdwärmeanlage gefördert werden kann, nicht nur von den untergrundspezifischen Parametern abhängt. Der individuelle Heizenergiebedarf übt ebenfalls einen nicht unerheblichen Einfluss aus. Daher ist es empfehlenswert bei konkreten Projekten die Durchführbarkeit eines geothermischen Nutzungssystems mit spezifischem Heizenergiebedarf bei gegebener Geologie individuell zu prüfen. Die in Heubach durchteuften Schichten sind den lithostratigraphischen Einheiten Quartär-Kristallin-Rotliegend-Kristallin zuzuordnen (FRITSCH ET AL. 2012).

Tabelle 9: Grenzwerte der thermophysikalischen und hydraulischen Kennwerte zur Potenzialbestimmung für tiefergeothermische Nutzung (BÄR 2012).

Potenzial	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	< 1,25	> 1,25	> 2,0	> 3,0	> 5,0
Temperaturleitfähigkeit [ $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s]	< 0,6	> 0,6	> 1,0	> 1,5	> 2,0
Reservoirtemperatur [°C]	< 60	> 60	> 100	> 120	> 150
Geothermischer Gradient [K/km]	< 20	> 20	> 30	> 40	> 50
Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	< $5 \cdot 10^{-15}$	> $5 \cdot 10^{-15}$	> $1 \cdot 10^{-13}$	> $5 \cdot 10^{-13}$	> $4 \cdot 10^{-12}$
Durchlässigkeit [m/s] bei 10 °C, 1 bar	< $5 \cdot 10^{-8}$	> $5 \cdot 10^{-8}$	> $1 \cdot 10^{-6}$	> $5 \cdot 10^{-6}$	> $4 \cdot 10^{-5}$
Transmissibilität [m <sup>3</sup> ]	< $5 \cdot 10^{-13}$	> $5 \cdot 10^{-13}$	> $5 \cdot 10^{-12}$	> $2,5 \cdot 10^{-11}$	> $1 \cdot 10^{-10}$
Transmissivität [m <sup>2</sup> /s] bei 10 °C, 1 bar	< $5 \cdot 10^{-6}$	> $5 \cdot 10^{-6}$	> $5 \cdot 10^{-5}$	> $2,5 \cdot 10^{-4}$	> $1 \cdot 10^{-3}$

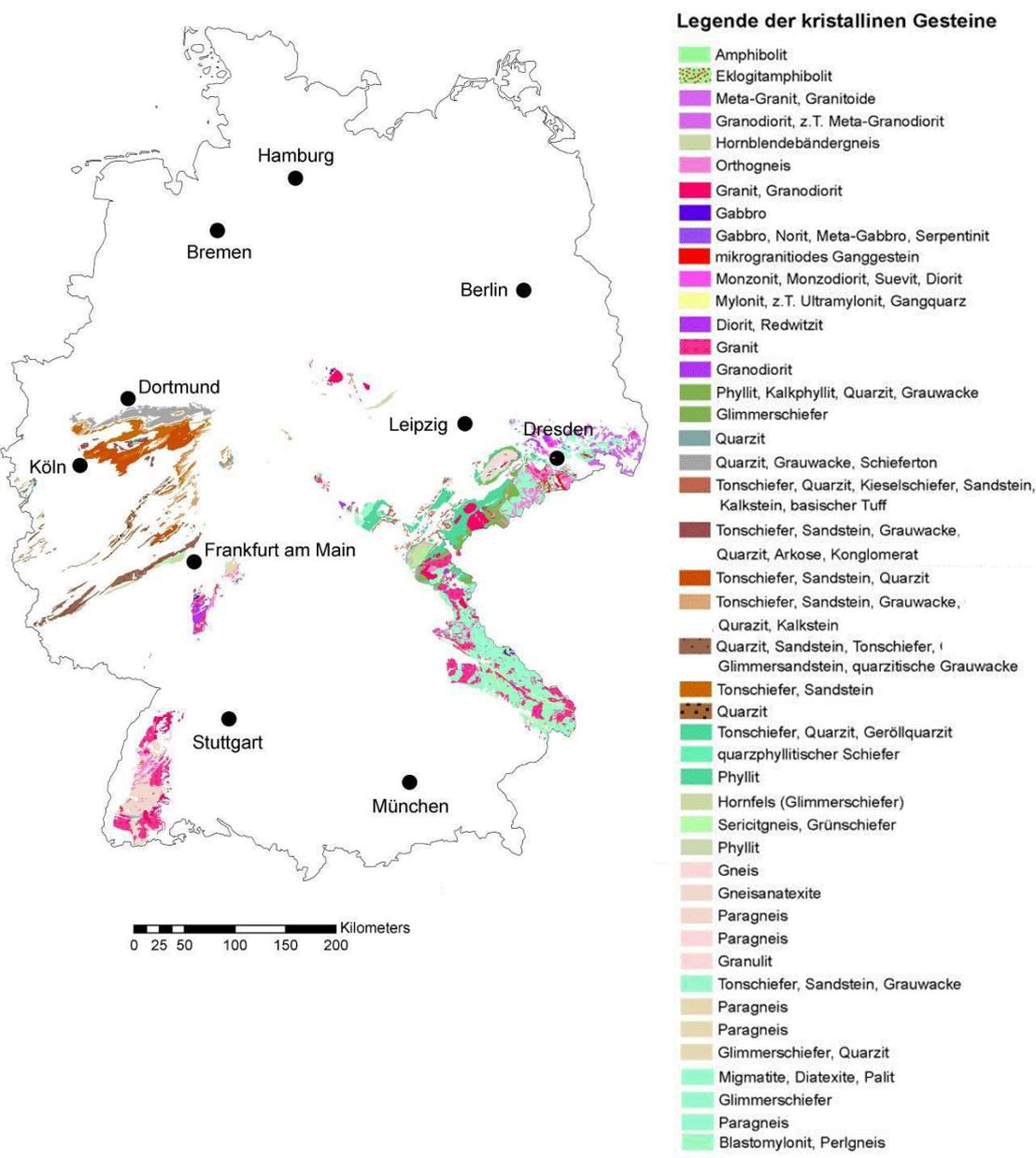


Abbildung 72: Potentiell für Wärmespeicherung geeignete Kristallingesteine (HORNICH 2014)

Aus den von WELSCH (2012) bestimmten Wärmeleitfähigkeiten ergibt sich bezogen auf die mitteltiefe EWS eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von  $2,97 \text{ W(m/K)}$  (für eine gesteinspezifische Zuordnung der Wärmeleitfähigkeiten siehe Tabelle 2). Die Temperaturleitfähigkeiten der in Heubach angetroffenen unverwitterten Biotit-Hornblende-Gneise und der Bändergneise liegen bei  $1,4 \pm 0,1 [10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}]$ . Der Biotitgneis aus Heubach weist eine Temperaturleitfähigkeit von  $1,3 \pm 0,1 [10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}]$  auf (WELSCH 2012). Der in Kapitel 4.2.1 in Rahmen der Parametervalidierung verifizierte geothermische Gradient liegt für den Standort Heubach bei  $3,26 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$ . Auf Grund dieser Kennwerte kann nach BÄR (2012) dem überwiegenden Teil der erschlossenen Gesteine ein mittleres bis hohes Potenzial zur tiefengeothermischen Nutzung zugesprochen werden (siehe Tabelle 9). Die vergleichsweise geringe Gebirgsdurchlässigkeit von  $3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  (WELSCH 2012) würde außerdem einer Nutzung des Untergrunds als geothermischen Speicher zugutekommen. Abbildung 72 zeigt eine Übersicht der Vorkommen von potenziell zur Wärmespeicherung geeigneten Kristallingesteine in Deutschland. Aufgrund der ähnlichen Verhältnisse dieser Lokalitäten zum Standort Heubach ist für die in der vorliegenden Arbeiten ermittelten Ergebnisse zur Unsicherheitsbetrachtung, bei einem vergleichbaren geothermischen Nutzungssystem, zumindest unter Vorbehalt, eine Übertragbarkeit gegeben. Dieser Umstand ist aber insbesondere auch darin begründet, dass bei einer Prognosemodellierung anhand mehrerer Szenarien nicht nur ein Wert für den entsprechenden Parameter angenommen wird. Es fließt vielmehr eine Spannbreite von Werten ein. Dadurch ist die Möglichkeit höher, dass die betrachteten Parameter, und somit auch die resultierenden Ergebnisse, ebenso für ähnliche Gesteine und Untergrundverhältnisse gelten.

