

**Validate Frost**  
**Vertiefte Evaluierung der Minus 3°C Grenze**  
**beim Betrieb von Erdwärmesonden**

**Schlussbericht zum 31. August 2021**

Jürgen Braun & Giulia Giannelli  
Universität Stuttgart  
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

Christian Moormann & Mustafa Mustafa  
Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik (IGS)

Dirk Mangold & Yannick Reduth  
Steinbeis Innovation gGmbH  
Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige  
thermische Energiesysteme (Solites)

Förderkennzeichen: L75 18008, L75 18009, L75 18010

Gesamtförderzeitraum: 01.10.2018 - 31.08.2021

Das Vorhaben wurde im Rahmen des Förderprojektes „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS) beim Projektträger Karlsruhe am Karlsruher Institut für Technologie mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>KURZBESCHREIBUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVATION UND HINTERGRUND DES VORHABENS</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENE FORTSCHRITTE AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN</b>	<b>8</b>
<b>8</b>	<b>BEITRAG DER ERGEBNISSE ZU DEN ZIELEN DES FÖRDERPROGRAMMS DES ZUWENDUNGSGEBERS</b>	<b>8</b>
<b>9</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>9</b>
<b>9.1</b>	<b>AP 1: Kleinskalige Experimente zur Bestimmung der Gefrieretemperatur und des Frostzeitpunktes verschiedener Materialien (L75 18008)</b>	<b>9</b>
9.1.1	Skalen und Versuchstypen	9
9.1.2	Materialien und Messtechnik	10
9.1.3	Vorversuche	14
9.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorversuche	22
9.1.5	Reproduzierbare Hauptversuche	23
9.1.6	Ergebnisse Konfiguration 1	26
9.1.7	Ergebnisse Konfiguration 2	29
9.1.8	Ergebnisse aus Konfiguration 3	31
9.1.9	Grundlagen Betontechnologie und Gefrieren von Beton	34
9.1.10	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse des AP 1	35
<b>9.2</b>	<b>AP 2: Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff (IGS)</b>	<b>36</b>
<b>9.3</b>	<b>AP 3a: Erstellung und Auswahl geeigneter Simulationsmodelle (Solites)</b>	<b>42</b>
9.3.1	Numerische Modellierung	43
9.3.2	Ergebnisse	47
<b>9.4</b>	<b>AP 3b: Simulationsstudie mit Parametervariation zur Identifikation der kritischen Fälle (Solites)</b>	<b>50</b>
9.4.1	Numerische Modellierung	51
9.4.2	Ergebnisse	51
<b>9.5</b>	<b>AP 4: Durchführung von mittelskaligen Frost-Experimenten (VEGAS)</b>	<b>56</b>
9.5.1	Versuche zur Bestimmung von Beschädigungen der Verfüllbaustoffe durch Frost-Tau-Wechsel	56
9.5.2	Prototypexperimente Reihe 1	61
9.5.3	Frost-Tau-Experimente Reihe 2	66
9.5.4	Frost-Tau-Experimente Reihe 3	68
9.5.5	Frost-Tau-Experimente Reihe 4	69
9.5.6	Frost-Tau-Experimente Reihe 5	71

9.5.7	Versuche zur Bestimmung von Beschädigungen der Verfüllbaustoffe durch Frost-Tau-Wechsel: Zusammenfassung und Interpretation	75
9.5.8	Versuche zur Bestimmung von Läufigkeiten durch Temperaturschrumpfungen in Sonde, Gebirge und Bohrlochwandung	77
<b>9.6</b>	<b>AP 5a: Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse anhand der in AP 4 experimentell ermittelten Messdaten (Solites)</b>	<b>84</b>
9.6.1	Numerische Modellierung	84
9.6.2	Ergebnisse	87
<b>9.7</b>	<b>AP 5b: 3D THM-Simulation der Modellversuche (IGS)</b>	<b>96</b>
9.7.1	Numerische Rahmenbedingungen	96
9.7.2	Numerische Modellierung	99
9.7.3	Geometrie 1	101
9.7.4	Geometrie 2	107
9.7.5	Geometrie 3	113
9.7.6	Permeameterexperiment	117
<b>9.8</b>	<b>Zusammenfassung AP 4, AP 5 a, AP 5b</b>	<b>122</b>
<b>9.9</b>	<b>AP 5c: Versuche zum Wärmeübergang Verfüllbaustoff / Baugrund</b>	<b>131</b>
9.9.1	Design des Konzepts	131
9.9.2	Aufbau des Versuchsstandes	133
9.9.3	Ergebnisse	136
<b>9.10</b>	<b>AP 6: Detailsimulation zur Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur (Solites)</b>	<b>140</b>
9.10.1	Numerisches Modell:	141
9.10.2	Darstellung der Ergebnisse für Geometrie a:	142
9.10.3	Darstellung der Ergebnisse für Geometrie c:	144
9.10.4	Zusammenfassung	146
<b>9.11</b>	<b>AP 7a: Numerische Untersuchung verschiedener Szenarien (Solites)</b>	<b>147</b>
<b>9.12</b>	<b>AP 7b: 3D THM-Simulation ausgesuchter Realszenarien (IGS)</b>	<b>149</b>
9.12.1	Numerisches Modell	150
9.12.2	Ergebnisse des numerischen Modells	152
<b>9.13</b>	<b>AP 8a: Großversuch im Realmaßstab (Solites)</b>	<b>163</b>
9.13.1	Versuchsaufbau und Materialien	163
9.13.2	Messtechnik und Aufbau	166
9.13.3	Versuchsdurchführung	170
9.13.4	Ergebnisse	170
<b>9.14</b>	<b>AP 8b: Simulation Großversuch im Realmaßstab (IGS)</b>	<b>174</b>
9.14.1	Numerisches Modell	174
9.14.2	Ergebnisse des numerischen Modells	175
<b>10</b>	<b>NUTZEN, INSBESONDERE PRAKTISCHE VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE UND ERFAHRUNGEN</b>	<b>179</b>
<b>11</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN, WISSENSTRANSFER</b>	<b>180</b>
11.1	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	180
11.2	Vorträge	180
11.3	Poster	180

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorbereitung VM2 mittels des kleinen elektrischen Rührer (links) und GERTEC IS-38-E Kolloidmischer (rechts).....	11
Abbildung 2: Vorbereitung der gesättigten Quarzsandprobe (links), gefertigte Probe mit Silikon versiegelt (Mitte), Öffnung der Probe nach den Versuchen (rechts).....	12
Abbildung 3: Thermostat Ministat 125 links, Thermostatbad in der Mitte, Setup des Thermostats für externe Laboranwendungen (rechts). ....	13
Abbildung 4: Abmessungen aller verwendeten Temperatursensoren. ....	13
Abbildung 5: Draufsicht des Thermostatbads, Platzierung von Wärmetauscher, Probe und Sensoren. ....	16
Abbildung 6: Schnitt durch Proben im Thermostatbad (unten) und Querschnitt Proben (G3 links, G1 rechts) in unterschiedlichen Gefäßen (oben) .....	16
Abbildung 7: Vorversuche mit Quarzsand.: VV1 in PE-Gefäß (G1) links und VV2 in PMMA-Gefäß (G2) rechts .....	17
Abbildung 8: Erste Nukleation In QS8 (VV2) links und im VM3d (VV3) rechts. ....	18
Abbildung 9: VV4 links, VV5 rechts. ....	19
Abbildung 10: Umfang und Zeitpunkt der Peaks in VV9 bei mehreren Frost-Tau-Zyklen .....	19
Abbildung 11: Vergleich zwischen den Gefrier- und Tauprozesse in VV7 (oben), VV8 (Mitte), VV9 (unten). Rechts Vergrößerung auf die ersten 30 Stunden. ....	20
Abbildung 12: Umfang und Zeitpunkt der Peaks in VV6 (oben) und VV11 (unten) bei mehreren Frost-Tau-Zyklen .....	21
Abbildung 13: Details von VV6 (oben) und VV11 (unten) .....	22
Abbildung 14: Probengefäße G1 und G2 und Sensorkonfiguration K1 – K3.....	24
Abbildung 15: Anordnung der Proben im Edelstahlbehälter (links), Behälterskizze (Mitte), Komponenten Versuchsaufbau (rechts).....	24
Abbildung 16: Vergleich der Frost- und Tauprozesse in den unterschiedlichen untersuchten Materialien in Konfiguration 1. ....	26
Abbildung 17: Zeitpunkte und Temperaturen der Nukleation in aufeinanderfolgender Frost-Tau-Zyklen.....	28
Abbildung 18: Drei Proben aus VM1 im Vergleich (oben: P5; Mitte: P6; unten: P7).....	29
Abbildung 19: Vergleich der Frost- und Tauprozesse verschiedener Materialien in Konfiguration 2. ....	30
Abbildung 20: Verhalten der Probe VM1 bei unterschiedlichen Temperaturprogrammen. ....	31
Abbildung 21: Vergleich der Sensoren bei Frost-Tauwechseln im „industriell“ hergestellten Verfüllmaterial.....	32
Abbildung 22: Probe der Konfiguration 3 aus Verfüllmaterial VM3d, auf die Kleinskala vorbereitet.....	33
Abbildung 23: Achsensymmetrisches Modell .....	37
Abbildung 24: Transition Intervall .....	38
Abbildung 25: Versuch VM2-T1: Gegenüberstellung Messergebnisse und Ergebnisse der numerischen Simulation (mit Phasenwechsel) .....	39
Abbildung 26: Versuch VM2-T1 mit Phasenwechsel (15-Stunden Abschnitt) .....	39

Abbildung 27: Versuch VM2-T1: Gegenüberstellung Messergebnisse (oranger Graph) und Ergebnisse der numerischen Simulation ohne Phasenwechsel (blauer Graph).....	40
Abbildung 28: Versuch VM2-T1 ohne Phasenwechsel (15-Stunden Abschnitt) .....	40
Abbildung 29: Versuch VM2-T4: Gegenüberstellung Messergebnisse und Ergebnisse der numerischen Simulation (mit Phasenwechsel) .....	41
Abbildung 30: Supercooling und Nukleation.....	41
Abbildung 31: Versuch VM2-41 mit Phasenwechsel (20-Stunden Abschnitt) .....	42
Abbildung 32: Draufsicht von schräg oben auf das 3D-FEFLOW-Simulationsmodell mit Vertikalschnitt durch den vorderen Sondenkreislauf (links). Geometrie c im horizontalen 2D-Schnitt (rechts).....	44
Abbildung 33: Darstellungen des Simulationsmodells. Links: 3D-Modell. Mitte: Draufsicht auf oberste Ebene. Rechts: Modellzentrum mit Bohrloch, Verfüllung und Erdwärmesonden-Vor- und Rückläufen .....	44
Abbildung 34: Ansicht in das halbtransparente 3D-Modell von schräg oben in drei Zoom-Stufen von links nach rechts. Die Wärmeübertragung erfolgt mittels diskreter Linienelemente (blaue Linien) die sich im Zentrum der Sondenrohre befinden .....	45
Abbildung 35: Darstellung der Temperaturlausbreitung nach 56 Tagen. Rote Linie: 10 °C-Isolinie; Gelber Pfeil: Symbolisiert den Radius der maximalen Temperaturbeeinflussung durch den Sondenbetrieb. ....	46
Abbildung 36: links, Mitte: Darstellung des 2D-Modells mit den Abmessungen; Rechts: Thermische Randbedingung (gelb) an der Innenseite der Sondenrohre .....	47
Abbildung 37: Temperaturentwicklung im 3D-Modell bei einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ der Hinterfüllung von 0,8 W/(mK) .....	47
Abbildung 38: Temperaturentwicklung im 3D-Modell bei einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ der Hinterfüllung von 3 W/(mK) .....	48
Abbildung 39: Beobachtungspunkte zur Temperaturentlesung für den Vergleich von 2D- und 3D-Modell. Die Temperaturen der rot markierten Beobachtungspunkte werden für den Vergleich in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt.....	49
Abbildung 40: Bohrlochgeometrie der 2D-Modelle mit den drei untersuchten Sondenrohranordnungen (a, b, c) der Parameterstudie. ....	51
Abbildung 41: Position der Beobachtungspunkte in Geometrie a .....	53
Abbildung 42: Position der Beobachtungspunkte in Geometrie b .....	54
Abbildung 43: Position der Beobachtungspunkte in Geometrie c .....	55
Abbildung 44: Versuchsstand im Kühlraum mit Darstellung der Trägerfluidleitungen und der außerhalb abgestellten Thermostate (Mitte Querschnitt, rechts Bild des Versuchs).....	56
Abbildung 45: Die drei unterschiedlichen geplanten EWS-Geometrien und die entsprechende Anordnung der Temperatursensoren innerhalb des Ringraums (rote Punkte) und an der Bohrlochwand (grüne Punkte).....	57
Abbildung 46: In Frostversuche angewendete Temperaturprogramme .....	59
Abbildung 47: Vorbereitung Wärmetauscher im PVC Rohr: Anordnung der Rohre (Geometrie), Einbringung Innensensoren.....	59
Abbildung 48: Verpressung (links), Einbringung der Außensensoren an die EWS-Rand (Mitte), Befüllung der Versuchsstandsäule (rechts) .....	60
Abbildung 49: „in situ Verpressung“ .....	61
Abbildung 50: Isolierung rund um die Versuchsstandsäule .....	61
Abbildung 51: Einfluss des Soledurchflusses auf die Temperaturentausbreitung. ....	63

---

Abbildung 52: Einfluss der Isolierung auf die Temperaturlausbreitung .....	64
Abbildung 53: visuelle Bewertung der Schäden bei der Versuchskonfiguration R1G1 nach den Frost-Tau-Experimenten .....	65
Abbildung 54: visuelle Bewertung der Schäden bei der Versuchskonfiguration R1G2 und R1G2 nach den Frost-Tau-Experimenten .....	65
Abbildung 55: Temperaturlausbreitung der unterschiedlichen Geometrien für Reihe 2 (VM2: >2 W/(m*K), QS8: 2,6 W/(m*K) .....	67
Abbildung 56: visuelle Beobachtung der Konfiguration R2G2 nach dem Frost-Experiment .....	67
Abbildung 57: Temperaturlausbreitung der unterschiedlichen Geometrien für Reihe 3 (VM1: 1,2 W/(m*K), BT: 1,25 W/(m*K)) .....	68
Abbildung 58: Vergleich der Temperaturen von VM1 und VM3d in Geometrie 1 mit umliegendem schlecht wärmeleitenden Bentonit-Boden. ....	70
Abbildung 59: visuelle Beobachtung des EWS-Abschnitt der Versuchskonfiguration R4G3. ....	71
Abbildung 60: Temperaturlausbreitung der unterschiedlichen Geometrien für Reihe 4/5 (VM3d: 2 W/(m*K), BT: 1,25 W/(m*K)) .....	72
Abbildung 61: Vergleich von Geometrie 2 und VM3d in unterschiedlichem umliegenden Boden .....	73
Abbildung 62: Vergleich der Verhalten von VM1 (1,2 W/(m*K)) und VM3 (2 W/(m*K)) in Geometrie 2 mit umliegendem schlecht wärmeleitenden Bentonit-Boden (BT: 1,25 W/(m*K)) .....	73
Abbildung 63: Vergleich der Verhalten von VM2 (>2 W/(m*K)) rechts und VM3 (2 W/(m*K)) links in Geometrie 2 mit umliegendem stark wärmeleitenden Quarzsand-Boden (QS: 2,6 W/(m*K)) .....	74
Abbildung 64: visuelle Beobachtung der Konfiguration R5-G2sand nach dem Frost-Experiment .....	75
Abbildung 65: Temperaturprogramm TP3 in den Läufeigkeit-Experimente verwendet. AK: Abkühlung, AW: Aufwärmung .....	78
Abbildung 66: Voruntersuchungen des Härteflüssigboden auf die Kleinskala (IGS, VEGAS) .....	79
Abbildung 67: Vorbereitung der unterschiedlichen Versuchsstände: R6G1 mit Temperatursensoren und die zwei Permeameter R6P1 und R6P2. ....	79
Abbildung 68: Schema des Aufbaus der Permeameter-Versuche .....	80
Abbildung 69: Vorbereitungsverfahren der R6-Versuchssäule .....	81
Abbildung 70: Anordnung der Sensoren auf der Messebene im Experiment R6G1 .....	82
Abbildung 71: Darstellung der Temperatur- und hydraulische Leitfähigkeitsdaten der R6-Reihe im Rahmen des TP3-Programms. ....	83
Abbildung 72: Modellierte Sondenkonfigurationen .....	85
Abbildung 73: exemplarische Darstellung der gesamten Modellierung mit Beobachtungspunkten anhand von Geometrie G2 .....	86
Abbildung 74: Sensorpositionen und Temperaturen nach 150 Std. R5G2 Modell a. ....	88
Abbildung 75: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-7 bei hoher Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (4,8 MJ/m <sup>3</sup> K. ....	88
Abbildung 76: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-7 bei niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (1,5 MJ/m <sup>3</sup> K) .....	89