## 5.5. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Projekte zur geothermischen Energiebereitstellung unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Kostenverteilung erheblich von konventioneller Wärme- und Strombereitstellung. Während bei Erdwärmeeanlagen die Betriebskosten vergleichsweise gering ausfallen, stellen sie bei der Kohle- oder Erdgasverfeuerung, durch die gegebenen Brennstoffkosten, einen entscheidenden Faktor dar. Projekte zur Nutzung von Geothermie werden hingegen von hohen Investitionskosten charakterisiert. Übergeordnet lassen sich diese in Kosten für eine Vorerkundung (Exploration), in Bohr- und Komplettierungskosten und in Kosten für die übertägigen Anlagen teilen (BMU 2007). Vor allem bei mitteltiefer bis tiefer Geothermie bilden die Kosten zur Erschließung der Wärmequelle (Bohrung, Stimulation) mit einem Anteil von 50 % bis 80 % den größten Kostenfaktor (STOCKHAUSEN 2014; HORNICH 2014 und GARMS 2014). Im Zuge des Geothermie-Projekts in Heubach entfielen etwa 60 % der Gesamtkosten auf die Bohr- und Komplettierungsarbeiten. Die genaue Aufteilung der Investitionskosten ist projektabhängig und wird neben anderen Faktoren hauptsächlich durch die

lokalen geologischen Gegebenheiten geprägt. Die in Abbildung 73 dargestellte Kostenzusammenstellung liefert einen groben Überblick.

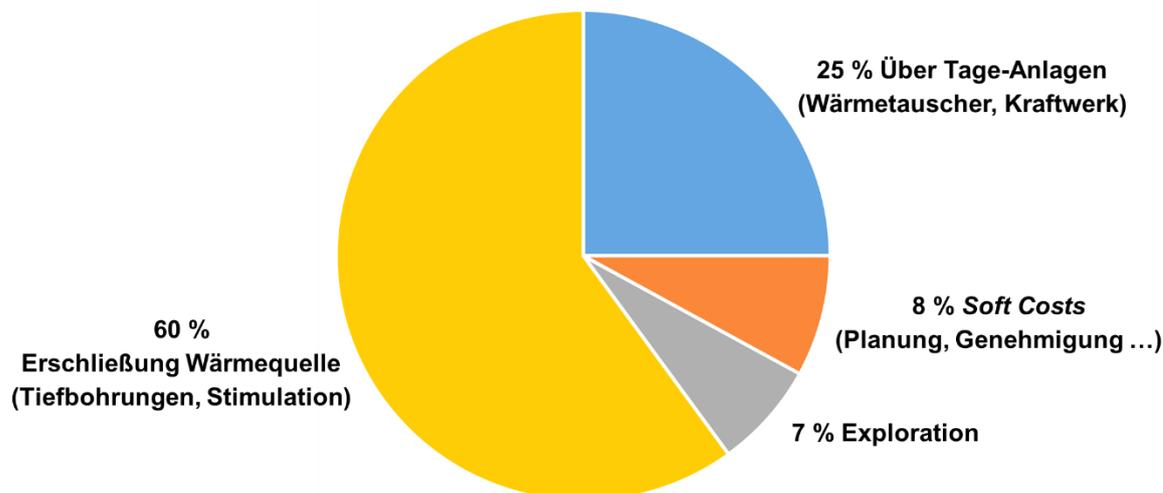


Abbildung 73: Zusammenstellung der Investitionskosten zur geothermischen Strom- und Wärmenutzung (Quelle: GARMS, 2014)

Aus einer von der Foralith AG durchgeführten Studie (FORALITH AG 1998) geht hervor, dass zum Zeitpunkt der damaligen Erhebung über 70 % der im EWS-Bereich tätigen Firmen Kleinunternehmen mit 1 bis 3 Bohranlagen waren. Das Bohrverfahren, das dabei am öftesten zur Verwendung kam, war das pneumatische Imlochhammer-Verfahren. Das aus der Gas- und Erdölexploration bekannte Rotary Verfahren kam nur untergeordnet zum Einsatz. Der pneumatische Imlochhammer ist ein vielseitiges Werkzeug, das meist unabhängig von der Gesteinsfestigkeit eingesetzt werden kann. Die Effektivität steigt dabei mit zunehmendem Betriebsdruck (BUJA 2009). Mit mobilen HD-Kompressoren können in etwa 25 bar erzeugt werden. Damit ist das pneumatische Imlochhammer-Verfahren, je nach hydrogeologischen Verhältnissen auf Bohrtiefen von 200 m bis 400 m beschränkt (FORALITH AG 1998). Um die Potenziale der tiefen Geothermie zugänglich zu machen, findet laut einer Studie des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 2007) das Rotary Bohrverfahren derzeit die weiteste Verbreitung. Beim Rotary Verfahren wird der Bohrfortschritt durch einen drehenden und unter Andruckbelastung stehenden Meißel erreicht. Zur Stützung des Bohrlochs und um das erzeugte Bohrklein abzutransportieren, kommt eine Spülflüssigkeit (Bohrspülung) zum Einsatz. Die benötigten Anpressdrücke werden anhand der Schwerstangen erreicht. Bei Tiefbohrungen ab 1000 m ergibt sich ein Gesamtgewicht des Bohrstrangs von > 50 Tonnen. Dies erfordert einen kostenintensiveren Einsatz von Bohrtürmen mit Hakenlasten von mindestens 100 Tonnen (HORNICH 2014). In den letzten Jahren ist zusätzlich der hydraulisch betriebene Imlochhammer des Typs Wassara™ als alternative Bohrtechnik in Erscheinung getreten. Im Gegensatz zum pneumatischen Imlochhammer wird anstatt Luft Wasser als Arbeitsmittel eingesetzt. Da Wasser nicht

komprimierbar ist, können größere Arbeitsdrücke (180 bar) und somit auch größere Bohrtiefen erreicht werden. Ein Nachteil des Verfahrens ist der hohe Bedarf an klarem Wasser (TUOMAS 2004). Derzeit befinden sich Aufbereitungsmechanismen zur Wiederverwendung des Wassers, die eine effizientere Abtrennung der Feststoffe vom Arbeitsmedium erreichen sollen, in Entwicklung. Das ausschließlich für die Anwendung in Festgestein ausgelegte Bohrverfahren erreicht einen schnellen Bohrfortschritt von bis zu 0,7 m/min. Im Vergleich zum pneumatischen Imlochhammer wird für den Betrieb des hydraulischen ein um 76 % geringerer Primärenergieeinsatz (Diesel) benötigt. Dies äußert sich in geringeren Bohrkosten (HORNICH 2014). Je Bohrmeter können abhängig von den Untergrundgegebenheiten 250 € bis 350 € erreicht werden (HOMUTH, 2014). Bohrkosten im Allgemeinen sind aber je nach Bohrtechnik noch entscheidend von der Geologie und der zu erreichenden Endteufe der einzelnen Bohrungen abhängig. Mit der Tiefe steigen die erforderliche Anlagengröße und damit auch die spezifischen Kosten pro Bohrmeter.