---

Abbildung 77: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei hoher Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (4,8 MJ/m <sup>3</sup> K) .....	89
Abbildung 78: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (1,5 MJ/m <sup>3</sup> K) .....	89
Abbildung 79: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-12 bei hoher Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (4,8 MJ/m <sup>3</sup> K) .....	90
Abbildung 80: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-12 bei niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (1,5 MJ/m <sup>3</sup> K) .....	90
Abbildung 81: Sensorpositionen und Temperaturen nach 150 Std, R5G2 Bentonit .....	91
Abbildung 82: Darstellung der Temperaturabweichung zwischen Simulation und Experiment an den Messpunkten bei normaler Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre .....	91
Abbildung 83: Darstellung der Temperaturabweichung zwischen Simulation und Experiment an den Messpunkten bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre .....	92
Abbildung 84: Sensorpositionen der nachfolgenden Einzelbetrachtung .....	92
Abbildung 85: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-5 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK) .....	93
Abbildung 86: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-5 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK) .....	93
Abbildung 87: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK) .....	93
Abbildung 88: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK) .....	94
Abbildung 89: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-11 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK) .....	94
Abbildung 90: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-11 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK) .....	94
Abbildung 91: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-6 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK) .....	95
Abbildung 92: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-6 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK) .....	95
Abbildung 93: Sonden-Geometrie .....	100
Abbildung 94: Zweidimensionales gekoppeltes Modell .....	101
Abbildung 95: Modellgitter und freie konvektive Strömung .....	102
Abbildung 96: 3D Modell .....	102
Abbildung 97: Sensorverteilung in R1G1 .....	103

---

Abbildung 98: R1G1 - Sensor 64-5.....	103
Abbildung 99: R1G1 15-Stunden Abschnitt.....	104
Abbildung 100: R1G1 - 24 Stunden Abschnitt.....	104
Abbildung 101: R1G1 Sensor 64-9.....	105
Abbildung 102: Sensor 64-9 (15-Stunden Abschnitt).....	105
Abbildung 103: Sensor 64-9 (24-Stunden Abschnitt).....	105
Abbildung 104: R1G1 Sensor 64-10.....	106
Abbildung 105: R1G1 Sensor 64-11.....	106
Abbildung 106: R1G1 Sensor 64-12.....	106
Abbildung 107: Sensorverteilung in R5G2.....	107
Abbildung 108: R5G2 Sensor 72-5.....	108
Abbildung 109: R5G2 Sensor 72-6.....	108
Abbildung 110: R5G2 Sensor 65-9.....	109
Abbildung 111: R5G2 Sensor 65-11.....	109
Abbildung 112: R5G2 Sensor 65-11.....	109
Abbildung 113: R5G2 „unendliches“ Modell.....	110
Abbildung 114: R5G2 „unendlich“ Sensor 72-5.....	111
Abbildung 115: R5G2 „unendlich“ 72-6.....	111
Abbildung 116: R5G2 „unendlich“ 65-5.....	111
Abbildung 117: R5G2 „unendlich“ 65-9.....	112
Abbildung 118: R5G2 „unendlich“ 65-10.....	112
Abbildung 119: R5G2 „unendlich“ 65-11.....	112
Abbildung 120: Lage der R5G3 Sensoren.....	113
Abbildung 121: R5G3 Sensor 66-5.....	114
Abbildung 122: R5G3 Sensor 73-7.....	114
Abbildung 123: R5G3 Sensor 73-8.....	114
Abbildung 124: R5G3 66-9.....	115
Abbildung 125: R5G3 66-10.....	115
Abbildung 126: R5G3 Sensor 66-11.....	116
Abbildung 127: R5G3 Sensor 66-12.....	116
Abbildung 128: Permeameterexperiment (R6G1) Sensorverteilung.....	117
Abbildung 129: Permeametersensor 71-1.....	118
Abbildung 130: Permeametersensor 71-2.....	118
Abbildung 131: Permeametersensor 71-3.....	119
Abbildung 132: Permeametersensor 71-4.....	119
Abbildung 133: Permeametersensor 71-5.....	120
Abbildung 134: Permeametersensor 71-6.....	120
Abbildung 135: Permeametersensor 71-7.....	121
Abbildung 136: Permeametersensor 71-8.....	121
Abbildung 137: Vergleich von hydraulischer Leitfähigkeit.....	122
Abbildung 138: Temperatursensoren im Kühlraum.....	124



---

Abbildung 139: Temperatursensoren zur Bestimmung der Randbedingungen an den Experimenten .....	125
Abbildung 140: Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Temperaturdaten (links 3D-COMSOL, rechts 2D FEFLOW) für die Konfiguration R5G2 .....	126
Abbildung 141: Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Temperaturdaten (links 3D-COMSOL, rechts 2D FEFLOW) für die Konfiguration R5G3 .....	127
Abbildung 142: Positionen der Temperatursensoren im Versuchstand für die Geometrien 2 (oben) und 3 (unten) .....	128
Abbildung 143: Einfluss des Betriebs des Kühlraums (70-4) und des Wärmetauschers (Zu und Rücklaufrohre) auf die Temperaturrandbedingung am Rand der Säule (BC). Beispiel aus R5G3-Versuch. ....	128
Abbildung 144: Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Temperaturdaten mit „Infinite Domain“ (links 2D-COMSOL, rechts 2D FEFLOW) für die Konfiguration R5G2 .....	129
Abbildung 145: Vergleich zwischen simulierten Daten des Versuchstands und simulierten Temperaturdaten mit „Infinite Domain“ (links 2D-COMSOL, rechts 2D-FEFLOW) für die Konfiguration R5G2 .....	130
Abbildung 146: Konzept .....	132
Abbildung 147: Numerische Simulation der Kühlpaneele .....	133
Abbildung 148: Kühlpaneele .....	133
Abbildung 149: Zusammenbau der Kühlpaneele .....	134
Abbildung 150: Sensorverteilung .....	134
Abbildung 151: Sensorkugeln und künstliches Erdreich .....	135
Abbildung 152: vollständig installiertes Experiment.....	135
Abbildung 153: Temperaturen der Kühlpaneele.....	136
Abbildung 154: Bodensensoren für poröse Medien (unten) .....	136
Abbildung 155: Gemessene Temperaturen in porösen Medien .....	137
Abbildung 156: Temperatur an den Paneelwänden (unten) .....	137
Abbildung 157: Bodensensoren für poröse Medien (oben).....	138
Abbildung 158: Temperatur an den Paneelwänden (oben).....	138
Abbildung 159: Frostentwicklung an der Außenseite .....	139
Abbildung 160: Temperaturvergleich zwischen oben und unten .....	139
Abbildung 161: 2D-Simulationsmodelle a und c, die zur Ermittlung der Zulauftemperatur herangezogen werden, bei der eine Frostfreiheit gegeben ist. ....	141
Abbildung 162: Darstellung aller Beobachtungspunkte und Positionen der näher untersuchten Beobachtungspunkte (rot umkreist) in Geometrie a .....	142
Abbildung 163: Darstellung der Endtemperaturen ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 162) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauftemperatur für Geometrie a; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK); blaue Linie = -0,5 °C-Grenze.....	143
Abbildung 164: Darstellung der Endtemperatur ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 162) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauftemperatur für Geometrie a; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 2,0 W/(mK); blaue Linie = -0,5 °C-Grenze.....	144
Abbildung 165: Position der im Detail betrachteten Beobachtungspunkte in Geometrie c .....	145

---

Abbildung 166: Darstellung der Endtemperatur ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 165) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauftemperatur für Geometrie c, Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK); blaue Linie = -0,5 °C-Grenze.....	145
Abbildung 167: Darstellung der Endtemperatur ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 165) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauftemperatur für Geometrie c, Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 2,0 W/(mK); blaue Linie = -0,5 °C-Grenze.....	146
Abbildung 168: Validierungsergebnisse für eine 10-tägige Gefrierentwicklung unter Einfluss einer Grundwasserströmung .....	150
Abbildung 169: Rohrkonfiguration .....	151
Abbildung 170: Modellgeometrie (mit Grundwasserströmung).....	151
Abbildung 171: Zulauftemperatur der Erdwärmesonde [°C] .....	152
Abbildung 172: Geringste Temperatur, die im gesamten Bodenmodell zur jeweiligen Stunde gemessen wurde (Model 1).....	153
Abbildung 173: Temperaturverteilung bei Zeitindex 62 Stunden (20m) .....	154
Abbildung 174: Temperaturverteilung bei Zeitindex 3557 Stunden (20m) .....	154
Abbildung 175: Temperaturverteilung bei Zeitindex 3557 Stunden (50m) .....	155
Abbildung 176: Temperaturverteilung bei Zeitindex 3557 Stunden (80m) .....	155
Abbildung 177: Temperatur im Verfüllmaterial in verschiedenen Tiefen .....	156
Abbildung 178: Geringste Temperatur, die im gesamten Bodenmodell zur jeweiligen Stunde gemessen wurde (model 2) .....	157
Abbildung 179: Temperaturverteilung in 20 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden.....	157
Abbildung 180: Temperaturverteilung in 50 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden.....	158
Abbildung 181: Temperaturverteilung in 80 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden.....	158
Abbildung 182: Temperatur im Verfüllmaterial in verschiedenen Tiefen bei Zeitindex 3557 Stunden.....	159
Abbildung 183: Temperaturverteilung in 20 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden.....	160
Abbildung 184: Temperaturverteilung in 50 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden.....	161
Abbildung 185: Temperaturverteilung in 80 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden.....	161
Abbildung 186: Temperatur im Verfüllmaterial bei Zeitindex 3557 Stunden.....	162
Abbildung 187: freistehende Sand-Epoxid-Geologie .....	165
Abbildung 188: Aufbau des Versuchs. Links: Eine Klemmschelle [a] positioniert den Versuchsaufbau in der Forschungsbohrung. Die Außenrohre werden aufgeschraubt und mit einem Schrumpfschlauch [b] abgedichtet. Rechts: zentriertes Innenrohr [c] und Quelltonpellets im Ringspalt [d]. .....	165
Abbildung 189: Einbaupositionen der Sensoren in einem horizontalen Querschnitt (links) und die Einbautiefen in einem vertikal Querschnitt (rechts). Darstellungen nicht maßstäblich. ....	166
Abbildung 190: Einbau der Pt100 Referenzsensoren am Außenrohr und Platzhalterrohr für die Sensorkette im Ringspalt (rot markiert links) und Platzhalter und Sensorkabel im verfüllten Ringspalt (rechts).....	167
Abbildung 191: Sensorkette DS 18B20 (links) und Pt100 Sensor von THM mit Schutzrohr und Teflonabdichtung (rechts). .....	167
Abbildung 192: Skizze zum experimentellen Aufbau des Großversuchs, horizontaler Querschnitt (links unten) & vertikaler Querschnitt (rechts). Im horizontalen Querschnitt sind die	

---

Positionen der Messketten und Referenzsensoren skizziert, im vertikalen Querschnitt die Schichten des Probenaufbaus. Außerdem sind alle wichtigen Komponenten eingezeichnet. ...	169
Abbildung 193: Vor- und Rücklauftemperaturen am Sondenkopf .....	171
Abbildung 194: Darstellung der gemessenen Umwelteinflüsse. ....	171
Abbildung 195: Temperaturprofile im Wasserbad nach 4 und 14 Stunden Versuchslaufzeit (links) und linearisiert nach 14 Stunden (rechts) .....	172
Abbildung 196: T Temperaturverlauf an den Vor und Rücklaufsensoren A.R, A.V, B.V und B.R .....	173
Abbildung 197: Tiefeabhängige Temperaturprofile nach 4 und 40 h Versuchslaufzeit.....	173
Abbildung 198: Modellnetz .....	175
Abbildung 199: Sensorpositionen .....	176
Abbildung 200: Sensor PCP (Tiefe: 15,83 m) .....	176
Abbildung 201: Sensor PDG (Tiefe 1,33 m) .....	176
Abbildung 202: Sensor PAV (Tiefe 30,17 m).....	177
Abbildung 203: Sensor PDV (Tiefe 1,33 m) .....	177

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektzeitplanung: Vergleich Soll – Ist (gelbe Zellen = ist) .....	7
Tabelle 2: Eigenschaften der untersuchten Verfüllbaustoffe (Herstellerangaben1 bzw. Messung2). .....	10
Tabelle 3: Eigenschaften des untersuchten Quarzsandes (Herstellerangaben) und berechnete Porosität der damit hergestellten Proben. Die Wärmeleitfähigkeit eines gesättigten Quarzsandes ist der VDI Richtlinie 4640 Blatt 1 [11] entnommen. ....	11
Tabelle 4: Eigenschaften (Innendurchmesser, Höhe, Dicke, Farbe) und Anwendungsbereich der unterschiedlichen Probengefäße .....	12
Tabelle 5: Überblick der Eigenschaften der verwendeten Temperatursensoren u.a. Grenzabweichung und entsprechende Gültigkeitsbereiche aus DIN EN 60584-1:2014-07 1 [12] und DIN EN 60751:2009-05 2 [13]. .....	13
Tabelle 6: Zusammenfassung der Parameter in den unterschiedlichen Vorversuche (VV). Alle Proben aus EWM Plus wurden laut Vorgabe des Herstellers (W/Z = 0,33) erstellt. ....	14
Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Versuche .....	25
Tabelle 8: Zeitverlauf eines Temperaturzyklus (TZ) d.h. Abkühlung und Aufwärmung in den unterschiedlichen Temperaturprogrammen .....	25
Tabelle 9: Materialparameter .....	45
Tabelle 10: Eigenschaften der 2D-Discrete-Feature-Elemente (DFE) zur Temperaturübertragung in den Sondenrohren .....	45
Tabelle 11: Temperaturen in °C an ausgewählten Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei $\lambda_{\text{Hinterfüllung}} = 0,8 \text{ W/(mK)}$ (vergl. rote Punkte in Abbildung 39) .....	49
Tabelle 12: Temperaturen in °C an ausgewählten Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei $\lambda_{\text{Hinterfüllung}} = 3,0 \text{ W/(mK)}$ (vergl. rote Punkte in Abbildung 39) .....	50
Tabelle 13: Eingabeparameter für Stoffwerte der Parameterstudie (* „ $\lambda$ Ersatz-PE-Rohr“ Abhängigkeit von Re-Zahl und bestimmt durch Nußelt-Korrelation nach VDI Wärmeatlas [36]) .....	51
Tabelle 14: Untersuchungsmatrix mit allen simulierten Varianten .....	52
Tabelle 15: Minimale Temperaturen an Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei Geometrie a .....	52
Tabelle 16: Minimale Temperaturen an Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei Geometrie b .....	53
Tabelle 17: Minimale Temperaturen an Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei Geometrie c .....	54
Tabelle 18: Überblick der in Rahmen der AP4 durchgeführten mittelskaligen Experimente .....	58
Tabelle 19: Temperaturprogramme R1 .....	62
Tabelle 20: Überblick der unterschiedlichen Experimente mit den unterschiedlichen Konfigurationen .....	62
Tabelle 21: Parameter in der Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit .....	80
Tabelle 22: Betrachtete Versuchsvarianten .....	86
Tabelle 23: Grundlegende Materialeigenschaften der durchgeführten Simulationen .....	86
Tabelle 24: Versuchsspezifische Materialeigenschaften .....	86
Tabelle 25: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung .....	87
Tabelle 26: Materialparameter .....	100
Tabelle 27: Bentonit Parameter .....	107

---

Tabelle 28: Minimale Zulufttemperaturen an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 162) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Geometrie a; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK) .....	143
Tabelle 29: Minimale Zulufttemperaturen an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 162) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Geometrie a; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 2,0 W/(mK) .....	144
Tabelle 30: Minimale Zulufttemperaturen in Geometrie c an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 165) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Geometrie c; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK) .....	145
Tabelle 31: Minimale Zulufttemperaturen in Geometrie c an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abb. 17) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 2,0 W/(mK) .....	146
Tabelle 32: Dauer des täglichen Wärmepumpenbetriebs ohne Unterbrechung bei unterschiedlichen Jahresvolllaststunden; Auszug aus VDI 4640 Blatt 2 Tabelle 6 [39] .....	147
Tabelle 33: Darstellung der Zulufttemperatur bei Erreichen des Frostkriteriums (-0,5 °C) am Ende des Betrachtungszeitraums für die Sondengeometrie a; (*Ein Dauerbetrieb von 24 h pro Tag entspricht dem Dauerlastszenario aus AP 6); Beobachtungspunkte siehe Grafiken in AP 6. ....	148
Tabelle 34: Darstellung der Zulufttemperatur bei Erreichen des Frostkriteriums (-0,5 °C) am Ende des Betrachtungszeitraums für die Sondengeometrie c; (*Ein Dauerbetrieb von 24 h pro Tag entspricht dem Dauerlastszenario aus AP 6); Beobachtungspunkte siehe Grafiken in AP 6. ....	148
Tabelle 35: Materialparameter .....	151
Tabelle 36: Eigenschaften des Quarzsandes und in AP1 berechnete Porosität der damit hergestellten Proben; Eigenschaften des Quelltons wie in AP 5 angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit eines gesättigten Quarzsandes ist der VDI Richtlinie 4640 Blatt 1 [11] entnommen. ....	164
Tabelle 37: Eigenschaften (Innendurchmesser, Höhe, Dicke, Farbe) und Anwendungsbereich der Probenrohre .....	165
Tabelle 38: Eigenschaften des Verfüllbaustoffs (1 Herstellerangaben) .....	166
Tabelle 39: Übersicht über die Positionen und eingebauten Sensoren .....	167
Tabelle 40: Überblick der Eigenschaften der verwendeten Temperatursensoren u.a. Grenzabweichung und entsprechende Gültigkeitsbereiche nach Herstellerangaben [42] und in Anlehnung an DIN EN 60751:2009-05 [13]. ....	168
Tabelle 41: Betriebsparameter des geplanten Versuchs .....	170

---

## Kurzfassung

Die Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur von Erdwärmesonden unter der Prämisse einer Frostvermeidung im Verfüllmaterial und im Untergrund sowie einer ausreichend geringen Systemdurchlässigkeit im Verfüllmaterial und in den Kontaktzonen zwischen Verfüllmaterial und Bohrlochwandung bzw. Sodenrohren erfordert die eingehende Untersuchung von unterschiedlichen geometrischen sowie material- und betriebsbedingten Randbedingungen einer Erdwärmesonde.

Hierzu wurde ein zweistufiger Aufbau von Laborexperimenten gewählt, der - jeweils ergänzt durch numerische Simulationen - das Verhalten von Erdwärmesondenverfüllbaustoffen unter Temperaturdehnungen und Frost-Tauwechseln beschreib- und berechenbar macht. Die physikalischen Prozesse des Frost-Tauwechsels wurden hierbei durch die Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff erfasst. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen wurden Berechnungen unter Variation der geotechnischen und hydrogeologischen Randbedingungen durchgeführt, um abschließende Aussagen zur minimalen Zulauftemperatur zu erhalten, unter denen im Sinne eines intakten Baugrunds/Verfüllungssystems ein sicherer Betrieb einer Erdwärmesonde möglich ist. Das Forschungsvorhaben wurde in enger Kooperation dreier Institute durchgeführt:

Im TP1 (VEGAS), „Experimentelle Untersuchungen zur temperaturabhängigen Systemdurchlässigkeit“, wurden in zwei Arbeitspakete die experimentellen Parameter für die Baustoffe (kleinskaliges Experiment) und für das Gesamtsystem (mittelskaliges Experiment) ermittelt.

Im TP2 (Solites), „Numerische Ermittlung der minimal zulässigen EWS-Zulauftemperatur zur Frostvermeidung“, wurden numerische Simulationsmodelle in FEFLOW erarbeitet, anhand von Messdaten evaluiert und für die Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur und für die Untersuchung von Lastszenarien angewendet. Zudem wurde ein Großversuch im Realmaßstab durchgeführt.

Im TP3 (IGS), „Multiphysiksimulationen zur Beschreibung der Erdwärmesonde-Verfüllbaustoff-Boden-Interaktion bei niedrigen Betriebstemperaturen“, wurde in COMSOL ein mechanisch-hydraulisch-thermisches Modell erarbeitet und anhand von Messdaten validiert. Das Modell wird in den Arbeitspaketen zur Übertragung der experimentellen Ergebnisse auf das Feld verwendet.

---

## Summary

Stability requirements for borehole heat exchangers include frost avoidance in the backfill material and in the subsoil, as well as a sufficiently low system permeability in the backfill material and in the contact zones between backfill material and borehole wall or heat pipes. The determination of the minimum permissible inflow temperature of geothermal probes requires the detailed investigation of different geometrical as well as material and operational boundary conditions of a geothermal probe.

For this purpose, a two-stage structure of laboratory experiments was chosen, which - supplemented by numerical simulations - makes the behavior of geothermal probe filling construction materials under temperature expansion and freeze-thaw cycles describable and calculable. The physical processes of the freeze-thaw cycle were recorded by developing a modeling approach to take into account the phase change in the backfill material. With the knowledge gained in this way, calculations were carried out with variation of the geotechnical and hydrogeological boundary conditions in order to obtain conclusive statements about the minimum inlet temperature, under which a safe operation of a geothermal probe is possible in the sense of an intact subsoil / backfill system. The research project was carried out in close cooperation between three institutes:

In TP1 (VEGAS), "Experimental investigations on temperature-dependent system permeability", the experimental parameters for the building materials (small-scale experiment) and for the overall system (medium-scale experiment) were determined in two work packages.

In TP2 (Solites), "Numerical determination of the minimum permissible EWS inlet temperature to avoid frost", numerical simulation models were developed in FEFLOW, evaluated on the basis of measured data and used to determine the minimum permissible inlet temperature and to investigate load scenarios. In addition, a large-scale experiment was carried out

In TP3 (IGS), "Multiphysics simulations for describing the geothermal probe-backfill material-soil interaction at low operating temperatures", a mechanical-hydraulic-thermal model was developed in COMSOL and validated on the basis of measurement data. The model is used in the work packages to transfer the experimental results to the field.

## 1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Erdwärmesonden können, bei unsachgemäßem Einbau und Betrieb, zu Kurzschlüssen zwischen Grundwasserleitern sowie zu unkontrolliertem Wasserzutritt und damit zum Schwellen von Anhydridschichten und damit zu mittel- und langfristigen Schäden führen. Um diese Schäden auszuschließen wurden vom Land Baden-Württemberg die Leitlinien „Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ [1] entwickelt. Im Rahmen dieser Maßnahmen wurde die Minimalzulauf-temperatur von EWS auf minus 3 °C festgelegt. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde diese 3 °C-Grenze wissenschaftlich untersucht und bewertet.

Ergebnisse der kleinskaligen Experimente (Kapitel 9.1):

- Die Frostbildung findet in der Übergangszone (ITZ) (Gefäß – Verfüllbaustoff) statt. Diese Frostbildung führt jedoch (bei den hier angelegten Temperaturen) noch nicht zur Durchfrostung der gesamten Probe. Die Nukleationstemperatur ist direkt von der ITZ und weiteren mikroskopischen Faktoren abhängig und ist nicht reproduzierbar.

Ergebnisse AP2 (Kapitel 9.2):

- Es wurde ein MultiPhysics-Modell für die Simulation der kleinskaligen Versuche aus AP 1 entwickelt. Dieses numerische Modell erwies sich im Abgleich mit den Versuchsergebnissen als geeignet, die Wärmeübertragung zwischen dem Verfüllmaterial und der umgebenden Kühlflüssigkeit abzubilden. Ferner wurde ein Modellierungsansatz zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff entwickelt, der es ermöglichte die Gefrier- und Tauprozesse physikalisch zutreffend abzubilden. Lediglich die in den Versuchen beobachtete, zufällige Auftreten der Nukleation, deren Prozesse noch der physikalischen Klärung bedürften, konnten noch nicht genau simuliert werden; hier ist weitere Grundlagenforschung zu diesem Phänomen erforderlich.

Ergebnisse AP3 (Kapitel 9.3 und 9.4):

- Zur Identifikation kritischer Sondenkonfigurationen hinsichtlich der minimal auftretenden Temperaturen in der Hinterfüllung und im Untergrund wurden in einer Simulationsstudie zahlreiche Parameter variiert (u.a. Sondenrohrpositionen, Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds/der Verfüllmaterialien, Temperaturspreizung der Erdwärmesonde etc.). Zunächst wurde ein Vergleich von 2D- und 3D-Modellen durchgeführt und nachgewiesen, dass sich 2D-Modelle für diese Parameterstudie eignen.
- Als Worst-Case-Szenario in der Hinterfüllung wurde die Kombination folgender Parameter ermittelt:
  - o hoher Volumenstrom in den Sonden
  - o geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund
  - o geringe Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
  - o geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf
  - o hohe räumliche Entfernung von warmen und kalten Sondenrohren
- Als Worst-Case-Szenario an der Bohrlochwand und im angrenzenden Untergrund wurde die Kombination folgender Parameter ermittelt:
  - o hoher Volumenstrom in den Sonden



- geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund
- hohe Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
- geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf
- hohe räumliche Entfernung zwischen warmen und kalten Sondenrohren
- Sonden liegen nah am Bohrlochrand

Ergebnisse der mittelskaligen Experimente in AP4 (Kapitel 9.5):

- Die Nukleationsphänomene treten nur in unmittelbarer Nähe der kälteren Zulaufrohre auf, da hier die die niedrigsten Temperaturen und in der Übergangszone zwischen PE-Rohr und Verfüllbaustoff die günstigsten thermodynamischen Bedingungen herrschen.
- Der Temperaturbereich, in dem eine Nukleation stattfindet, ändert sich in Abhängigkeit des Verfüllbaustoffs und der ITZ.
- Bei sorgfältig hergestelltem Verfüllmaterial dringt die Gefrierzone nicht in die poröse Struktur des Verfüllmaterials ein, sondern bleibt auf die ITZ beschränkt.
- Extern gefertigte EWS-Kerne sind mechanisch schwächer, da beim Aushärten in einem PVC-Rohr zwei ITZs entstehen, d.h. zwei Übergangszonen mit kritischer Porosität, einer internen zwischen HDPE-Rohren und Verfüllmaterial und einer externen zwischen dem Schalungsrohr aus PVC und dem Verfüllmaterial. Die äußere ITZ zeigte nach Versuchsende die größten Schäden. (Surface Scaling).
- Für die in der Anwendung der oberflächennahen Geothermie erreichten Temperaturen (hier ist der Worst Case dargestellt: Zulauftemperatur:  $-3\text{ °C}$ ; Rücklauftemperatur:  $0\text{ °C}$ ) waren die praxisnah gebauten EWS-Abschnitte nukleationsbeständig, eine „Durchfrostung“ (also eine Eisbildung) bliebe auf die ITZ beschränkt. Im Feldfall wird der passive Erddruck die Stabilität einer sachgemäß hergestellten EWS weiter verbessern.

Ergebnisse AP5 (Kapitel 9.6, 9.7 und 9.9)

- Im AP5a wurden die mittelskaligen Frostexperimente des AP4 mit numerischen 2D-Modellen nachgebildet und die thermischen Verhältnisse betrachtet. Dabei wurde eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen erreicht. Abweichungen wurden auf die Versuchsrandbedingungen und Variabilitäten in den verwendeten Versuchsmaterialien zurückgeführt. Die besten Ergebnisse wurden mit einer reduzierten Wärmeleitfähigkeit des PE-Sondenrohrmaterials erzielt.
- Im AP5b wurde das Multiphysics-Modell für eine gekoppelte thermisch-mechanisch-hydraulische Modellierung (THM-Simulation) erweitert. Mit diesem gekoppelten Simulationsmodell konnten die mittelskaligen Frost-Experimente des AP4 in guter Übereinstimmung numerisch simuliert werden. Es wurden einige geringfügige Unterschiede zwischen Modell- und Versuchsergebnissen festgestellt, die jedoch auf Versuchsrandbedingungen und die Variabilität des Bodens in den Versuchen zurückgeführt werden können.
- Im AP5c wurden eigene physikalische Modellversuche zur experimentellen Untersuchung der Temperaturverteilung in einem durchströmten porösen Medium während einer starken Abkühlungsphase durchgeführt; dabei galt es auch, orientiert an einer Erdwärmesonde Wärmeübergangsprozesse zwischen einer gefrierenden Oberfläche und dem porösen, durchströmten Versuchsboden zu untersuchen.  
Es wurde festgestellt, dass in den simulierten porösen Medien selbst bei einem relativ hohen Grundwasserdurchfluss von  $1,3\text{ m/d}$  ein Phasenwechsel auftrat, was zeigt, dass

es andere Faktoren gibt, die zur Bildung von Eislinsen in realen porösen Medien beitragen, wie Porosität und Porendruck, die gesondert untersucht werden müssen.

#### Ergebnisse AP6 (Kapitel 9.10):

- Die Simulationen des AP6 betrachteten Worst-Case-Szenarien für das Auftreten von Frostbedingungen im Bohrloch nach einem Dauerbetrieb der EWS über 8 Wochen mit ungünstigen Sondenkonfigurationen. Die Temperatur für eine Frostgefahr wurde hier auf Basis der kleinskaligen Experimente des AP1 bestimmt, in dem allerdings keine reproduzierbare Frosttemperatur ermittelt werden konnte. Dennoch wurde folgendes festgestellt:
- Liegt eine ungünstige Sondengeometrie vor, entspricht die Temperatur an der Kontaktlinie der beiden kalten Zulaufrohre ohne signifikante Abweichung der Zulaufemperatur des Wärmeträgerfluides.
- Die Zulaufemperatur des Wärmeträgers kann deutlich reduziert werden, wenn sich die Sondenrohre zentriert im Bohrloch befinden und die Baustofftemperatur nahe der Bohrlochwand als Grenzkriterium betrachtet wird.
- Die Zulaufemperatur des Wärmeträgers kann reduziert werden ohne eine Frostgefahr zu erzeugen, wenn von den in AP3 ermittelten ungünstigen Parameterkombinationen abgewichen wird.

#### Ergebnisse AP7 (Kapitel 9.11 und 9.12):

- Im AP7a wurden statt des 8-wöchigen Dauerbetriebs aus AP6 verschiedene Taktungen der Wärmepumpe betrachtet:
  - o Für das Nahfeld um die kalten Sondenrohre herum wirkt sich die Taktung der Wärmepumpe bzw. die Dauer des täglichen Wärmepumpenbetriebs kaum auf die im Hinterfüllmaterial auftretenden Minimaltemperaturen aus.
  - o Für weiter von den Sondenrohren entfernte Bereiche führt der Taktbetrieb zu höheren Temperaturen im Vergleich zum Dauerbetrieb, der in AP6 simuliert wurde. Der Einfluss der Sondengeometrie ist bei einem Taktbetrieb somit groß. Bei im Bohrloch zentrierten Sondenrohren kann die Zulaufemperatur weiter reduziert werden, wenn die Baustofftemperatur nahe der Bohrlochwand als Grenzkriterium betrachtet wird.
- Im AP7b wurden drei verschiedene Erdwärmesondenmodelle mit realistischen Szenarien und Betriebszeiten vorgestellt, das erste Modell mit einem Grundwasserfluss von 0,1 m/d, das zweite mit einer Grundwasserströmung von 1 m/d und das letzte ohne Grundwasserströmung. Die Ergebnisse aller Modelle zeigen, dass in den die Erdwärmesonden umgebenden Bodenschichten kein Gefrieren auftritt, obwohl die Temperatur im Verfüllmaterial in allen Modellen unter die Gefrieretemperatur sinkt. Jedoch waren die Modelle aufgrund der Unterkühlungs- und Nukleationseffekte (zuvor in AP2 diskutiert) nicht in der Lage, den Phasenwechsel im Verfüllmaterial zuverlässig vorherzusagen.

#### Ergebnisse AP8 (Kapitel 9.13 und 9.14):

- Im AP8a wurde eine 30 m lange, mit zahlreichen Temperatursensoren ausgestattete EWS im Realversuch nachgebildet und mit einer konstanten Zulaufemperatur von -3 °C betrieben, bis sich quasistatische Temperaturbedingungen eingestellt hatten. Die experimentellen Ergebnisse werden in AP8b mit einem numerischen Modell verglichen.

- Im AP8b das IGS hat ein numerisches Modell entwickelt, um das von Solites in AP8a durchgeführte Experiment realitätsnah zu simulieren. Allerdings konnten im Rahmen des AP8a bei weitem nicht alle geplanten Temperaturmesswerte gewonnen werden, so dass ein weitergehender Abgleich zwischen Simulation und dem realen Verhalten nicht möglich war. Außerdem ist zu beachten, dass die Lage der Sondenrohre im Querschnitt über die Tiefe variiert so dass es auch aus diesem Grund zu Abweichungen zwischen Simulation und Messung kommen kann.