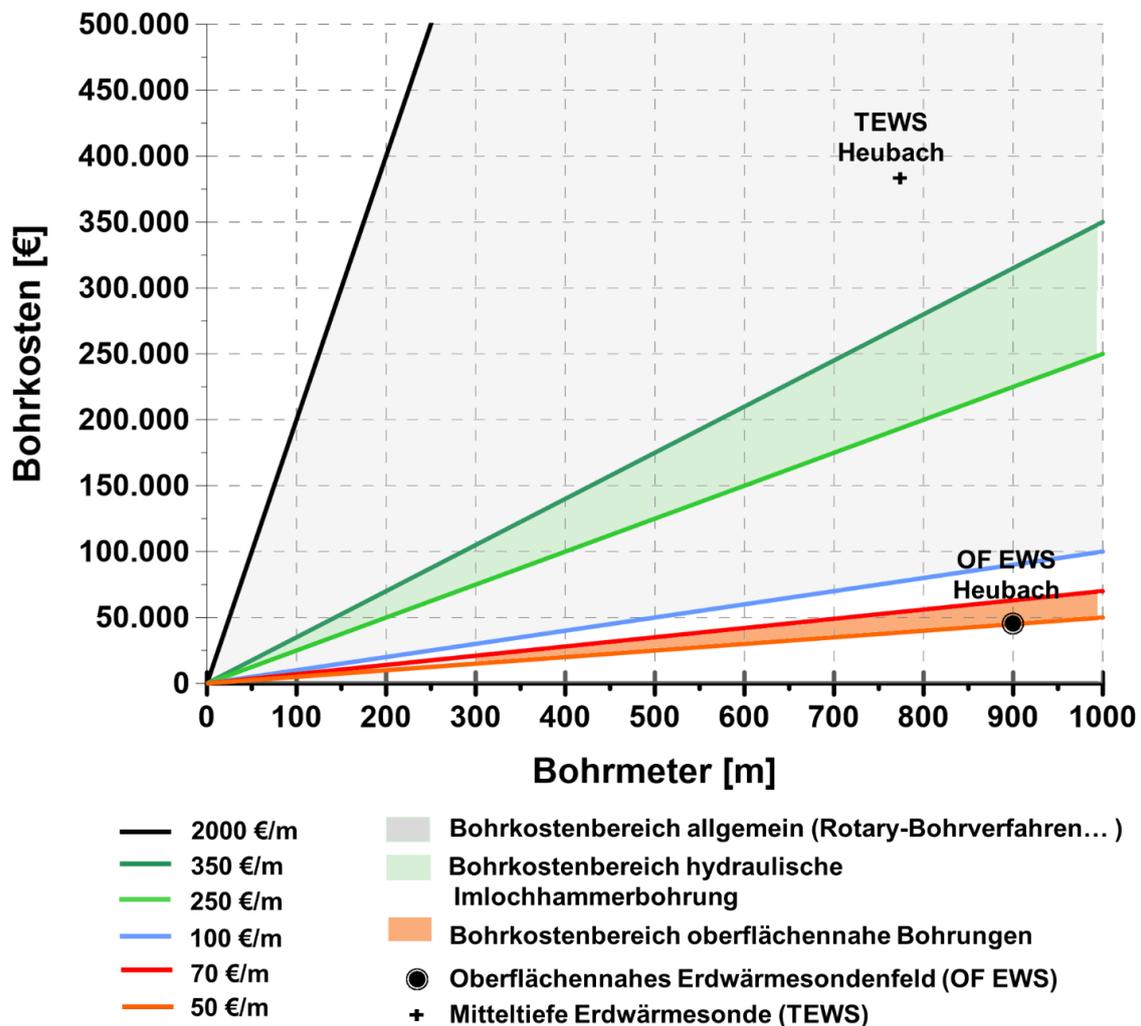


Abbildung 74: Kosten je Bohrtiefenmeter (Quellen: KRUCK ET AL. 2009; VIKERSONN 2014, BMU 2007; WOLFGGRAMM ET AL. 2005; pers. Kommentar HOMUTH, 2014; JEROMIN & BIRKNER 2014 ).

Abbildung 74 zeigt einen Überblick der Kostenbereiche, die sich aus verschiedenen Literatur- und Erfahrungswerten ergeben. Die durchschnittlichen Bohrkosten für oberflächennahe Erdwärmesonden liegen bei 50 bis 70 €/m (KRUCK ET AL. 2009; VIKERSONN 2014). Die Investitionen für das oberflächennahe EWS-Feld in Heubach liegen ebenfalls in diesem Kostenbereich (siehe rote Fläche in Abbildung 74). Die Angaben zu den Bohrkosten für mitteltiefe bis tiefe Bohrvorhaben sind stark projektabhängig und gehen in der Literatur weit auseinander. In einer Studie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit werden für Tiefbohrungen im Rotary Verfahren Kosten in Größenordnungen von 1000 € bis 2000 € je Bohrlochtiefenmeter angegeben (BMU 2007). JEROMIN & BIRKNER (2014) setzen die Bohrkosten für mitteltiefe bis tiefe Geothermieprojekte bei 100 €/m bis 500 €/m an. Abbildung 74 zeigt anhand der grauen Fläche die Bandbreite der Kosten. Für die mitteltiefe EWS in Heubach ergaben sich knapp 500 € pro Bohrmeter. Bei einem Kostenvergleich zwischen Bohrungen für die Nutzung von oberflächennaher und tiefer Erdwärme muss jedoch bedacht werden, dass bei größeren Tiefen auch höhere Quelltemperaturen und somit bessere Wirkungsgrade bei Wärmepumpen erreicht werden können. Wird entsprechend tief gebohrt, um Temperaturniveaus zu erschließen, die bei gegebenen Heizelementen eine direkte Nutzung (ohne eine Wärmepumpe) der Geothermie erlauben, wird die Effizienz zusätzlich gesteigert und die Betriebskosten gesenkt.

Eine von der *Austrian Energy Agency* durchgeführte Studie zum Kostenvergleich verschiedener Heizsysteme ergab für ein Wärmepumpensystem in Kombination mit einer Erdwärmebohrung Wärmegestehungskosten von etwa 0,30 €/kWh. Eine mögliche Förderung wurde dabei nicht berücksichtigt (SIMADER, 2013). Damit sind sie mit den Kosten durch eine Ölzentralheizung vergleichbar (siehe Abbildung 75). Betrachtet wurde ein saniertes Einfamilienhaus mit einer Nutzfläche von 130 m<sup>2</sup> und einem Heizwärmebedarf von 70 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Für den Zinssatz wurden 5 % und für die Abschreibungsdauer 20 Jahre angenommen. Zwar sind solche Vergleiche insbesondere wegen der großen Unterschiede in der Kostenzusammenstellung der einzelnen Heizsysteme schwierig, sie können aber einen Überblick der Größenordnungen schaffen. Würde eine Nutzungsdauer von 30 Jahren angenommen werden, würde sich das Verhältnis der Wärmegestehungskosten zugunsten von Erdwärmeanlagen verschieben. Ein weiterer Einflussfaktor wäre dabei außerdem die von der Quelltemperatur abhängige Effizienz der Wärmepumpe. Diese kann an der Arbeitszahl gemessen werden. In Heubach hat sich für die gesamte Anlage (mitteltiefe EWS und oberflächennahe EWS) in der Heizperiode Nov. 2013 bis Dez. 2014 eine Arbeitszahl von 5,7 ergeben. Die laufenden Leistungszahlen („COP“ *Coefficient of Performance*) der mitteltiefen EWS allein lagen dabei aber durchgehend bei Werten > 6.