## 2 Motivation und Hintergrund des Vorhabens

Beim Betrieb von Erdwärmesonden (EWS) können Frost-Tau-Wechsel zu einer nachteiligen Veränderung der Ringraumverfüllung der EWS und des umliegenden porösen Mediums (Boden, Fels) führen. Dabei sind insbesondere folgende Vorgänge zu berücksichtigen:

- Während des Normalbetriebs können temperaturinduzierte Dehnungen und Schrumpfungen zu Spaltbildung an der Bohrlochwandung und zu Ringspaltbildung um die Erdwärmesonden und damit zu ungewollten Wegsamkeiten für Wasser führen. Es ist derzeit nicht bekannt, welche Temperaturspreizungen zu Spaltbildung führen.
- Wasser dehnt sich beim Gefrieren um 9 Vol.-% aus. Dies liegt weit über der Bruchdehnung eines (wassergesättigten) EWS-Verfüllbaustoffs. Frost-Tau-Wechsel können zu einer deutlichen Erhöhung der Systemdurchlässigkeit [2] [3] von Erdwärmesonden führen.
- Für im Bohrloch exzentrisch liegende Sondenrohre kann es bereits beim ersten Frost-Tau-Zyklus zu Frosteinwirkungen auf den umgebenden Baugrund und, insbesondere bei bindigen Böden, zu einer nachteiligen Veränderung der Bodenstruktur kommen.

Um einer potentiellen Frostbildung in einer EWS vorzubeugen, wird in Baden-Württemberg in den „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ [1] die minimale Zulauftemperatur in die EWS auf minus 3 °C begrenzt. Diese Minimaltemperatur, festgelegt basierend auf Erfahrungswerten, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde - EWS-Frost“ (L75 14 011) [4] in Großversuchen im Nachgang zu der Festlegung experimentell untersucht (Finanzierung aus Mitteln des Landes Baden-Württemberg durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft).

Die Ergebnisse der Großversuche aus dem Forschungsvorhaben EWS-Frost zeigen, dass unter Verwendung der „Minus 3°C“-Regel bei gewissen Betriebszuständen der EWS eine Frostgefährdung vorliegt. Für eine fundierte Bewertung der „Minus 3 °C“ Regel waren daher weiterführende Untersuchungen erforderlich.

### 3 Aufgabenstellung

Untersuchungen von unterschiedlichen geometrischen sowie material- und betriebsbedingten Randbedingungen einer Erdwärmesonde sind für die Ermittlung der minimal zulässigen EWS-Zulauftemperatur, für welche eine ausreichend geringe Systemdurchlässigkeit gewährleistet ist, notwendig. Dabei ergeben sich aus der Überlagerung unterschiedlicher Parameter verschiedenste Szenarien. Eine experimentelle Untersuchung aller möglichen Szenarien und Parameterkombinationen ist weder ökonomisch noch in einem annehmbaren zeitlichen Rahmen durchführbar, weshalb im Forschungsvorhaben mittels numerischer Simulationen die Grenzen klein- und mittelskaliger Laborexperimente überwunden und allgemeingültigen Aussagen zu minimalen Zulauftemperaturen getroffen werden sollten.

In drei Teilprojekten

- TP 1: Experimentelle Untersuchungen zur temperaturabhängigen Systemdurchlässigkeit (VEGAS);
- TP 2: Numerische Ermittlung der minimal zulässigen EWS-Zulauftemperatur zur Frostvermeidung (Solites);
- TP 3: Multiphysiksimulationen zur Beschreibung der Erdwärmesonde-Verfüllbaustoff-Boden-Interaktion bei niedrigen Betriebstemperaturen (IGS).

sollte in Laborexperimenten - jeweils ergänzt durch numerische Simulationen - das Verhalten von EWS-Verfüllbaustoffen unter Temperaturdehnungen und Frost-Tauwechselln beschreib- und berechenbar gemacht werden. Die physikalischen Prozesse des Frost-Tauwechsels sollten hierbei durch die Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff erfasst werden. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen waren im Anschluss Berechnungen unter Variation der geotechnischen und hydrogeologischen Randbedingungen durchzuführen, um abschließende Aussagen zur minimalen Zulauftemperatur zu erhalten, unter denen im Sinne eines intakten Baugrunds/Verfüllungssystems ein sicherer Betrieb einer Erdwärmesonde möglich ist.

### 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Frosteinwirkungen und dabei vor allem der erste Frost-Tau-Zyklus können zu einer nachteiligen Veränderung der Struktur der Ringraumverfüllung und in der Folge zu einer deutlichen Erhöhung der Systemdurchlässigkeit von verfüllten Erdwärmesonden führen. Wasser dehnt sich beim Gefrieren um 9 Vol.-% aus. Dies liegt weit über der Bruchdehnung eines Erdwärmesondenverfüllbaustoffs. Ein wassergesättigter Verfüllbaustoff müsste folglich bereits beim ersten Gefrieren zerstört sein. Untersuchungen [5] an 500 Prüfkörpern unterschiedlicher Verfüllbaustoffe haben jedoch gezeigt, dass eine Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit und damit eine strukturelle Veränderung des Materials nach ca. 3 – 5 Frosttauwechselln zu beobachten ist. Aus dem Fachgebiet der Betontechnologie ist bekannt, dass „... erst nach vielen Frost-Tauwechselln eine Schädigung einsetzt und zwar auch dann, wenn sie zuvor durch kapillares Saugen wassergesättigt worden sind.“ [6]. Verschiedene Forschungsprojekte (u.a. [7], [3], [8]), haben sich bereits mit der Auswirkung von Frosteinwirkung auf Verfüllmaterialien und

der Systemdurchlässigkeit von Erdwärmesonden beschäftigt, wobei die detailliertesten Untersuchungen von Reuß et al [2] durchgeführt wurden.

Die Auswirkungen des Betriebs einer Erdwärmesonde im Frostbereich auf die Durchlässigkeit des umgebenden Untergrunds wurden bisher lediglich für zentrierte Sondenrohre untersucht. Liegen die Sondenrohre exzentrisch im Bohrloch, wie oft in der Praxis anzutreffen, kann es auch bereits bei dem ersten Frost-Tau-Zyklus zu Frosteinwirkungen auf den umgebenden Baugrund und hier insbesondere bei bindigen Böden zu einer nachteiligen Veränderung der Bodenstruktur kommen, die in der Folge auch zu veränderten hydraulischen Eigenschaften führen kann.

Das Gefrieren einer Erdwärmesonde erfolgt stets im Verfüllbaustoff am Sondenrohr beginnend von innen nach außen. Hierbei führt die entzogene Wärmeleistung zunächst zu einer Reduktion der Temperatur des Trägerfluids, im Anschluss daran zu einer Reduktion der Temperatur in der Rohrwandung und erst danach zu einer Reduktion der Temperatur im Verfüllbaustoff und letztendlich zu einem Phasenwechsel im Bereich der Verfüllung. Während des Phasenübergangs bleibt die Temperatur im Verfüllbaustoff zunächst konstant, bis der Phasenwechsel abgeschlossen ist. Die Ausbreitung der Frostfront ist also zeitabhängig.

In Baden-Württemberg wird in den Leitlinien „Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ des Landes Baden-Württemberg [1] die minimale Zulauftemperatur der EWS auf minus 3°C limitiert. Diese Minimaltemperatur wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde - EWS-Frost“ (L75 14 011) in Großversuchen experimentell untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass es dabei unter gewissen Randbedingungen zur Durchfrostung kommen kann.

## **5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Vorhabens wurden im Verbundvorhaben QEWS II [9] Erkenntnisse zum Filtrationsverhalten von Verfüllbaustoffen und deren Relevanz in Bezug auf die Eigenschaften der Bohrlochverfüllung bekannt. Diese wurden bei der Erstellung des Realmaßstabsversuchs in AP 8 berücksichtigt.

Weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur von Erdwärmesonden, bei deren Einhaltung eine Frostbildung ausgeschlossen werden kann, sind nicht bekannt.



## **7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Bei der Erstellung des Realmaßstabsversuchs in AP 8 fand eine enge Zusammenarbeit mit André Voutta – Grundwasserhydraulik statt. Dies geschah in Form von fachlicher Beratung zur Temperaturmesstechnik sowie der Bereitstellung von geeignetem Aufzeichnungs- und Auswertungs-equipment.

Am KIT wurden vom Institut für angewandte Geowissenschaften (Ingenieur-geologie) von Dr. Hagen Steger Parameterbestimmungen zur Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Materialien durchgeführt.

## **8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers**

Erdwärmesonden können einen signifikanten Beitrag zur Energiewende liefern. Im Gegensatz zu manch anderen regenerativen Energiequellen sind sie weitestgehend unabhängig von tages- oder jahreszeitlichen Klimaganglinien (Temperatur, Albedo, Wind, ...). Dies macht sie insbesondere zur Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden ökonomisch und ökologisch einsetzbar. Ein vermehrter Einsatz von Erdwärmesonden in Verbindung mit effizienten Wärmepumpen auf der Gebäudeseite führen zu signifikanten Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emission gegenüber konventionell beheizten oder gekühlten Gebäuden.

Erdwärmesonden können jedoch, bei unsachgemäßem Einbau und Betrieb, zu Kurzschlüssen zwischen Grundwasserleitern, zu unkontrolliertem Wasserzutritt und damit zum Schwellen von Anhydridschichten und damit zu mittel- und langfristigen Schäden führen.

Um diese Schäden auszuschließen wurden vom Land Baden-Württemberg die Leitlinien „Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ [1] entwickelt. Im Rahmen dieser Maßnahmen wurde die Minimalzulauf-temperatur von EWS auf minus 3 °C festgelegt. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde diese 3 °C-Grenze wissenschaftlich untersucht und bewertet.

## 9 Ergebnisse

### 9.1 AP 1: Kleinskalige Experimente zur Bestimmung der Gefriertemperatur und des Frostzeitpunktes verschiedener Materialien (L75 18008)

#### 9.1.1 Skalen und Versuchstypen

Das Ziel des AP 1 war die Entwicklung und Durchführung kleinskaliger Untersuchungen für die Ermittlung von Eingangsparametern für die numerische Modellierung. Insbesondere sollten Gefriertemperatur und Gefrierzeitpunkt in Abhängigkeit von der Kühltemperatur für verschiedene Verfüllbaustoffe und Untergrundmaterialien ermittelt werden.

Dazu wurden Proben aus Verfüllbaustoffen hergestellt und mit Temperatursensoren ausgestattet. Nach Erreichen der Endfestigkeit (mindestens 28 Tage für zementartige Proben) wurden diese in einem Wasser-Glykol-Bad von außen nach innen abgekühlt. Die Gefriertemperatur sowie der Gefrierzeitpunkt wurden als Funktion der Kühltemperatur ermittelt. Nach Ausbau der Materialien wurden diese visuell auf Schäden kontrolliert. Die Ergebnisse flossen als Eingangswerte in das AP 2 ein.

In Rahmen des Forschungsprojekts wurden die Experimente auf verschiedenen Skalen durchgeführt. Der große Vorteil kleinskaliger Versuche sind die vereinfachten Randbedingungen, die es ermöglichen, die Faktoren zu ermitteln, die den Gefrierprozess eines Verfüllmaterials am stärksten beeinflussen. Außerdem wird es möglich das Verhalten unterschiedlicher Verfüllmaterialien mit unterschiedlichen Eigenschaften während des Gefrierens und Auftauens zu bestimmen und eine charakteristische Gefriertemperatur zu ermitteln. So bestimmen insbesondere die Hydratationsbedingungen (Aushärtungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wassergehalt der Proben) die beobachteten Frostprozesse. Weiterhin erlauben kleinskalige Versuche auch den Vergleich der Eignung verschiedener Arten von Temperatursensoren für die Aufzeichnung von Gefrier- und Tauvorgängen.

Eine Übertragung der Ergebnisse auf größere Skalen erfordert jedoch große Sorgfalt und ist z.T. nicht direkt möglich. So wird z.B. das Gefriereschehen in kleinskaligen Verfüllbaustoffproben häufig erst bei Temperaturen des Wasser-Glykol-Bads unter  $-3^{\circ}\text{C}$  (bis  $-5^{\circ}\text{C}$ ) beobachtet. Diese Befunde werden durch die Keimbildungstheorie (CNT, Classic Nucleation Theory) erklärt. Randbedingungen in großskaligen Experimenten, Abkühlung radial von innen nach außen, d.h. von der Wärmeträgerflüssigkeit in den EWS-PE-Rohren zum umgebenden porösen Material, das Vorhandensein einer kontinuierlichen Grenzfläche zwischen PE-Rohr und Verfüllbaustoff, die mechanische Energie durch die Vibration der Rohre sowie die Grundwasserströmung sorgen für eine thermodynamische Instabilität und senken die für den Phasenwechsel benötigte Energiebarriere [10].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Experimente in kleinem Maßstab effektiv sind, um die charakteristische Gefriertemperatur unterschiedlicher Materialien zu bestimmen. Sie können zwar nicht direkt verwendet werden, um die Eiskeimbildung in einem Erdwärmesystem vorherzusagen, stellen jedoch einen wichtigen Baustein zur Formulierung der Theorie über die Gefriermechanismen in einer EWS dar.

Im AP 1 wurden zwei Klassen von Versuchen durchgeführt. In der Anfangsphase wurden Vorversuche an Einzelproben von einem Verfüllbaustoff und einem Quarzsand durchgeführt.



Diese einfachen Versuche erlaubten die Identifikation sensibler Parameter bei Probenvorbereitung und experimenteller Durchführung sowie die Untersuchung derer Auswirkungen auf den Gefrierprozess. Basierend darauf wurden in der Hauptphase reproduzierbare Versuche mit unterschiedlichen zementartigen Verfüllbaustoffen und einem Quarzsand durchgeführt. Die Daten wurden mit Hilfe einer parallel durchgeführten Literaturstudie ausgewertet, interpretiert und den Partnern imAP 2 zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurde eine Theorie über den Gefriermechanismus in geothermischen Verfüllbaustoffen formuliert und deren Bedeutung für die nächsten Arbeitspakete diskutiert.

### 9.1.2 Materialien und Messtechnik

In AP 1 wurden vier unterschiedliche Verfüllbaustoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften, sowie zwei Sande untersucht:

- VM1: Standardbaustoff, d.h. nicht thermisch verbessert (Zeotherm 1.0, Hersteller: Hauri Mineralstoffwerke),
- VM2: thermisch verbessert mit anderen Zuschlagstoffen, hier Graphit (ThermoCem PLUS, Hersteller: Heidelberg Cement),
- VM3: thermisch verbessert mit Quarzsand (EWM, Hersteller: Schwenk),
- VM3d: wie VM3, zusätzlich dotiert mit Magnetit (EWM PLUS, Hersteller: Schwenk),
- QS8: Dorsilit Nr. 8,
- QS9: Dorsilit Nr. 9.

Die Eigenschaften der zementgebundenen Baustoffe sind in Tabelle 2 aufgeführt, die des Sandes in Tabelle 3. Probenvolumen und damit effektive Porosität wurden mittels Tauchwägung und Trocknung bestimmt.

Tabelle 2: Eigenschaften der untersuchten Verfüllbaustoffe (Herstellerangaben<sup>1</sup> bzw. Messung<sup>2</sup>).

ID	W/Z Wert <sup>1</sup> [-]	Suspensionsdichte <sup>1</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]	Hydr. Durchlässigkeit <sup>1</sup> [m/s]	Druckfestigkeit (28d) <sup>1</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit <sup>1</sup> [W/(m*K)]	thermisch verbessert <sup>1</sup>	Ton <sup>1</sup>	effektive Porosität <sup>2</sup> [-]
VM1	0,8	1,57	$\leq 9 \cdot 10^{-12}$	6	1,2	-	-	0,59-0,61
VM2	0,8	1,46-1,48	$< 1 \cdot 10^{-10}$	6	2	Graphit	++	0,59-0,61
VM3	0,3	1,94	$< 5 \cdot 10^{-11}$	12	$\geq 2$	Quarzsand	+	0,33-0,34
VM3d	0,3	1,94	$< 5 \cdot 10^{-11}$	12	$\geq 2$	Quarzsand	+	n.a.

Tabelle 3: Eigenschaften des untersuchten Quarzsandes (Herstellerangaben) und berechnete Porosität der damit hergestellten Proben. Die Wärmeleitfähigkeit eines gesättigten Quarzsandes ist der VDI Richtlinie 4640 Blatt 1 [11] entnommen.