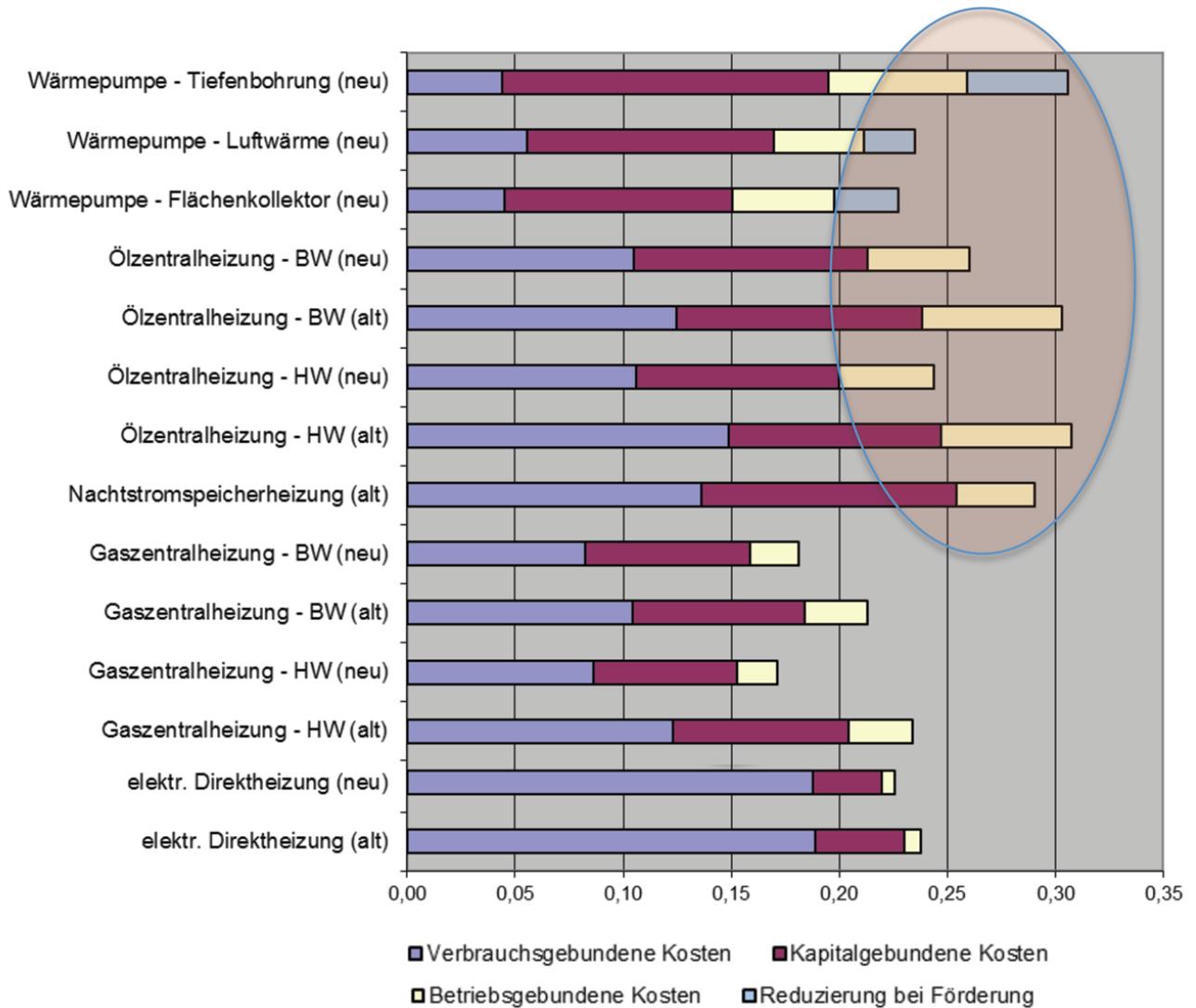


Abbildung 75: Vergleich der Wärmegestehungskosten von Wärmepumpensystemen mit konventionellen Heizsystemen (verändert, nach SIMADER, 2013)

Zur Abschätzung der Wärmegestehungskosten für die Erdwärmeanlage in Heubach wurden ein Zinssatz von  $i = 6\%$  und eine Abschreibungsdauer von  $n = 20$  Jahren angenommen. Daraus ergibt sich mit

$$a_{(i,n)} = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (16)$$

ein Annuitätsfaktor ( $a_{(i,n)}$ ) von 0,087 (KONSTANTIN 2007). Bezogen auf die kumulierten Investitionskosten für die Bohrungen, EWS, Wärmepumpen und Umwälzpumpen kann eine Annuität der Geothermieanlage von 39.980 €/a ermittelt werden. Die Förderung durch das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUELV) wurde dabei nicht berücksichtigt. Unter der Annahme einer Auslastung im Zuge eines kalten Winters würden

Wärmegestehungskosten von 0,24 €/kWh entstehen. Die Berechnung erfolgte unter Annahme der, anhand der Auswertung der Betriebsdaten ermittelten Arbeitszahl von 5,7. In einer Studie von KRUCK ET AL. (2009) wurden beispielhaft die Wärmegestehungskosten für tiefe Erdwärmesonden im Raum Stuttgart ermittelt. Dafür ist für eine Geothermieanlage bestehend aus 10 Erdwärmesonden je 1000 m Tiefe ein Heizenergiebedarf von 2.400 MWh/a angenommen worden. Aus einem Zinssatz von 6 % und einer Nutzungsdauer von 20 Jahren ergaben sich 0,41 €/kWh an Wärmegestehungskosten. Die geringeren Wärmegestehungskosten für Heubach können einerseits auf die hohen Arbeitszahlen und andererseits auf, im Vergleich zu den für die Studie in Stuttgart angesetzten geringeren Bohrkosten zurückzuführen sein. Abbildung 76 zeigt die im Rahmen dieser Studie ermittelte Abhängigkeit der Wärmegestehungskosten von den Bohrkosten. Ein ähnlicher Zusammenhang konnte auch in Heubach beobachtet werden. Wird die Förderung durch das HMJELV mit etwa 40 % an den Investitionskosten berücksichtigt, können die Wärmegestehungskosten auf 0,16 €/kWh gesenkt werden.

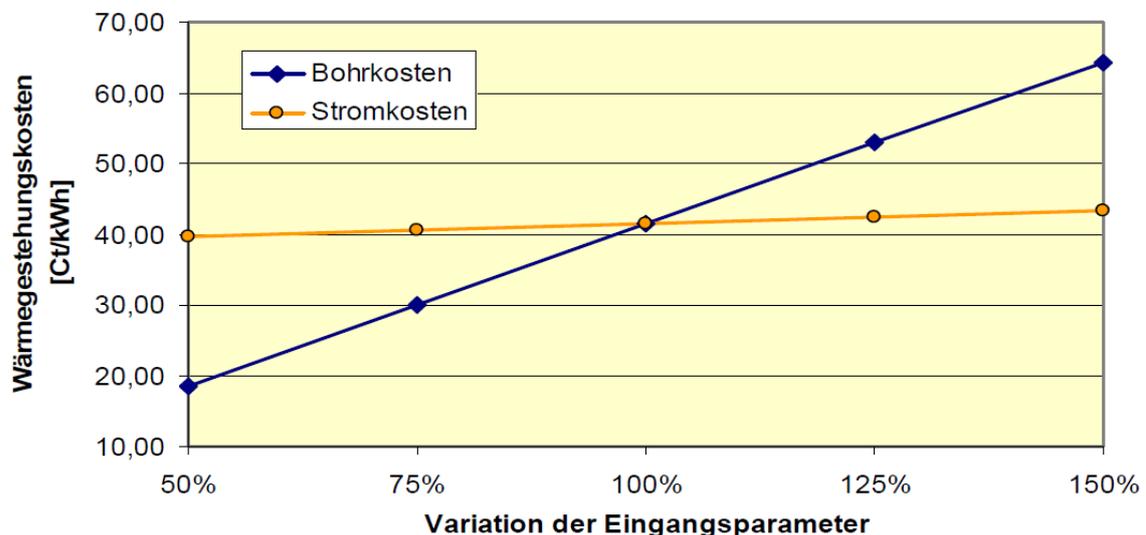


Abbildung 76: Parametervariation zum Einfluss der Wärmegestehungskosten aus tiefen EWS (KRUCK ET AL. 2009)

Wegen der hohen Auflagen im Raum Stuttgart wurde mit Bohrkosten von 1400 €/m gerechnet. Bei einfacheren geologischen Verhältnissen kann von etwa 900 €/m an Bohrkosten für die 1000 m tiefen Erdwärmesonden ausgegangen werden. Daraus würden im Vergleich Wärmegestehungskosten von lediglich 0,25 €/kWh resultieren (KRUCK ET AL. 2009). Eine Parametervariation bezogen auf die Wärmegestehungskosten basierend auf Kenndaten für ein oberflächennahes Erdwärmesondenfeld ist in Abbildung 77 dargestellt.

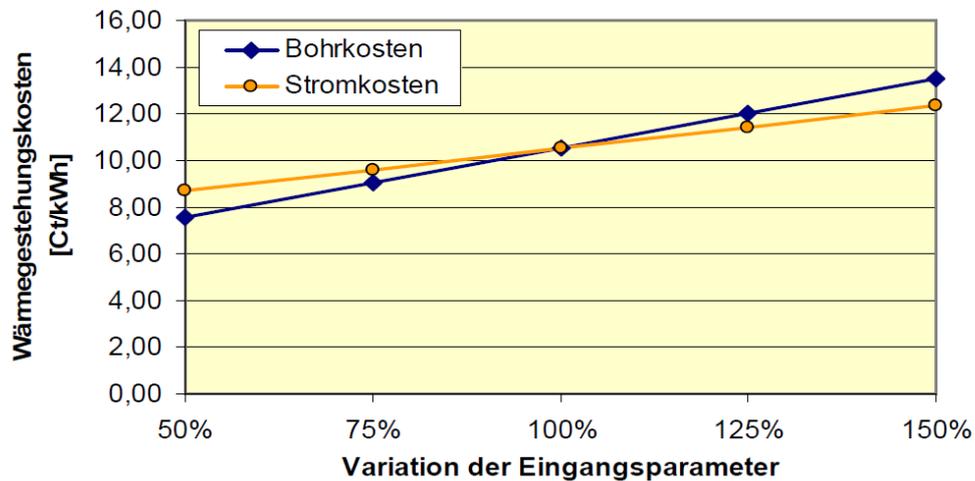


Abbildung 77: Parametervariation Wärmegestehungskosten aus oberflächennahen Erdwärmesonden (KRUCK ET AL. 2009).

Um die Investitionskosten auf ein Niveau zu bringen, welches einen wirtschaftlichen Betrieb von Erdwärmeanlagen gewährleistet, besteht der dringende Bedarf an einer Senkung der Bohrkosten. Werden entsprechende Kostensenkungspotentiale in der Bohrtechnik sowie in der Anlagenbezogenen Technik (z. B. Umwälzpumpen) genutzt, kann sich der Einsatz von mitteltiefen Erdwärmeanlagen zum Heizen und Kühlen zukünftig als ein effektives Heizsystem etablieren.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die, aus den in Heubach durchgeführten Bohrungen, gewonnenen Bohrkerne und Bohrklein (Cuttings) auf die spezifische Wärmekapazität hin untersucht. Die spezifische Wärmekapazität der Gesteinsproben lag im Mittel zwischen 834 [J/kg·K] und 763 [J/kg·K]. Die Werte der ermittelten volumetrischen Wärmekapazität bewegen sich zwischen 2,3 MJ/(m<sup>3</sup>·K) und 2,0 MJ/(m<sup>3</sup>·K).

Anhand der Modellierung des laufenden Betriebs konnten die für Heubach angenommenen Untergrundverhältnisse validiert werden. Für das kalibrierte Einschichtmodell ergaben sich mittlere Wärmeleitfähigkeit von 3 W/(m·K), eine durchschnittliche volumetrische Wärmekapazität von 2,3 MJ/(m<sup>3</sup>·K) und ein geothermischer Gradienten von 3,26 °C/100 m. Unter Annahme dieser Untergrundparameter wurden bei einem Vergleich mit den Messwerten eine Abweichung von 0,6 % (0,12 K) bei der mittleren Fluidtemperatur und 3,1 % bei der über den Betrachtungszeitraum entzogenen Wärmemenge erreicht. Dies entspricht einer guten Übereinstimmung. Für das Mehrschichtmodell konnte mit einer Abweichung von 0,9 % (0,18 K) der mittleren Fluidtemperaturen und 2,1 % der Wärmemenge ebenfalls gute Übereinstimmungen der Simulationsergebnisse mit den realen Betriebsdaten erzielt werden. Bei der Modellvalidierung auf Basis der Durchfluss- und Fluidtemperaturmessungen des GRT ergaben sich für die Parameterkonstellation des kalibrierten Einschichtmodells Abweichungen von nur 0,04 % (0,01 K) bei der mittleren Fluidtemperatur und 0,7 % bei der über den Betrachtungszeitraum zugeführten Wärmemenge. Mit einer Abweichung von 0,18 % (0,06 K) für die mittlere Fluidtemperatur und 3,8 % für die Wärmemenge erreichte das Mehrschichtmodell ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung.

Durch die Entwicklung der Zyklen-Methode zur Datenaufbereitung konnten Lastkurven und Durchflussraten generiert werden, die für eine Berechnung nach dem schnelleren Lösungsansatz von ESKILSON & CLAEISSON (1988) geeignet sind und dabei trotzdem gute Korrelationen zu den Eingangsdaten (Messwerten) erreichen. Für die mittlere Fluidtemperatur ergab sich eine Abweichung von 0,6 % (0,10 K). Die simulierte jährlich entzogene Wärmemenge machte im Vergleich zum realen Betrieb einen um 2,4 % höheren Wert aus.

Die Untersuchungen zur Prognoseunsicherheit ergaben für die volumetrische Wärmekapazität den geringsten Einfluss auf den simulierten Betrieb. Bezogen auf die jährliche mittlere Fluidtemperaturen beliefen sich die maximalen Abweichungen (zwischen 1,70 MJ/(m<sup>3</sup>·K) und 2,36 MJ/(m<sup>3</sup>·K)) auf weniger als 0,5 K. Die Variation des geothermischen Gradienten ergab eine mittlere Temperaturänderung von 1 K bei einer Abweichung von 0,25 C/100 m. Ein Untergrundparameter mit ebenfalls hoher Einflussstärke ist die Wärmeleitfähigkeit. Für den simulierten Betrieb der mitteltiefen EWS ergab sich

im Mittel eine Temperaturänderung von 0,8 K je 0,25 W/(m·K). In den Monaten mit verstärktem Wärmeentzug (Dezember bis Februar) konnte eine maximale Abweichung von 5 K kälteren Fluidtemperaturen bei um 0,7 W/(m·K) geringerer Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Die durch eine Variation des Lastgangs gesteuerte Änderung der entzogenen Wärmemenge hat ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die mittleren Fluidtemperaturen. Für die mittlere jährliche Fluidtemperatur ergaben sich um 28 % geringere Werte im Vergleich von einem kalten Winter (121 MWh/a) zu einem milden Winter (55 MWh/a). Dies entspricht einer maximalen Abweichung der mittleren täglichen Fluidtemperaturen von 8 K. Hinsichtlich der Betriebsparameter hat nicht nur die insgesamt entzogene Wärmemenge einen entscheidenden Einfluss auf die Quelltemperaturen. Die unterschiedlichen Prognosemodelle haben verdeutlicht, dass die Dauer der Entzugszyklen, neben der Durchflussrate und den angelegten Spitzenlasten, signifikante Auswirkungen auf die Fluidtemperaturen haben können. Wird dieser Umstand bei den Modellierungen zur Auslegung einer Geothermieanlage nicht berücksichtigt können sich daraus zusätzlich große Unsicherheiten in den Resultaten der Simulation ergeben.

Um die Effizienz der Erdwärmeanlage in Heubach abschließend validieren zu können, ist noch ein Abgleich der Modellergebnisse mit Messwerten aus einem kalten Winter erforderlich. Dabei wäre insbesondere die Auswertung des Betriebsverhaltens bei stärkerem Heizenergiebedarf von Interesse. Durch eine Überführung dieser Ergebnisse, in Form eines auf dem realen Betrieb basierenden Lastgangs, in eine entsprechende Simulation würde die Zuverlässigkeit der Prognosemodellierung zusätzlich erhöhen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten Einflüsse durch variierende Spitzenleistungen und Durchflussraten nur abgeschätzt werden. Eine Quantifizierung der Einflüsse auf Basis von Modellierungen, die speziell auf diese Fragestellung ausgelegt werden, wäre ebenfalls noch eine interessante Fragestellung.

## 7 Literaturverzeichnis

- AL-KHOURY, R.; BONNIER, P.G.; BRINGREVE, R.B.J. (2005): *Efficient finite element formulation for geothermal heating systems, Part I: Steady state*. In: International Journal for Numerical Methods in Engineering 63, 988–1013.
- AL-KHOURY, R. & BONNIER, P.G. (2006): *Efficient finite element formulation for geothermal heating systems, Part II: Transient*. In: International Journal for Numerical Methods in Engineering 67, 725–745
- AL-KHOURY, R., KÖLBEL, T., & SCHRAMMEI, R. (2010): *Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers*. Computers & Geosciences, 36(10), 1301-1315.
- ALTENBERGER, U. & BESCH, T. (1993): *The Böllstein Odenwald: evidence for pre-to Early Variscan plate convergence in the Central European Variscides*. In: Geologische Rundschau, 82 (3), 475-488.
- ALTHERR, R., HENES-KLAIBER, U., HEGNER, E., SATIR, M., & LANGER, C. (1999). *Plutonism in the Variscan Odenwald (Germany): from subduction to collision*. In: International Journal of Earth Sciences, 88 (3), 422-443.
- ARNDT, D., BÄR, K., FRITSCH, J. G., KRACHT, M., SASS, I., & HOPPE, A. (2011). *3D structural model of the Federal State of Hesse (Germany) for geopotential evaluation*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 162(4), 353-369.
- BAUER, D. (2011): *Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern*. Universität Stuttgart, Dissertation
- BAUER, D., HEIDEMANN, W., MÜLLER-STEINHAGEN, H., & DIERSCH, H. J. G. (2009): *Modelling and simulation of groundwater influence on borehole thermal energy stores*. Proceedings, Effstock.
- BÄTTIG, D. (2015). *Angewandte Datenanalyse; Der Bayes'sche Weg – Statistik und ihre Anwendungen*; Springer Berlin Heidelberg. 366 Seiten
- BÄR, K. (2012). *Untersuchung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation
- BIßMANN, S., & KAHNT, R. (2014): *Reflexionsseismische Exploration*. In: BAUER, M., FREEDEN, W., JACOBI, H., & NEU, T (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie - Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung. Springer, Berlin, Heidelberg, 82 – 109.