ID	Korngröße [mm]	Schüttdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Sättigungsgrad [-]	Kornroh-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Hydr. Durchlässigkeit [m/s]	Porosität [-]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
QS8	0,3-0,8	1,4-1,5	≈1	2,65	≈1*10 <sup>-5</sup>	0,40-0,43	2,6
QS9	0,1-0,5	1,57	≈1	2,65	≈1*10 <sup>-5</sup>	0,40-0,43	2,6

Der Verfüllbaustoff entsteht nach Aushärtung einer Zement-Wassersuspension, wobei das Mischungsverhältnis von Zement und Wasser vom Hersteller angegeben ist (W/Z Tabelle 2). Auf Grund der kleinen benötigten Mengen wurde die Verfüllbaustoffsuspension mittels eines elektrischen Rührers vorbereitet (Abbildung 1, links). Abbildung 1, rechts zeigt eine Kolloidmaschine aus der Feldanwendung, die beim Aufbau der Säulen in AP 4 verwendet wurde.



Abbildung 1: Vorbereitung VM2 mittels des kleinen elektrischen Rührer (links) und GERTEC IS-38-E Kolloidmischer (rechts)

Nach Befüllung wurden die Probengefäße, teilweise mit Temperatursensoren ausgestattet, für mindestens 28 Tage (vor Verdunstung geschützt) im Kühlraum (8±2 °C) oder im Labor (18-20 °C) gelagert. In den Vorversuchen wurden unterschiedliche Aushärtungstemperaturen und deren Einfluss auf die beobachteten Gefrierprozesse untersucht. Die Hauptversuche wurden dann i.d.R. mit der praxisnahen Aushärtungstemperatur von 10±2 °C durchgeführt.

Gesättigte Sandproben (Abbildung 2) wurden durch Verrieselung von Sand in mit Wasser gefüllte Probennahmegefäße mit anschließender Versiegelung durch Silikon hergestellt.



Abbildung 2: Vorbereitung der gesättigten Quarzsandprobe (links), gefertigte Probe mit Silikon versiegelt (Mitte), Öffnung der Probe nach den Versuchen (rechts).

Da es sich nicht um standardisierte Tests handelt, wurden unterschiedliche Probengefäße (Material, Größe) verwendet, um zu prüfen, ob dies einen Einfluss auf die beobachteten Phänomene hat. In Tabelle 4 sind die verwendeten Gefäße und deren Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 4: Eigenschaften (Innendurchmesser, Höhe, Dicke, Farbe) und Anwendungsbereich der unterschiedlichen Probengefäße

ID	Material	Eigenschaften					Anwendung		
		$\Phi_i$ [cm]	$H_i$ [cm]	Wandstärke [cm]	Farbe	$\lambda$ [W/(m*k)]	Vorversuche	Hauptversuche	Einbau Pt100
G1	PE (Polyethylen)	5	8	0,5	schwarz	0,37-0,42	ja	nein	Gewinde
G2	PMMA (Plexiglas)	5	8	0,5	transparent	0,19	ja	nein	Gewinde
G3	PP (Polypropylen)	5	10	0,1	transparent	0,23	ja	ja	Silikon
G4	PC (Polycarbonat)	6	10,5	0,1	transparent	0,20	nein	ja	Silikon

Alle in Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Experimente erforderten eine kontrollierte Abkühlung (unter null Grad) und Aufwärmung, die mit Hilfe von hochpräzisen Thermostaten (Th) des Herstellers "Huber Kältemaschinenbau AG, Deutschland" gewährleistet wurde. Je nach Größe und Eigenschaften der Experimente (AP 1 / AP 4) wurden unterschiedliche Geräte verwendet. Für die kleinskaligen AP 1-Untersuchungen wurde der kleine, aber leistungsfähige Thermostat Ministat 125 (Th0) eingesetzt (Abbildung 3, links). Die Badöffnung (Abbildung 3, Mitte) des mit einer Wasser-Glykol-Mischung betriebenen Thermostats ermöglicht die Temperierung von Objekten direkt in dem Thermostatbad (Einzelversuche). Darüber hinaus wurde der Thermostat auch zur Temperaturregelung eines mit Wasser und Glykol gefüllten 80-Liter-Behälters eingesetzt (Abbildung 3, rechts), in dem mehrere kleinskalige Materialproben gleichzeitig temperiert werden konnten. Mit Hilfe der Software "Spy Control" (Huber Kältemaschinenbau AG, Deutschland) wurden unterschiedliche Temperaturprogramme erstellt und vom Thermostat ausgeführt.



Abbildung 3: Thermostat Ministat 125 links, Thermostatbad in der Mitte, Setup des Thermostats für externe Laboranwendungen (rechts).

In allen Materialien und Medien wurde die Temperatur mit Hilfe von Pt100-Sensoren, Platin-Widerstandsthermometern (PRTs, Platinum Resistance Thermometer) mit 4-Leiter-Anschluss kontinuierlich gemessen (Hersteller: TITEC Temperaturmesstechnik GmbH).

Um eine hohe Zuverlässigkeit der Messungen zu gewährleisten wurden Temperatursensoren mittels Zweipunkt-Kalibrierung (bei  $-3\text{ °C}$  und  $11\text{ °C}$ ) in einem großen Thermostatbad (Unichiller 020,T) unter Verwendung eines zertifizierten Referenzthermometers (Messgenauigkeit  $\pm 0,05\text{K}$ , Electronic Temperatur Instruments Ltd, 5-Punkt-Kalibrierung) kalibriert.

In einigen Proben wurden zu Vergleichszwecken drei zusätzliche Thermoelement-Sensoren (TC) installiert: ein Thermoelement vom Typ T (Kupfer/Konstantan) und zwei vom Typ K (Nickel-Chrom/Nickel-Alumel). Im Gegensatz zum Pt100-Sensor, mit einer zylindrischen Metallschutzhülse mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Länge von 50 mm, hatten die Thermoelemente unterschiedliche, kleinere Abmessungen. Abbildung 4 zeigt die verwendeten Sensoren, deren Eigenschaften sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

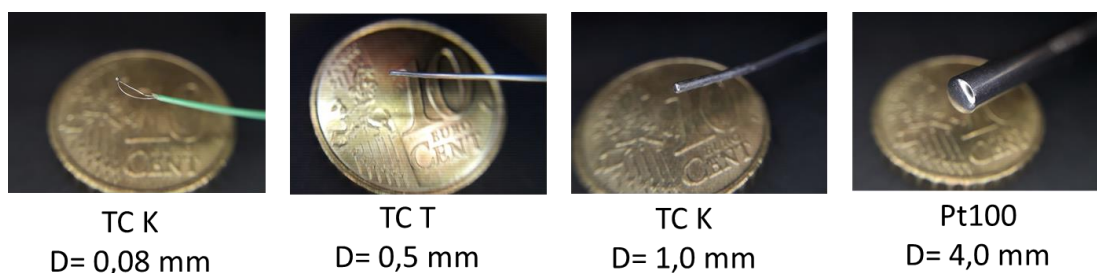


Abbildung 4: Abmessungen aller verwendeten Temperatursensoren.

Zur Erfassung der Temperaturwerte der Pt100 wurden Geräte und Software der Firma Hermes Messtechnik, Stuttgart, eingesetzt. Bei Experimenten, bei denen Thermoelemente gemeinsam mit Pt100 verwendet wurden, erfolgte die Erfassung aller Sensoren mittels eines RedLab-Messmoduls (Meilhaus Electronic).

Tabelle 5: Überblick der Eigenschaften der verwendeten Temperatursensoren u.a. Grenzabweichung und entsprechende Gültigkeitsbereiche aus DIN EN 60584-1:2014-07<sup>1</sup> [12] und DIN EN 60751:2009-05<sup>2</sup> [13].

Typ	Messprinzip	Durchmesser [mm]	Klasse	Gültigkeitsbereich [°C]	Grenzabweichung [°C]
K - Paarung: NiCr-Ni	Thermoelement (ohne Schutzhülse)	0,08 mm	1	-40 bis 333 <sub>1</sub>	± 1,5 <sup>1</sup>
T - Paarung: Cu - CuNi	Thermoelement	0,5 mm	1	-40 bis 133 <sub>1</sub>	± 0,5 <sup>1</sup>
K - Paarung: NiCr-Ni	Thermoelement	1 mm	1	-40 bis 333 <sub>1</sub>	± 1,5 <sup>1</sup>
Pt100 (Platinum)	Widerstandselement	4 mm	AA	-50 bis 250 <sub>2</sub>	±(0,1 + 0,0017 T ) <sup>2</sup>

### 9.1.3 Vorversuche

Vorversuche (Tabelle 6) wurden mit den Materialproben VM3d (hydratisiert, Tabelle 2) und QS8 (Quarzsand, locker, Tabelle 3) durchgeführt. Die Proben wurden vollständig im Wasser-Glykol-Bad (20 %v Glykol) des Thermostats Th0 (Ministat 125) eingetaucht (Abbildung 5) und das Bad bis auf -5 °C temperiert (bei höheren Temperaturen wurde keine Eisbildung beobachtet). Die Probe wurden somit von außen nach innen abgekühlt. Folgende Einflüsse auf den Frost-Tau-Prozess in den Materialien waren zu untersuchen:

- Einfluss der Porosität und des Grades der Porenkonnektivität der zu testenden Materialien.
- Einfluss des Probengefäßes (G1, G2, G3 (Tabelle 4) auf den Frost-Tau-Prozess im porösen Medium. Die Proben wurden i.d.R. im Gefäß in den Thermostatbad gestellt (Abbildung 5, Abbildung 6), da die unterschiedliche Eigenschaften der Gefäßmaterialien wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Steifigkeit, Zugfestigkeit und Bruchdehnung die Messergebnisse beeinflussen könnten. Zusätzlich wurden bei einigen Experimenten das Gefäß entfernt und die Probe in einer transparenten Plastikfolie in das Bad gestellt.
- Einfluss der Temperaturrandbedingungen während der Aushärtung der Betonproben (Labor, 18-20 °C bzw. Kühlraum, 8±2 °C).
- Einfluss der Geschwindigkeit des Frost-Tau-Prozesses auf die Messergebnisse (Spalte TP (Temperaturprogramm), Tabelle 6).
- Einfluss von mehreren folgenden Frost-Tau-Wechseln.
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die Sättigung der Betonkörper (vom Hersteller empfohlenes Initialwasser nach Hydratation und Verdunstung) konnte nicht genau bestimmt werden. Allerdings wurde die Gewichtsabnahme (nur aufgrund des Wasserverlusts möglich) in den ersten 28 Tagen (während Hydratation) gemessen.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Parameter in den unterschiedlichen Vorversuche (VV). Alle Proben aus EWM Plus wurden laut Vorgabe des Herstellers (W/Z = 0,33) erstellt.

ID	Probe	Material	Aushärtung	Alter	Gefäß	TP	Anzahl
VV 1		QS8	-	-	G1	RTZ <sup>1)</sup>	1
VV 2		QS8	-	-	G2	RTZ	1
VV 3		VM3d	18-20 °C	34 Tage	G3	RTZ	1
VV 4		VM3d	18-20 °C	35 Tage	G3	RTZ	1
VV 5		VM3d	18-20 °C	37 Tage	G3	RTZ	1
VV 6		VM3d	18-20 °C	39 Tage	kein	variiert <sup>2)</sup>	5
VV 7		VM3d	6-8 °C	45 Tage	G3	RTZ	4
VV 8		VM3d	6-8 °C	52 Tage	G3	RTZ	3
VV 9		VM3d	18-20 °C	62 Tage	G3	RTZ	6
VV 10		VM3d	18-20 °C	77 Tage	G3	RTZ	1
VV 11		VM3d	6-8 °C	82 Tage	kein	RTZ	6
VV 12		VM3d	6-8 °C	112 Tage	G3	variiert	6
VV 13		dist. Wasser	-	-	G3	variiert	

<sup>1)</sup> Referenztemperaturzyklus (RTZ): Einstellung stationärer Initialtemperatur 1 °C (ca. 2 h), Abkühlung auf -5 °C (Abkühlungsrate 1 °C/h), konstante Temperatur für 6 Stunden auf -5 °C, Wiedererwärmung auf 1 °C (Erwärmungsrate 1 °C/h).

<sup>2)</sup> Variation der Abkühl- bzw. Aufwärmungsrate

Bei allen Vorversuchen wurden die Proben vollständig im Thermostatbad versenkt (Abbildung 5, Abbildung 6), weshalb die Konvektion im Bad beim Wärmetransport berücksichtigt werden musste. Weiterhin stand die Probe auf dem Boden des Thermostatbads (Wärmeleitung). Beide Bedingungen stellten eine Herausforderung für die numerische Modellierung dar.

Die Proben waren mittig mit einem Pt100 zur kontinuierlichen Temperaturmessung ausgestattet. Zwei weitere Pt100 („Bad-1“, „Bad-2“) waren im Thermostatbad an unterschiedlichen Stellen auf gleicher Höhe wie der Pt100 in der Probe zur Kontrolle der Randbedingungen platziert. Aufgrund der geringen Größe der Materialproben und des Konvektionseffekts im Bad war die Zeitverzögerung zwischen Temperaturgang im Bad und im Probenkörper sehr gering.

Die Temperatur im Bad ist nicht konstant. In der Nähe des Wärmetauschers ist sie ca. 0,3K kälter als die im Temperaturprogramm eingestellt und steigt konduktiv und konvektiv im Raum an. Somit ist die vom Sensor Bad-1 gemessene Temperatur immer geringfügig niedriger als die in Bad-2 gemessene, was im numerischen Modell schwierig darstellbar ist.

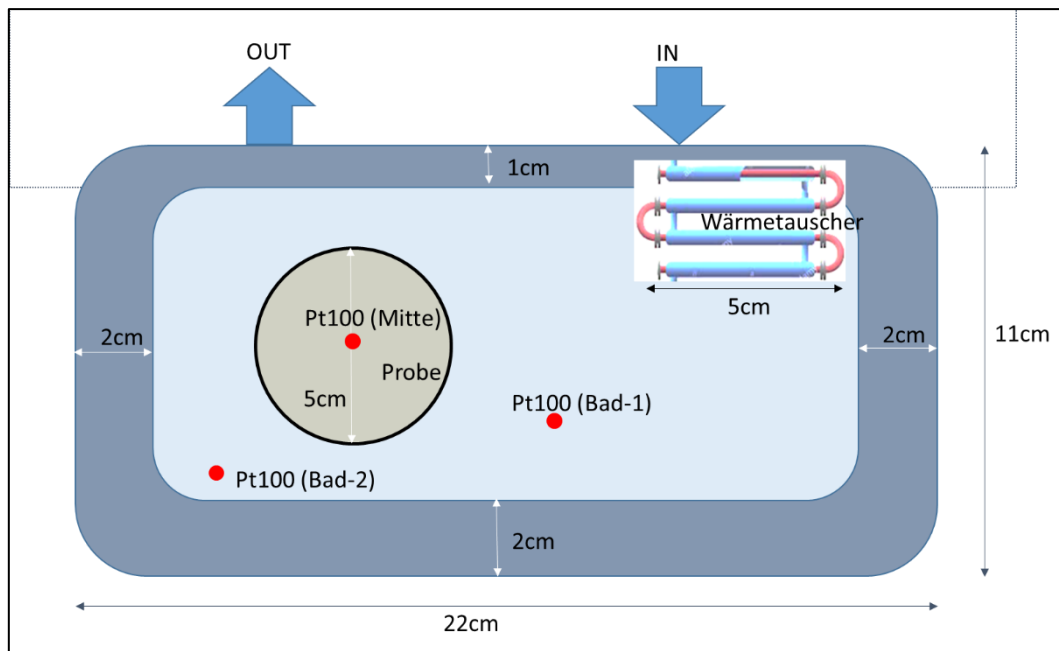


Abbildung 5: Draufsicht des Thermostatbads, Platzierung von Wärmetauscher, Probe und Sensoren.

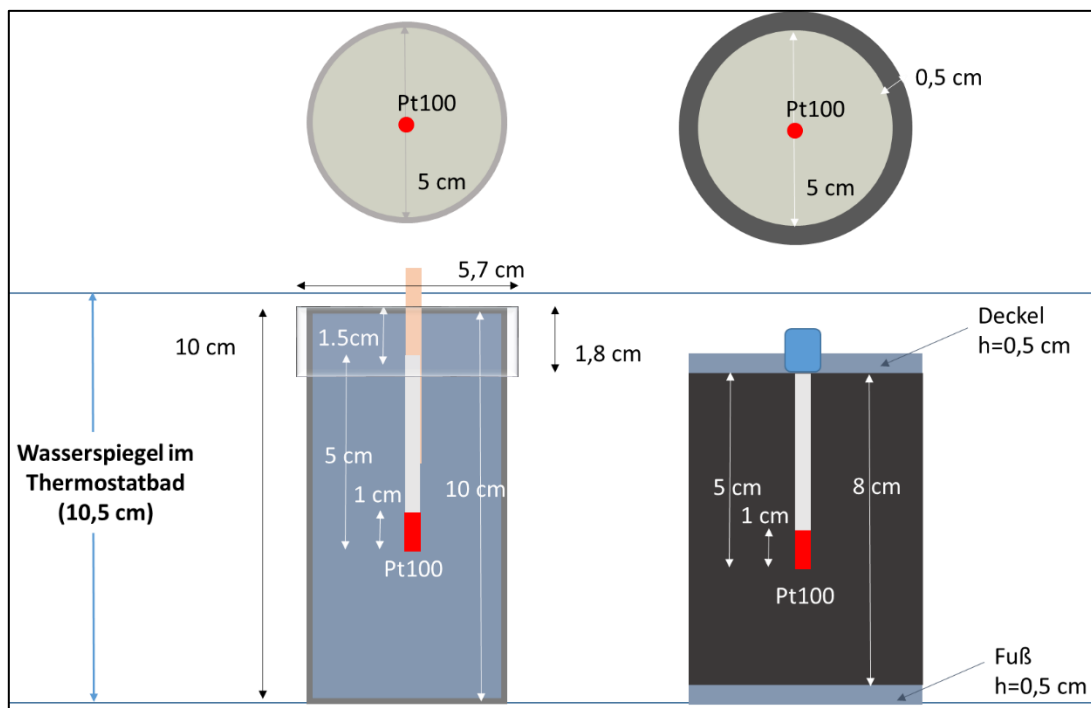


Abbildung 6: Schnitt durch Proben im Thermostatbad (unten) und Querschnitt Proben (G3 links, G1 rechts) in unterschiedlichen Gefäßen (oben)

Abbildung 7 zeigt die Temperaturverläufe in VV1 und VV2. Die Proben sind im Aufbau identisch, lediglich die Materialien der Probengefäße sind, bei gleicher Wandstärke, unterschiedlich: VV1, PE, Wärmeleitfähigkeit  $0,37 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; VV2, PMMA Wärmeleitfähigkeit  $0,19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Bei VV2 (PMMA-Probengefäß, Abbildung 7, rechts) ist eine deutliche Zeitverzögerung des Temperaturübergangs in die Probe zu erkennen. In beiden Versuchen ist der „Super Cooling“ Effekt in der Probe zu beobachten. Der gesättigte Sand wird unter die Gefrieretemperatur von Wasser ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) gekühlt, wobei das Porenwasser noch flüssig bleibt. Bei einer Temperatur von

ca.  $-1\text{ °C}$  (Nukleationstemperatur) beginnt bei beiden Experimenten die Nukleation (Bildung des ersten Eiskristalls), die gemessene Temperatur steigt auf  $0\text{ °C}$  und das Kapillarporenwasser wandelt sich zu Eis [14]. Die Proben temperatur bleibt konstant bis das ganze Porenwasser zu Eis umgewandelt ist. Die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Probengefäße haben keinen Einfluss auf die Nukleationstemperatur. Dies liegt daran, dass QS8 ein sehr gut durchlässiger Sand ist, in dem sich das Wasser in (großen) miteinander verbundenen Poren (Netz) befindet. Nachdem bei der Nukleation die vorhandene Energiebarriere überwunden wird [14] kann sich die Durchfrostung ungehindert durch das Porennetz ausbreiten. Die unterschiedliche Dauer des Gefrierprozesses (Plateaulänge) könnte auf einen leicht unterschiedlichen Wassergehalt der Proben (durch leicht unterschiedliche Packungsdichte) hinweisen.

In beiden Versuche wurde RTZ verwendet, allerdings trat ein Fehler bei VV1 (links) ein und die Temperatur blieb konstant bei  $-5\text{ °C}$ , sodass kein Tauprozess beobachtbar ist.

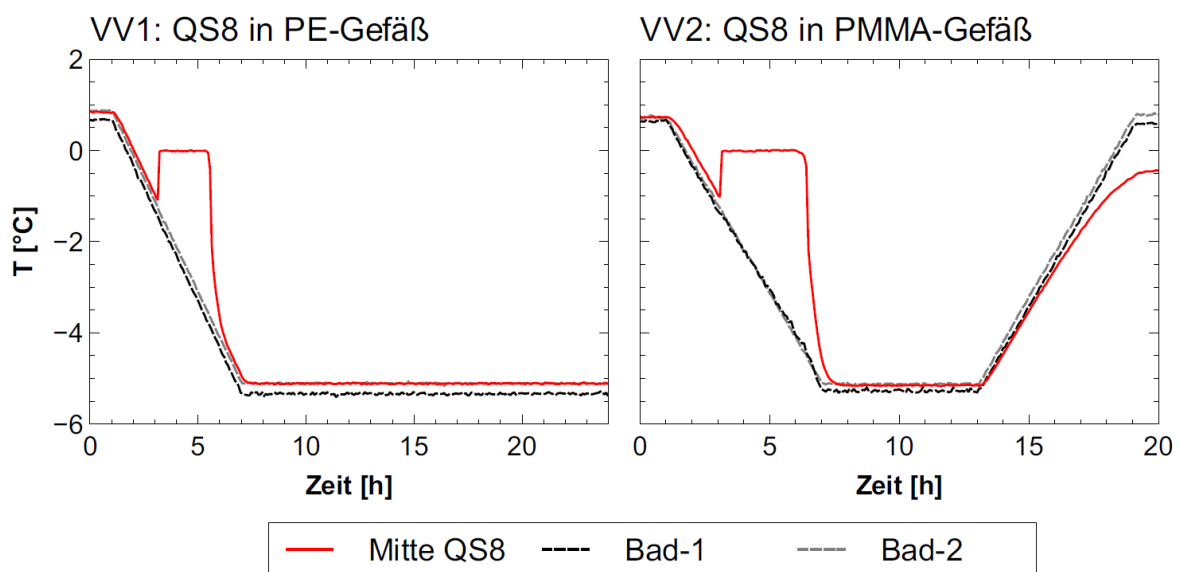


Abbildung 7: Vorversuche mit Quarzsand.: VV1 in PE-Gefäß (G1) links und VV2 in PMMA-Gefäß (G2) rechts

Abbildung 8 zeigt einen Vergleich zwischen der ersten Nukleation in QS8 (VV2) bzw. in VM3d (VV3) unter den gleichen Temperaturrandbedingungen. Die Verfüllbaustoffprobe in VV3 wurde im Labor bei  $18\text{--}20\text{ °C}$  ausgehärtet und war zu Beginn des Versuchs 34 Tage alt. Im Unterschied zum Sand (VV) zeigt der zementgebundene Verfüllbaustoff während des ersten Gefrierprozesses eine steile Temperaturspitze (Peak) mit einer Amplitude von ca.  $4\text{ K}$ . Diese könnte wiederum auf „Supercooling“ und „Nukleation“ hinweisen. Nachdem der Peak aber kein Plateau hat, könnte er auch auf eine Druckerhöhung zwischen Sensor und Probenmaterial während des Gefrierprozesses zurückzuführen sein. Eine Betrachtung des anschließenden Tauprozesses bestätigt jedoch, dass ein Gefrierprozess eintritt.



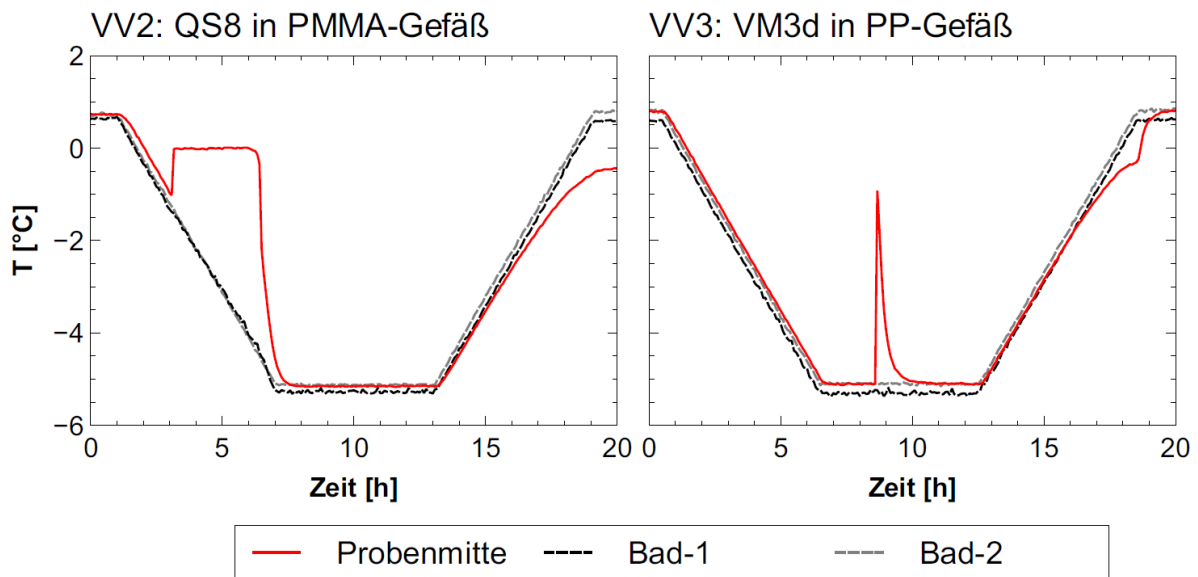


Abbildung 8: Erste Nukleation In QS8 (VV2) links und im VM3d (VV3) rechts.

Darüber hinaus können Umfang und Zeitpunkt des Peaks bei gleichen Versuchstemperaturrandbedingungen und bei derselben Probe variieren. Abbildung 9 zeigt die Temperaturentwicklung in der gleichen Probe unter dem gleichen Temperaturprogramm bei unterschiedlichen Vorversuchen. Zu Beginn von VV4 war die Probe 35 Tage alt. Zwei Tage später wurde der VV5 gestartet. Zwischen dem Ende von VV4 und dem Beginn von VV5 wurde die Probe für etwa 24 Stunden im Labor (18-20 °C) gelagert. Die Probe wurde auch ursprünglich im Labor ausgehärtet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich der Wassergehalt zwischen den beiden Proben nicht verändert hat. Die Gründe für diese Unterschiede können auf mikroskopischer Ebene durch die klassische Nukleationstheorie erklärt werden [10].

Das Fehlen eines Plateaus ist ein Hinweis darauf, dass das für den Phasenwechsel verfügbare Porenwasser unter diesen thermodynamischen Bedingungen für eine Plateaubildung nicht ausreichend ist.

Der Verfüllbaustoff VM3d hat eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit, was bedeutet, dass die wasserhaltigen Poren klein und/oder schlecht miteinander verbunden sind. Daher kann man davon ausgehen, dass das Gefrieren dort stattfindet, wo die Poren größer sind, zum Beispiel an der Oberfläche zwischen Verfüllbaustoff und Gefäß oder zwischen Verfüllbaustoff und dem Pt100-Sensor. Selbst im ersten Fall würde die bei der Nukleation freigesetzte Wärme aufgrund der geringen Probengröße und ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit ( $2\text{W}/(\text{Km})$ ) durch den in der Probemitte platzierten Pt100-Sensor deutlich gemessen.

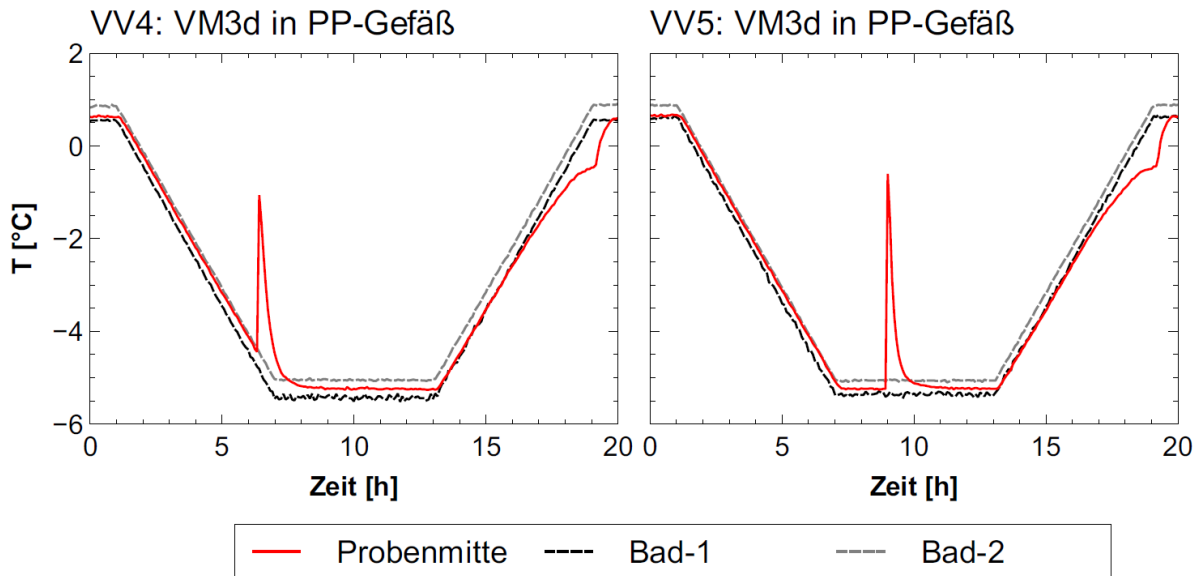


Abbildung 9: VV4 links, VV5 rechts.

In VV9 wurde eine Verfüllbaustoffsprobemehreren aufeinanderfolgenden identischen Abkühl- und Aufwärmungszyklen unterzogen. Abbildung 10 zeigt die Temperaturentwicklung in der Probe. Während der Tauprozess vergleichbar ist, sind Zeitpunkt und Eintrittstemperatur der Peaks bei jedem Zyklus unterschiedlich. Bei aufeinanderfolgenden Gefrier-Tau-Zyklen können auf mikroskopischer Ebene thermodynamische Bedingungen entstehen, die eine Nukleation begünstigen, wie z. B. das Vorhandensein von Eiskeimen aufgrund unvollständigen Auftauens. In diesem Fall wird die für den Phasenwechsel erforderliche Energiebarriere gesenkt, die Unterkühlung verringert und die Nukleation kann bei höheren Temperaturen erfolgen.