- 
- BLOMBERG, T., J. CLAESSON, P. ESKILSON, G. HELLSTROM, AND B. SANNER. 2008. *EED—Earth Energy Designer* 3.16. BLOCON SWEDEN. [www.blocon.se](http://www.blocon.se)
- BMWi (2013): *Erneuerbare Energien im Jahr 2013 - Erste vorläufige Daten zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.). Stand 28. Februar 2014
- BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (2007): *Tiefe Geothermie in Deutschland*. Institut für Energetik und Umwelt GmbH
- BUJA, H. O. (2009): *Handbuch der Baugrunderkennung: Geräte und Verfahren*, Vieweg+Teubner |GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 608 Seiten
- CLAUSER, C.; KOCH, A.; HARTMANN, A; JONRAD, R; RATH, V.; WOLF, A; MOTTAGHY, D.; PECHNING, R. (2006): *Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland; Phase 1 – Westliche Molasse und nördlich angrenzendes Süddeutsches Schichtstufenland*. BMU-Projekt FKZ 0329985; Endbericht 01.01.2005 – 31.10.2006
- DIERSCH, H.-J. G. (1985): *Modellierung und numerische Simulation geohydrodynamischer Transportprozesse*. Akademie der Wissenschaften der DDR, Dissertation
- DIERSCH, H.-J. G. (2014): *FEFLOW - Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer, Berlin, Heidelberg, 996 Seiten
- DIERSCH, H.-J. G., BAUER, D., HEIDEMANN, W., RÜHAAK, W., SCHATZL, P., (2010): *Finite element formulation for borehole heat exchangers in modeling geothermal heating systems by FEFLOW*. In: FEFLOW Reference Manual and White papers, vol. 5, DHI-WASY GmbH, <http://www.feflow.info/manuals.html>.
- DIERSCH, H.-J. G., BAUER, D. HEIDEMANN, W., RÜHAAK, W., & SCHÄTZL, P. (2011<sub>A</sub>): *Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals*. In: Computers & Geosciences, 37(8), 1122-1135
- DIERSCH, H.-J. G., BAUER, D. HEIDEMANN, W., RÜHAAK, W., & SCHÄTZL, P. (2011<sub>B</sub>): *Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 2. Numerical simulation*. In: Computers & Geosciences, 37(8), 1136-1147.
- ESKILSON, P. (1987): *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Lund University, Dissertation
-

- ESKILSON, P., CLAEISSON, J. (1988): *Simulation Model for thermally interacting heat extraction boreholes*. In: Numerical Heat Transfer 13 (2), 149–165.
- EICHLER, J. (2014): *Physik für das Ingenieurstudium*. 5. Ausgabe, Springer, Wiesbaden, 423 Seiten
- FORALITH AG (1998): *Geothermie, Innovative Bohrtechniken; ein Weg zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit geothermischer Bohrungen*. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, BEW DIS Vertrags-Nr. 53852
- FORSTER, O. (2008). *Analysis 1, Differential- und Integralrechnung einer Veränderlichen*. 10. Auflage, Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 333 Seiten
- FRITSCH, J. G., KÖTT, A., KRACHT, M., NESBOR, H.-D., REISCHMANN, T. (2012): *Geologische und geothermische Ergebnisse aus dem Projekt: Mitteltiefe Erdwärmesonde Heubach*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; 7. Tiefengeothermie-Forum Hessen, Darmstadt, 08. Oktober 2012,
- GARMS, H.-J. (2014): *Finanzierung*. In: BAUER, M., FREEDEN, W., JACOBI, H., & NEU, T (Hrsg.) Handbuch Tiefe Geothermie - Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung. Springer, Berlin, Heidelberg; 528 – 541
- HOMUTH S. (2014): *Bohrtechnische Erschließung mitteltiefer geothermischer Systeme*; Geothermiekongress 2014, Essen
- HORNICH W. (2014): *Hydraulische Imlochhammerbohrungen – eine technische Perspektive für Geothermievorhaben*. 9. Tiefengeothermieforum Hessen, Darmstadt, 30. September 2014
- HUBER, A. & SCHULER, O. (1997); *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW); Schlussbericht
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999): *Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW); Schlussbericht
- JEROMIN, I. & BIRKNER, P. (2014): *Mitteltiefe und tiefe Geothermie im urbanen Raum - technische Konzepte eines städtischen Energieversorgers*.- 9. Tiefengeothermie-Forum, 30.09.2014, Darmstadt
- KALTSCHMITT, M., STREICHER, W., & WIESE, A. (Hrsg.) (2006). *Erneuerbare Energien*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 724 Seiten

- 
- KLEINER, S. (2003): *Untersuchungen zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen –petrophysikalische Messungen und numerische Simulationen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diplomarbeit
- KONSTANTIN, P. (2007). *Praxisbuch Energiewirtschaft*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 405 Seiten
- KRUCK, C., LO, R. ELTROP, L., WALKER-HERTKORN, S., ORYWALL, P., KÖLBEL, T. (2009): *Nutzung der Tiefen-Geothermie in Stuttgart. Durchführung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Schlussbericht*
- LAMARCHE, L., KAJL, S., BEAUCHAMP, B. (2010): *A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems*. *Geothermics* 39 (2010), 187–200.
- LEMES Z. (2013): *Erfahrungsbericht Tiefen-Erdwärmesonde Heubach*. HEAG Südhessische Energie AG, 8. Tiefengeothermie-Forum Hessen, Darmstadt, 01. Oktober 2013
- MARAINI, S. (2000): *Vergleich von Software zur Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anlagen*, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Diplomarbeit
- NUßBICKER-LUX J. (2010): *Simulation und Dimensionierung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeicher*, Universität Stuttgart, Dissertation
- REISCHMANN, T., ANTHES, G., JAECKEL, P., & ALTENBERGER, U. (2001). *Age and origin of the Böllsteiner Odenwald*. In: *Mineralogy and Petrology*, 72 (1-3), 29-44.
- SIGNORELLI, S. & KOHL, T. (2002): *Validierung des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Schlussbericht
- STEIN, E. (2001). *The geology of the Odenwald crystalline complex*. In: *Mineralogy and Petrology*, 72 (1-3), 7-28.
- STOBER, I., & BUCHER, K. (2012). *Geothermie*. Springer Berlin Heidelberg, 299 Seiten
- STOCKHAUSEN S. & GRÜNITZ J. (2014): *Fördermöglichkeiten*. In: BAUER, M., FREEDEN, W., JACOBI, H., & NEU, T (Hrsg.) *Handbuch Tiefe Geothermie - Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung*. Springer, Berlin, Heidelberg; 544 - 558
- TODT, W. A., ALTENBERGER, U., & VON RAUMER, J. F. (1995). *U-Pb data on zircons for the thermal peak of metamorphism in the Variscan Odenwald, Germany*. In: *Geologische Rundschau*, 84 (3), 466-472.
-

TUOMAS, G. (2004). *Water powered percussive rock drilling: process analysis, modelling and numerical simulation*. Luleå University of Technology, Dissertation

VDI-RICHTLINIE 4640 (2010) Blatt 1 bis 4: *Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*, Düsseldorf, 33 Seiten

WELSCH (2012): *Forschungsbohrung Heubach: Untersuchungen zu den geothermischen Reservoireigenschaften des Odenwald Kristallins*, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit

### **Internetquellen:**

AGEB (2012): Energie in Deutschland, Trends und Hintergründe zur Energieversorgung; <http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland> ; Webseite; Stand Oktober 2014

GTV- Bundesverband Geothermie (2013): Geothermie in Zahlen; <http://www.geothermie.de/aktuelles/geothermie-in-zahlen.html> ; Webseite, Stand: Oktober 2014

HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2013): Projekte: Mitteltiefe Erdwärmesonde Heubach; <http://www.hlug.de/start/geologie/erdwaerme-geothermie/tiefe-geothermie/projekte-erdwaermesonde-heubach/mitteltiefe-erdwaermesonde-heubach.html>; Webseite, Stand Oktober 2014

HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2012): Schichtverzeichnis Tiefbohrung Groß-Umstadt / Heubach 2012; <http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/heubach/SV-Tiefbohrung.pdf> ; Webseite. Stand Oktober 2014

HUBER, A (2011): Benutzerhandbuch zum Programm EWS, Version 4.7 – Berechnung von Erdwärmesonden. [http://www.hetag.ch/download/Bed\\_EWS47.pdf](http://www.hetag.ch/download/Bed_EWS47.pdf) ; Webseite, Stand Oktober 2014

SETARAM (2014): Datenblatt C80 Calvet Calorimeter; <http://www.setaram.com/C80.htm>; Webseite, Stand August 2014.

SIMADER, G., (2013): *Heizsysteme im Vollkostenvergleich*. Erneuerbare Wärme - Schlüssel zur Energiewende am 08.05.2013. <http://www.biomasseverband.at/veranstaltungen/tagungen-und-vortraege/erneuerbare-waerme-schluessel-zur-energiewende/> ; Vortrag auf Webseite, Stand November 2014

VIKERSONN (2014): Erdwärmebohrung Kosten. <http://vikersonn.de/erdwaermebohrung-kosten> ; Webseite, Stand November 2014

WETTER ONLINE (2014): Klima in der Region Aschaffenburg, Klimaverlauf; [http://www.wetteronline.de/?pcid=pc\\_rueckblick\\_climate&gid=10766&pid=p\\_rueckblick\\_climate\\_history&sid=Temperature&month=12&iid=10648](http://www.wetteronline.de/?pcid=pc_rueckblick_climate&gid=10766&pid=p_rueckblick_climate_history&sid=Temperature&month=12&iid=10648) , Webseite, Stand Oktober 2014

WOLFGRAMM, M., LENZ, G., SEIBT, P., (2005): *Studie zu Thermalsolevorkommen in Mecklenburg-Vorpommern incl. Kartografischer Darstellung.* [http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/fis\\_gt\\_mv\\_sole\\_kurzfassung.pdf](http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/fis_gt_mv_sole_kurzfassung.pdf) ; Webseite, Stand November 2014

Sonstige Quellen:

HSE (2011): *Simulierte Wärmeentzugswerte für die mitteltiefe EWS Heubach, basierend auf Außentemperaturdaten von 2010.* HEAG Süd Hessische Energie AG, unveröffentlichter Datensatz

GRT (2012): *Geothermal Response Test an der mitteltiefen Erdwärmesonde in Heubach.* Geotechnisches Umweltbüro Lehr, unveröffentlichter Datensatz

## 8 Anhang

### Anhang A – Bohrprofil und Schichtverzeichnis der mitteltiefen Erdwärmesonde in Heubach

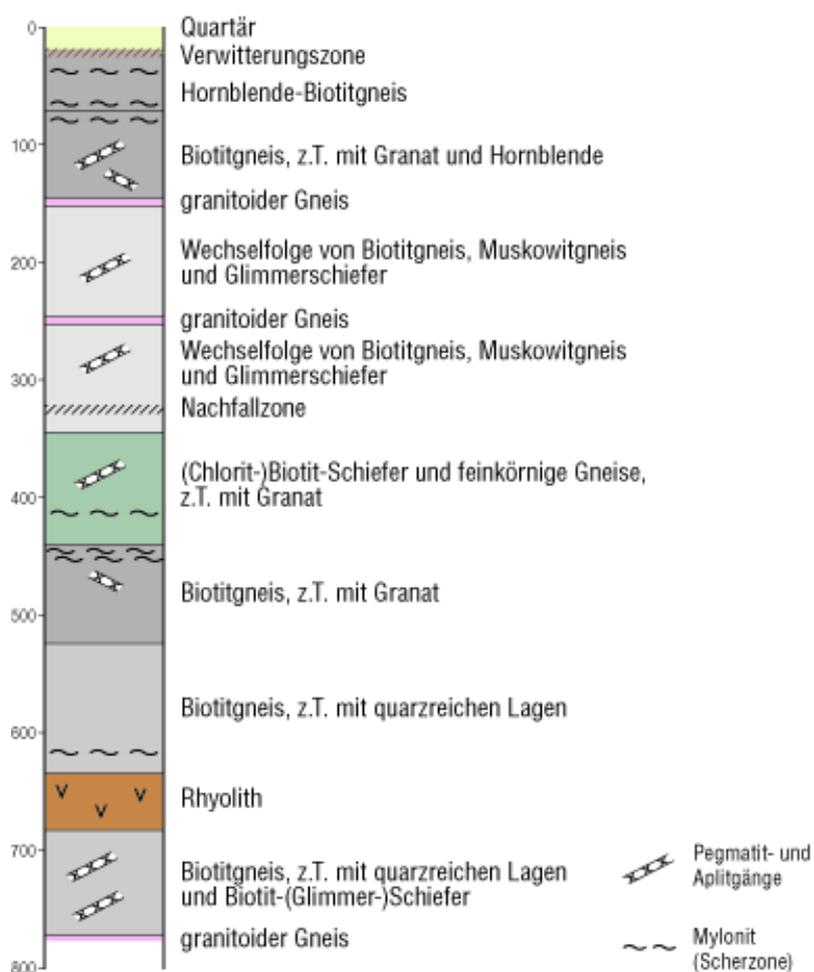


Abbildung 78: Stark vereinfachtes Bohrprofil der der mitteltiefen Erdwärmesonde in Heubach (aus: HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2012)

bis [m u.GOK]	Angetroffenes Gestein
- 3	Ton, Ablagerungen des Pferdsbachs
- 19	Mittel- bis Grobsand, kiesig (Buntsandsteinbruchstücke und Quarzkörner), tonig-schluffige Matrix, Hangschutt
- 26	Hornblende-Biotit-Gneis, stark verwittert
- 34	Hornblende-Biotit-Gneis, unverwittert
- 39	Hornblende-Biotit-Gneis, durchsetzt mit hellen Apliten und Pegmatiten
- 40	Feinkörniger, weicher Bereich, stark glimmerführend, mylonitische
- 71	Hornblende-Biotit-Gneis, durchsetzt mit hellen Apliten und Pegmatiten
- 86	Biotit-Gneis
- 146	Biotit-Gneis, z.T. granat- und hornblendeführend, Bereiche mit höherem (Hell-) Glimmeranteil zwischen 87-89 und 100-108 m, mehrere Pegmatitgänge
- 150	Granitoider Gang
- 166	Biotit-Gneis, z.T. granat- und hornblendeführend, mehrere Pegmatitgänge, granitoide Gänge von 148-150 m und 171-173 m
- 170	Muskovit-Chlorit-Gneis
- 192	Biotit-Gneis, granitoider Gang von 171-173 m
- 195	Gneis, kalifeldspatreich
- 211	(Chlorit-) Biotit-Gneis
- 212	Muskovit-Gneis / Glimmerschiefer
- 228	(Chlorit-) Biotit-Gneis
- 244	Granitoider Gneis
- 252	Biotit-Gneis
- 257	Granitoider Gneis
- 258	Pegmatit
- 321	Wechselfolge Biotit-Gneis und Biotit-(Glimmer-)Schiefer, einzelne Pegmatit- und Quarzgänge
- 326	Grauer Ton mit Gneisgrus
- 330	Biotit-Schiefer
- 340	(Chlorit-) Biotit-Schiefer, granatführend, Harnische
- 386	Gneis, grünschwartz, feinkörnig, bereichsweise granatführend
- 388	Pegmatit
- 415	Gneis, grünschwartz, feinkörnig, bereichsweise granatführend
- 416	Mylonit
- 437	Gneis, grünschwartz, feinkörnig, bereichsweise granatführend
- 438	Quarzgang
- 443	Biotitschiefer, feinkörnig, mylonitisch
- 444	Quarzgang
- 449	Biotitschiefer, feinkörnig, mylonitisch
- 467	Biotitgneis, feinkörnig, granatführend
- 471	Aplit
- 525	Biotitgneis, feinkörnig, granatführend
- 528	Gneis, grusig, stark vertont
- 549	Biotitgneis, feinkörnig
- 550	Aplit
- 573	Biotitgneis, feinkörnig
- 575	Quarzgang
- 595	Biotitgneis, feinkörnig
- 609	Biotitgneis, feinkörnig, erhöhter Anteil an Quarz(-Gängchen)
- 611	Aplit
- 612	Biotitgneis, feinkörnig
- 613	Aplit
- 617	KERN: Biotitgneis, feinkörnig, quarzitisches, granatführend, wechselnde Anteile an Feldspat und Biotit, z.T. mylonitisch, mit quarzreichen Lagen und Quarzboudins
- 634	Biotitgneis, feinkörnig
- 679	Rhyolith
- 684	Biotitgneis, feinkörnig und Biotitschiefer, quarzitisches Lagen, Pegmatite und Aplit
- 687	Quarzgang
- 726	Biotitgneis, feinkörnig und Biotitschiefer, quarzitisches Lagen, Pegmatite und Aplit
- 733	Biotitgneis, feinkörnig, verlehmt
- 762	Biotitgneis, feinkörnig und Biotitschiefer, granitische und quarzitisches Lagen, Pegmatite und Aplit
- 772,8	Granitoider Gneis
- 774,8	KERN: granitoider Gneis, z.T. migmatitisch