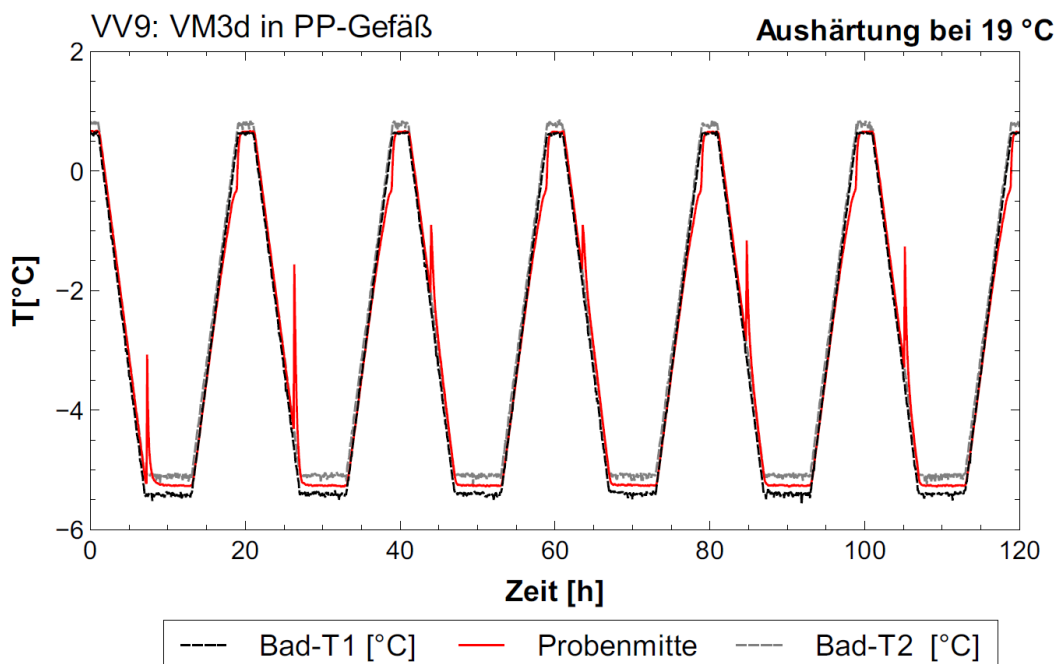


Abbildung 10: Umfang und Zeitpunkt der Peaks in VV9 bei mehreren Frost-Tau-Zyklen

Eine weitere interessante Beobachtung betrifft die unterschiedlichen Formen des Peaks während der Gefrierphase, je nach Alter der Probe und ob die Probe im Labor (18-20 °C) oder im Kühlraum (6-8 °C) ausgehärtet wurde. Abbildung 11 zeigt die Gefrier-Taukurven verschiedener Verfüllbaustoffproben, die demselben Abkühlungs- und Aufwärmungszyklus unterzogen wurden: Oben VV7, Kühlraum (6-8 °C), 45 Tage; Mitte VV8, Kühlraum (6-8 °C), 52 Tage), unten VV9, Labor (18-20 °C), 62 Tage

Der Peak ist bei den im Labor gehärteten Zementproben immer steil ausgeprägt, während er bei den Proben aus dem Kühlraum zuerst steil und stark und danach runder und weniger ausgeprägt ist. In Abbildung 11, rechts, sind die erste Nukleation, das erste Tauen und die zweite Nukleation vergrößert dargestellt. Insbesondere am Tauprozess (Differenz zwischen Proben- und Badtemperatur bei VV7 viel größer als bei VV8/VV9) ist zu erkennen, dass die im Kühlraum hydratisierte Probe (VV7) mehr Porenwasser enthält als die im Labor hydratisierten (VV9). Dies ist darin begründet, dass in Proben, die bei höheren Temperaturen ausgehärtet werden, der Hydratationsprozess früher endet. Bei niedrigeren Temperaturen hydratisieren die Proben wesentlich langsamer, so dass diese bei gleichem Alter mehr Porenwasser enthalten, das gefrieren kann.

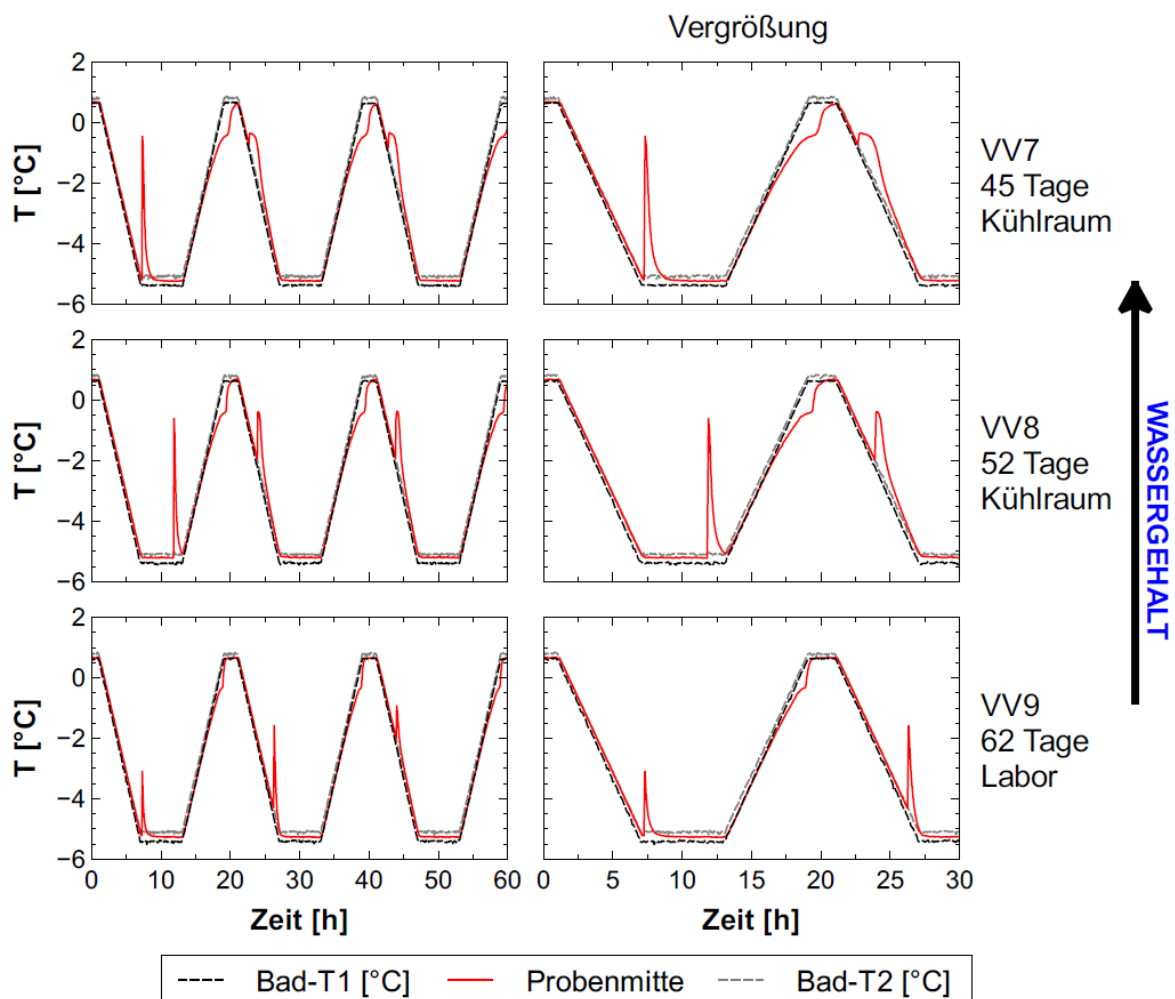


Abbildung 11: Vergleich zwischen den Gefrier- und Tauprozessen in VV7 (oben), VV8 (Mitte), VV9 (unten). Rechts Vergrößerung auf die ersten 30 Stunden.

Bei den Versuchen VV6 und VV1 wurden die Probengefäße nach Aushärten entfernt und die Proben für die Gefrierversuche in eine transparente Folie verpackt (Abbildung 12). Die Aushärtung der VV6-Probe erfolgte im Labor (18-20 °C), bei Versuchsbeginn war sie 36 Tage alt. Die VV11-Probe wurde 82 Tage im Kühlraum (6-8 °C) hydratisiert und gelagert.

Nach dem Versuch waren beide Proben zerstört (Abbildung 12 rechts), während alle anderen Proben, die die Gefrierzyklen im Probengefäß durchliefen, bei Versuchsende keine Beschädigungen aufwiesen. Die Frostschäden könnten in einer höheren Sättigung der äußeren Probenschicht und damit mit dem von Setzer postulierten „Mikroislinsenpumpe“-Mechanismus [15] [16] erklärt werden. Diese Sättigungsanreicherung könnte an Leckagen der Plastikummantelung liegen, wobei eine mögliche Wassersättigung der Probe bei Kontakt mit einer Glykol-Wasser-Lösung mit einer Gefriertemperatur von etwa -8 °C nicht untersucht werden konnten. Eine weitere Erklärung der Sättigungszunahme könnte die Kondensation von Feuchtigkeit im Bad direkt in der Folie sein. In beiden Fällen könnte sich zusätzlich das Fehlen des Gefäßes und somit einer äußeren Stütze negativ auf die Probe ausgewirkt haben.

Im VV6 erfolgt das dritte Aufwärmungssegment langsamer (0.5 K/h statt 1K/h) und die dritte Gefrierphase wurde ohne Übergang eingestellt. Dies bewirkt wahrscheinlich ein vollständiges Auftauen, so dass die anschließende Nukleation wieder bei niedrigeren Temperaturen erfolgt.

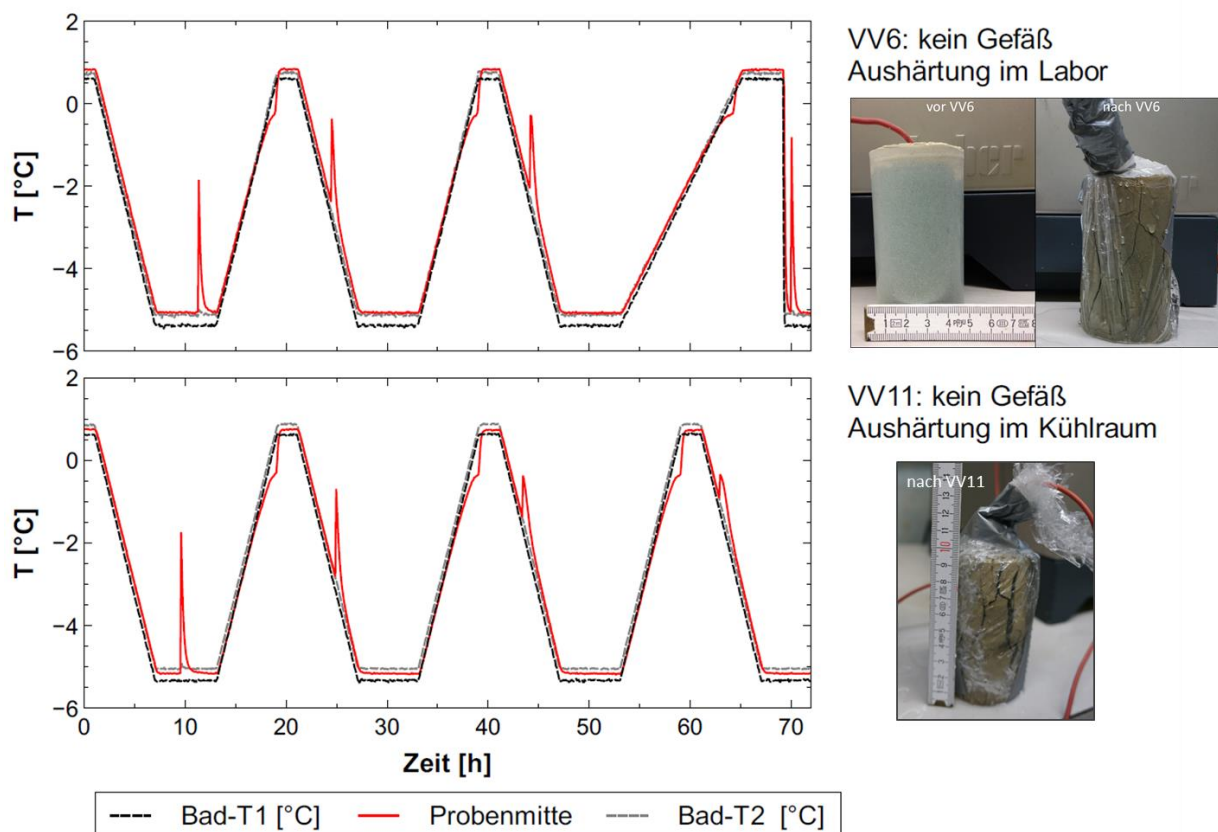


Abbildung 12: Umfang und Zeitpunkt der Peaks in VV6 (oben) und VV11 (unten) bei mehreren Frost-Tau-Zyklen

Abbildung 13 zeigt Vergrößerungen der aufeinander folgenden Gefrier- und Tauprozesse bei VV6 und VV11. Die Form und Intensität der Peaks lässt eine Zunahme des Porenwassers erkennen, was darauf hindeutet, dass das Gefrieren im äußeren Teil der Probe stattfindet, der,

typisch für eine Grenzfläche (zwischen Gefäß und Verfüllbaustoff), eine höhere Porosität aufweist.

Die Ergebnisse der Proben aus VM3d haben gezeigt, dass in Betonkörpern Frostprozesse, im Gegensatz zum Tauprozess kaum reproduzierbar sind. Um Verhaltenstrends unterschiedlicher Verfüllbaustoffe zu identifizieren wurden die in Kapitel 9.1.5 beschriebenen Hauptversuche durchgeführt.

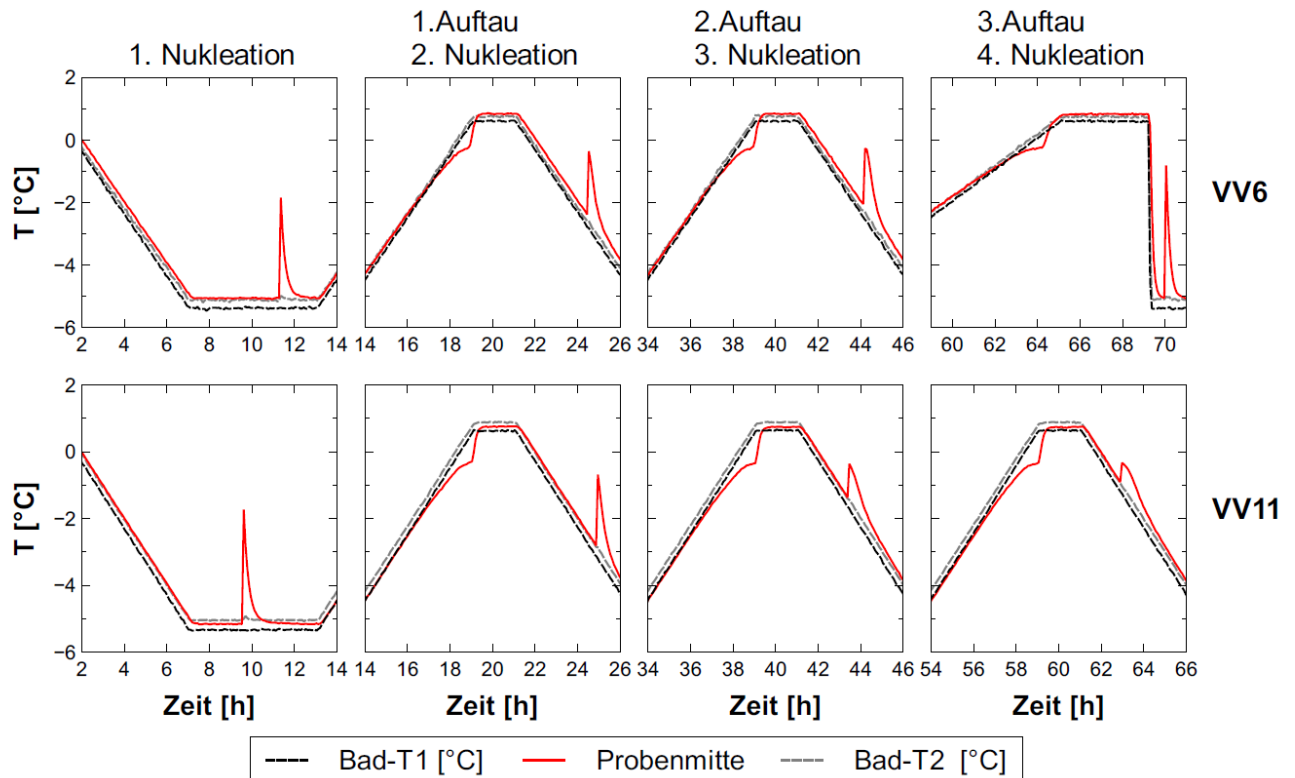


Abbildung 13: Details von VV6 (oben) und VV11 (unten)

#### 9.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorversuche

Die wichtigsten Ergebnisse der Vorversuche sind im Folgenden zusammengefasst und bilden die Grundlagen für die weiteren Arbeiten im AP 1:

1. Einfluss der Porengröße und -konnektivität: Im Sand zeigt die während des Gefrierprozesses gemessene Temperatur nach einem gewissen Unterkühlen unter 0 °C bzw. „Supercooling“ einen Sprung auf die Gefriertemperatur von Wasser (0 °C) und bleibt dort konstant (Plateau) bis das ganze Wasser zu Eis umgewandelt ist (Abbildung 7). Im zementgebundenen Verfüllbaustoff hingegen, zeigt die Temperatur während des ersten Gefrierprozesses eine Temperaturspitze (Peak) und fällt danach sofort wieder auf niedrigere Temperaturen ab (Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12).
2. Einfluss der Aushärtungsrandbedingungen der Betonproben: Aushärtungstemperatur und Alter der Probe prägen die Mikrostruktur des Verfüllbaustoffes sowie den Anteil des nicht gebundenen Porenwassers. Dies führt zu unterschiedlichen Ausformungen des Peaks während der Gefrierphase. Im Labor gehärteten Zementproben zeigen immer einen steil

ausgeprägten Peak, während dieser bei den Proben aus dem Kühlraum beim ersten Frost steil und ab dem zweiten Frost-Tau-Wechsel runder und weniger ausgeprägt ist.