Abbildung 79: Schichtverzeichnis der Tiefenbohrung in Heubach (Groß-Umstadt) (aus: HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2013)

## Anhang B – Übersicht der monatlich entzogenen Wärmemenge

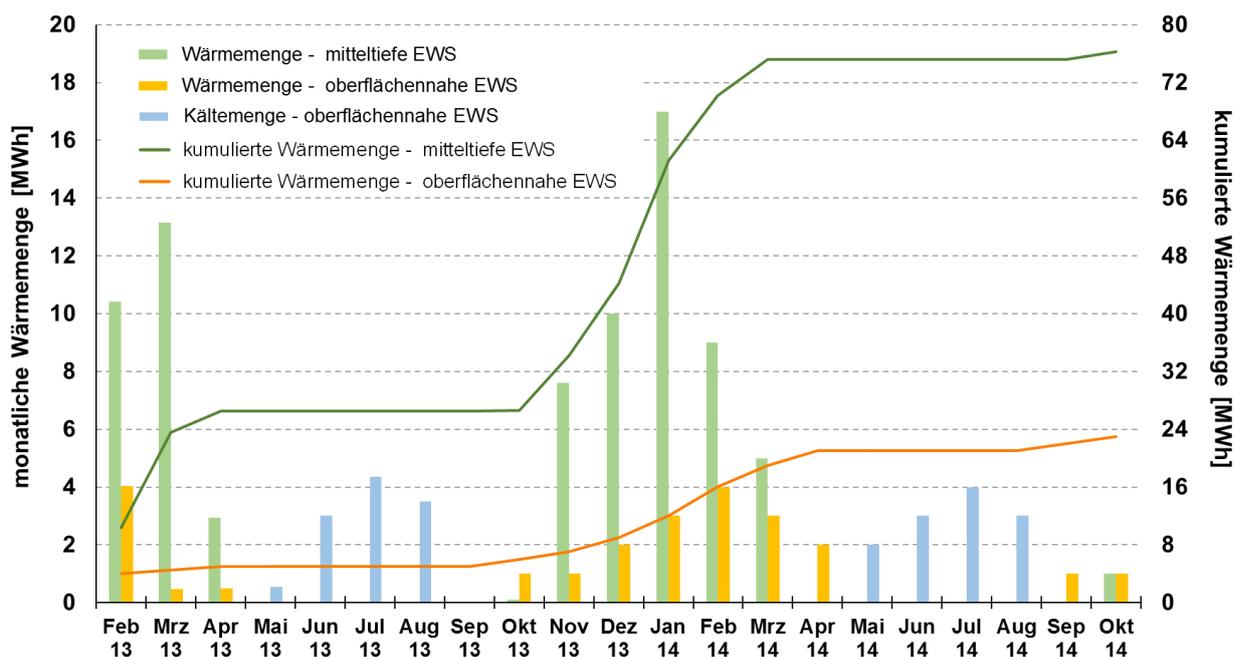


Abbildung 80: Dargestellt sind die entzogenen Wärmemengen im Monat sowie die kumulierte Wärmemengen der mitteltiefen EWS und des oberflächennahen Erdwärmesondenfelds im Vergleich. Die hellgrünen Balken und der dunkelgrüne Graph zeigen die monatlichen und die kumulierte Wärmemenge der mitteltiefen Erdwärmesonde. Die Entzugsmenge der acht oberflächennahen Erdwärmesonden ist anhand der gelben und blauen Balken dargestellt. Die blauen Balken repräsentieren dabei die Kühlung.

## Anhang C – Wärmekapazität

Tabelle 10: Übersicht der ermittelten spezifischen ( $c_p$ ) und volumetrischen Wärmeleitfähigkeiten ( $c_v$ ) für 25 °C. Die Extrapolation der spez. Wärmekapazität erfolgte anhand von linearen Regressionsgeraden für den Messbereich 48 °C bis 185 °C und 40 °C bis 55 °C und einer polynomialische Ausgleichsgerade des Temperaturbereichs 48 °C bis 185 °C.

Proben- Nummer	Lithologie	Linear im Temperatur- bereich ~ 48 bis ~ 185°C	Linear im Temperatur- bereich 40 bis 55°C	Polynom im Temperatur- bereich ~ 48 bis ~ 185°C	Reindichte [kg/m <sup>3</sup> ] (WELSCH 2012)	$c_v$ [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]
		$c_p$ [J/(kg·K)]	$c_p$ [J/(kg·K)]	$c_p$ [J/(kg·K)]		
LM 240	Biotit Gneis	797,35	794,30	758,44	2695	2,15
LM 270	Biotit Gneis	805,57	792,91	768,69	2660	2,14
LM 310	Biotit (Glimmer) Schiefer/ Biotit Gneis	796,43	790,09	774,24	2634	2,10
LM 325	Ton mit Gneisgrus	817,43	837,71	768,87	2622	2,14
LM 335	Biotit Schiefer	804,08	798,39	764,31	2612	2,10
LM 400	feinkörniger, schwarzgrüner Gneis	833,70	834,28	787,12	2773	2,31
LM 660	Rhyolith	795,76	790,72	754,45	2612	2,08
45037-3.1	Hornblende- Biotit-Gneis	780,15	780,68	764,27	2773	2,16
45037-3.2	Hornblende- Biotit-Gneis	774,94	773,61	757,90	2773	2,15
45038-9.1	Hornblende- Biotit-Gneis	778,51	788,58	762,99	2771	2,16
45038-9.2	Hornblende- Biotit-Gneis	777,18	784,47	762,04	2771	2,15
45043-3.1	Biotit Gneis (zT Chlorit-Biotit-Gneis)	782,68	789,70	759,72	2751	2,15
45043-3.2	Biotit Gneis (zT Chlorit-Biotit-Gneis)	788,91	790,36	763,43	2751	2,17
45040-5.2	Hornblende- Biotit-Gneis	776,12	781,37	763,45	2752	2,14
45040-5.1	Hornblende- Biotit-Gneis	778,14	778,17	762,72	2752	2,14
45969.1	Bändergneis	763,43	768,56	755,76	2628	2,01
45969.2	Bändergneis	763,21	768,93	752,76	2622	2,00
45699.1	Bändergneis	767,94	774,07	762,23	2626	2,02
45699.3	Bändergneis	764,78	773,40	756,01	2622	2,01
45699.2	Bändergneis	780,15	771,23	749,87	2626	2,05

**Anhang D – CD-Rom mit Rohdaten der Messungen und  
der in FEFLOW erstellten Modelle**