3. Einfluss von mehreren Frost-Tau-Wechseln: bei mehreren aufeinander folgenden Frost-Tau-Wechseln nimmt die Anfangstemperatur der Peaks zu, gleichzeitig nimmt ihre Intensität ab.
4. Einfluss von Probengefäß: Proben, die nach der Aushärtung ohne Gefäß (nur in transparente Folie verpackt) einer Reihe von Frost-Tau-Wechseln unterzogen wurden, wurden dabei zerstört. Proben, die während der F-T-Wechsel im Gefäß verblieben, wurden nicht zerstört.
5. Reproduzierbarkeit der Versuche: Der Tauprozess im zementgebundenen Material VM3d ist sehr gut reproduzierbar. Bei den Frostprozessen können sowohl die Intensität als auch der Zeitpunkt des Peaks bei gleichen Bedingungen stark variieren. Dies könnte auf einen Zufallscharakter des Gefrierprozesses hindeuten, wird aber durch die komplexe klassische Nukleationstheorie (CNT) [14] [17] [18] [10] unterstützt.

#### 9.1.5 Reproduzierbare Hauptversuche

In den Hauptversuchen wurden vier unterschiedliche Verfüllbaustoffe, die zementgebundenen VM1, VM2, VM3 (Tabelle 2) und der Quarzsand QS9 (Tabelle 3), untersucht.

Zur Probenherstellung (Abbildung 14, Abbildung 15) wurden zwei verschiedene transparente Gefäße verwendet: G1 (Polypropylen,  $\Phi$  5cm) und G2 (Polykarbonat,  $\Phi$  6cm). In die Schraubdeckel der Probengefäße wurden Öffnungen für die Anbringung der Temperatursensoren gebohrt und nach Einbau der Sensoren mit Silikon versiegelt. Dabei wurden drei, in Abbildung 14 dargestellte, Konfigurationen hergestellt:

- K1: Proben im Gefäß G1 wurden mit einem zentralen Pt100 ausgerüstet;
- K2: In Proben im Gefäß G2 wurden jeweils zwei Pt100 eingebaut, einer zentral und einer nah am Rand, um mögliche Effekte der Frostfrontbewegung beobachten zu können;
- K3: In Proben im Gefäß G2 wurden jeweils vier unterschiedlichen Temperaturfühler (ein Pt100 und drei Thermoelement-Temperaturfühler (Abbildung 4, )) symmetrisch mit identischem Abstand zum Gefäßrand eingebaut um den Einfluss unterschiedlicher Messprinzipien und unterschiedlicher Sensorengrößen zu untersuchen.

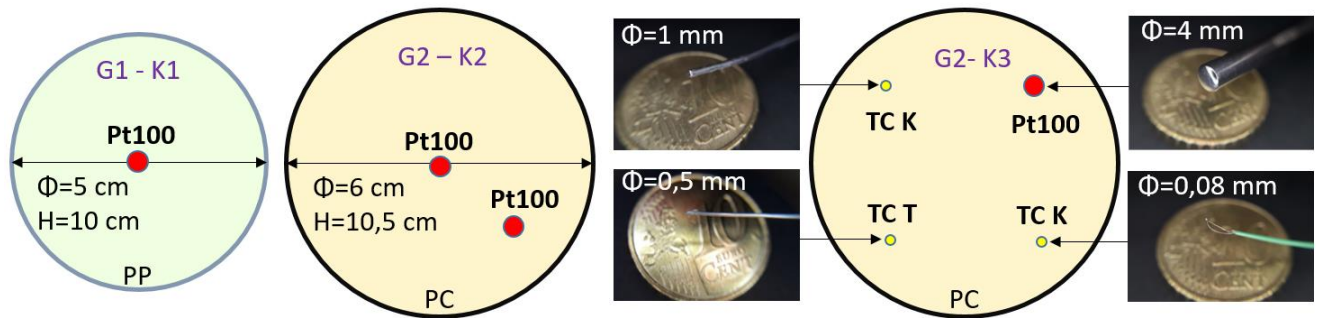


Abbildung 14: Probengefäße G1 und G2 und Sensorkonfiguration K1 – K3.

Jeweils vier Proben wurden gemeinsam in einem speziell hergestellten, isolierten, zylinderförmigen Edelstahlbehälter (Volumen ca. 60L, Abbildung 1, Abbildung 15) durch umströmendes Wärmeträgerfluid (30 %V Ethylenglykol-Wasser-Mischung) von außen nach innen mittels eines steuerbaren Thermostats temperiert. Die Temperaturverteilung im Behälter, gemessen durch zwei Referenztemperatursensoren (R1 und R2), ist homogen.

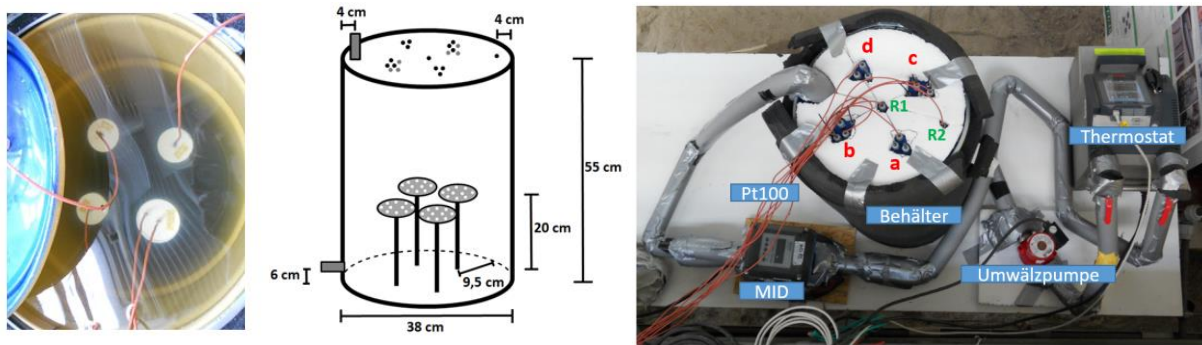


Abbildung 15: Anordnung der Proben im Edelstahlbehälter (links), Behälterskizze (Mitte), Komponenten Versuchsaufbau (rechts)

Tabelle 7 zeigt die durchgeführten Versuche, wobei sich das jeweils verwendete Temperaturprogramm aus den in Tabelle 8 dargestellten Temperaturzyklen zusammensetzt. Alle Proben eines bestimmten Verfüllbaustoffs wurden identisch angemischt, im Kühlraum (8-10 °C) ausgehärtet und aufbewahrt. Die Probenherstellung wurde an die Versuchsplanung so angepasst, dass die Proben ein vergleichbares Alter haben.

Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Versuche

Versuch ID	Temperaturprogramm 1)	Probe ID	Dauer [Tage]	Gefäß
V1	7xT1 + 1xT2 + 1xT3 + 20 Std. bei -3°C	VM2_P1 / P2 / P3	8	G1-K1
		VM2_P4	8	G2-K2
V2	7xT4	VM2_P5 / P6 / P7	6	G1-K1
V3	7xT1	VM1_P1 / P2 / P3	6	G1-K1
		VM1_P4	6	G2-K2
V4	10xT4 + 4xT5	VM1_P4	12	G2-K2
		VM1_P5 / P6	12	G1-K1
		VM3d_P0	12	G2-K3
V5	2xT4	VM1_P7	2	G1-K1
V6	7xT1 + 20 Std bei -3°C	VM3_P1 / P3 / P6 / P7	11	G1-K1
V7	7xT4 + 5 Std. bei - 6 °C	VM3_P2 / P5	7	G1-K1
		VM3_P4	7	G2-K2
		VM3_P0	7	G2-K3
V8	1xT1 + 7xT6	QS9_P2 / P3 / P5	6	G1-K1
		QS9_P4	6	G2-K2
V9	Variiert	DEW_P1	6	G1-K1
		W-VM1_P1	6	G1-K1
		VM1_P7	6	G1-K1
		VM2_P5	6	G1-K1
V10	7xT7	QS9_P4	8	G2-K2
		QS9_P1 / P6 / P7	8	G1-K1

1) Verwendete Temperaturzyklen siehe Tabelle 8

Tabelle 8: Zeitverlauf eines Temperaturzyklus (TZ) d.h. Abkühlung und Aufwärmung in den unterschiedlichen Temperaturprogrammen

Temp-Zyklus	T <sub>max</sub> (T <sub>init</sub> ) [°C]	Dauer T <sub>max</sub> [h]	T <sub>min</sub> [°C]	Dauer T <sub>min</sub> [h]	delta T [K]	dT/dt kühlen bzw. heizen [K/h]	Dauer kühlen bzw. heizen [h]	Dauer Zyklus [h]
T1	1	2	-3	6	4	1	4	16
T2	1	2	-3	6	4	0,5	8	24
T3	1	2	-3,5	6	4,5	1	4,5	17
T4	1	2	-5	6	6	1	6	20
T5	1	4	-5	6	6	1	6	22
T6	1	4	-3	6	4	1	4	18
T7	1	8	-3	6	4	1	4	22



## 9.1.6 Ergebnisse Konfiguration 1

In Abbildung 16 sind die Frost- und Tauprozesse für unterschiedliche Materialien unter ähnlichen Randbedingungen zu sehen. Die Temperatur in der Mitte jeder Probe und im Wärmeträgerfluid-Bad, wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Aufgrund der geringen Größe der Materialproben ist die Zeitverzögerung zwischen Temperaturgang im Versuchsbehälter und im Körper sehr gering. Deutliche Abweichungen sind lediglich während der Gefrier- und Auftauprozesse ersichtlich.

Während in der Sandprobe (QS9) die erste Nukleation und der erste Frostprozess bereits bei Temperaturen über  $-3\text{ °C}$  ( $T_1$ ) stattfindet, konnten diese bei den zementgebundenen Materialien erst bei Temperaturen um  $-5\text{ °C}$  ( $T_4$ ,  $T_5$ ) beobachtet werden.

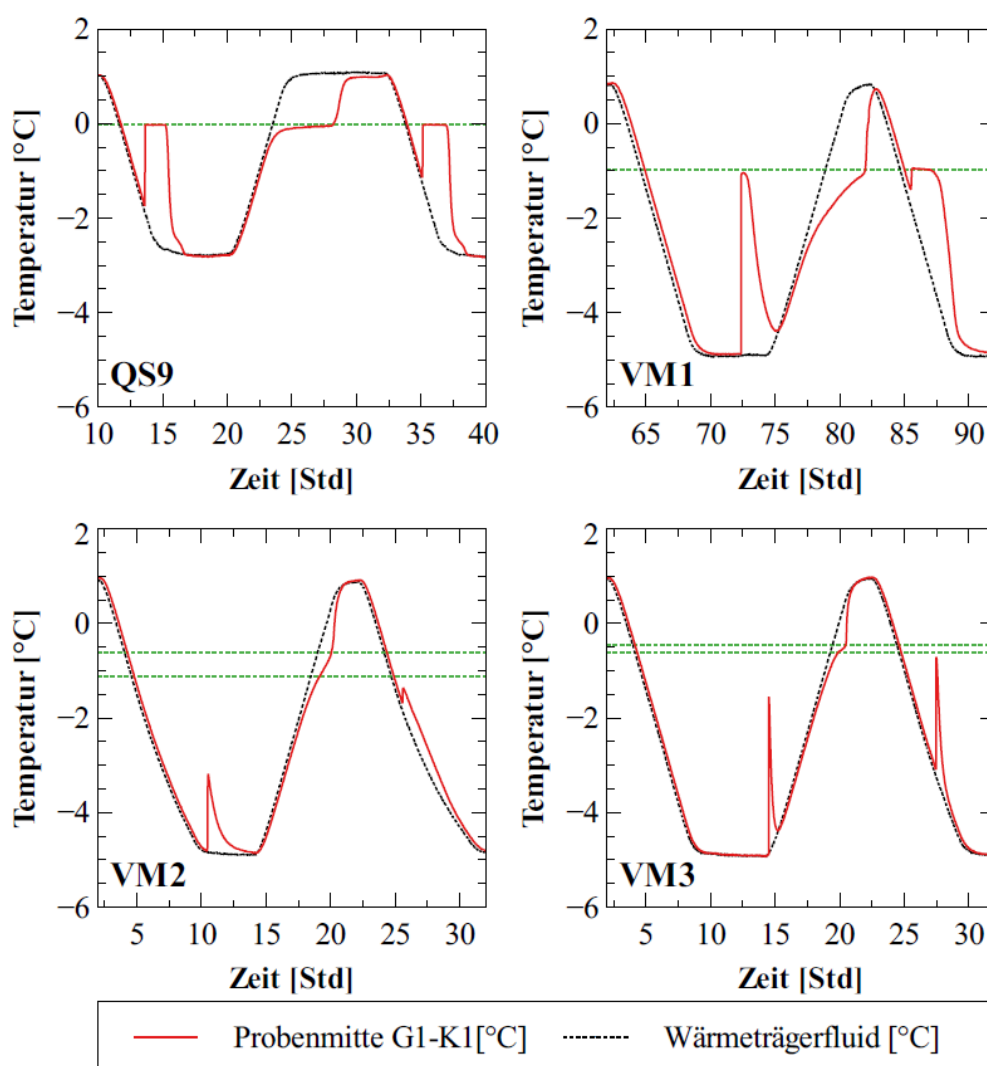


Abbildung 16: Vergleich der Frost- und Tauprozesse in den unterschiedlichen untersuchten Materialien in Konfiguration 1.

Wie bereits in 9.1.3 angesprochen, werden beobachtete Phänomene durch die klassische Nukleationstheorie erklärt [14] [10]. Nukleationszeitpunkt und -temperatur sind von der Kombination mehrerer Faktoren abhängig [17] [10]:

- Korngröße und Grad der Verbindung der Poren,
- verfügbare Treibkraft (Unterkühlungsgrad),
- vorhandene Eiskeime (daher findet die Frostbildung ab dem zweiten Zyklus bei höheren Temperaturen statt),
- mechanische Reize (turbulente Strömung in die PE-Rohren begünstigt den Nukleationsprozess).

Der Temperaturanstieg durch Schmelzenthalpie zeigt im Fall von viel freiem und vernetztem Porenwasser ein Temperaturplateau (Gefriertemperatur) bis das gesamte verfügbare Wasser gefroren ist. Bei wenig freiem bzw. schlecht vernetztem Porenwasser wird die Gefriertemperatur aufgrund der geringeren freigesetzten Schmelzwärme nicht erreicht, was zur Beobachtung eines Peaks führt.

Die Definition der klassischen Gefriertemperatur stimmt mit der Tautemperatur überein und wurde unter den Bedingungen des spontanen Tauprozesses ohne Berücksichtigung der Nukleation berechnet [17]. Im Gegensatz zum Gefrierprozess ist der Tau- oder Schmelzprozess immer spontan ( $\Delta G < 0$ , die Variation der Gibbs-Energie oder freie Enthalpie ist immer kleiner als Null [17]) und benötigt keine Aktivierung oder Überwindung einer Energiebarriere. Deshalb zeigt jede Probe eines Materials unter ähnlichen Randbedingungen bei nachfolgenden Gefrier- und Auftauzyklen dasselbe Tauverhalten. Bei Materialien ohne Temperaturplateau lässt sich die Gefriertemperatur aus dem Wendepunkt des Tauprozesses ableiten (gestrichelte grüne Linie in Abbildung 16). Die Nukleation aufeinanderfolgender Frost-Tau-Zyklen findet an sehr unterschiedlichen Zeitpunkten und Temperaturen statt [14] [18]. Dabei werden, ausgehend von der ersten Nukleation, nachfolgende Nukleationen begünstigt und finden bei höheren Temperaturen statt (Abbildung 17).

Gelöste Substanzen und Grenzflächeneffekt (Gibbs-Thomson, Krümmung bzw. Radius der Porenwand [17] [10]) können zu einer Abnahme der Gefriertemperatur des Porenwassers gegenüber dem klassischen Wert von 0 °C führen. Die geringste Gefriertemperatur, ca. -0,5 (Abbildung 16) wird für das Material VM3 ermittelt.

Bei VM2, das mehr Anmachwasser als VM3 (0,8 W/Z-Wert wie beim VM1) aber auch mehr Tonminerale enthält, zeigt der Peak eine abgeflachte und wenig ausgeprägte Form. Der Peak des Materials VM3 hingegen ist steil und ausgeprägt. Dies ist dadurch zu erklären, dass es im Falle des Materials VM2 eine höhere Grenzflächenenergie (höhere Anziehungskräfte) zwischen dem metastabilen Wasser und den Porenwänden gibt, wodurch weniger Wasser bzw. das Wasser langsamer in die Kristallphase übergeht als bei Material VM1 und VM3.

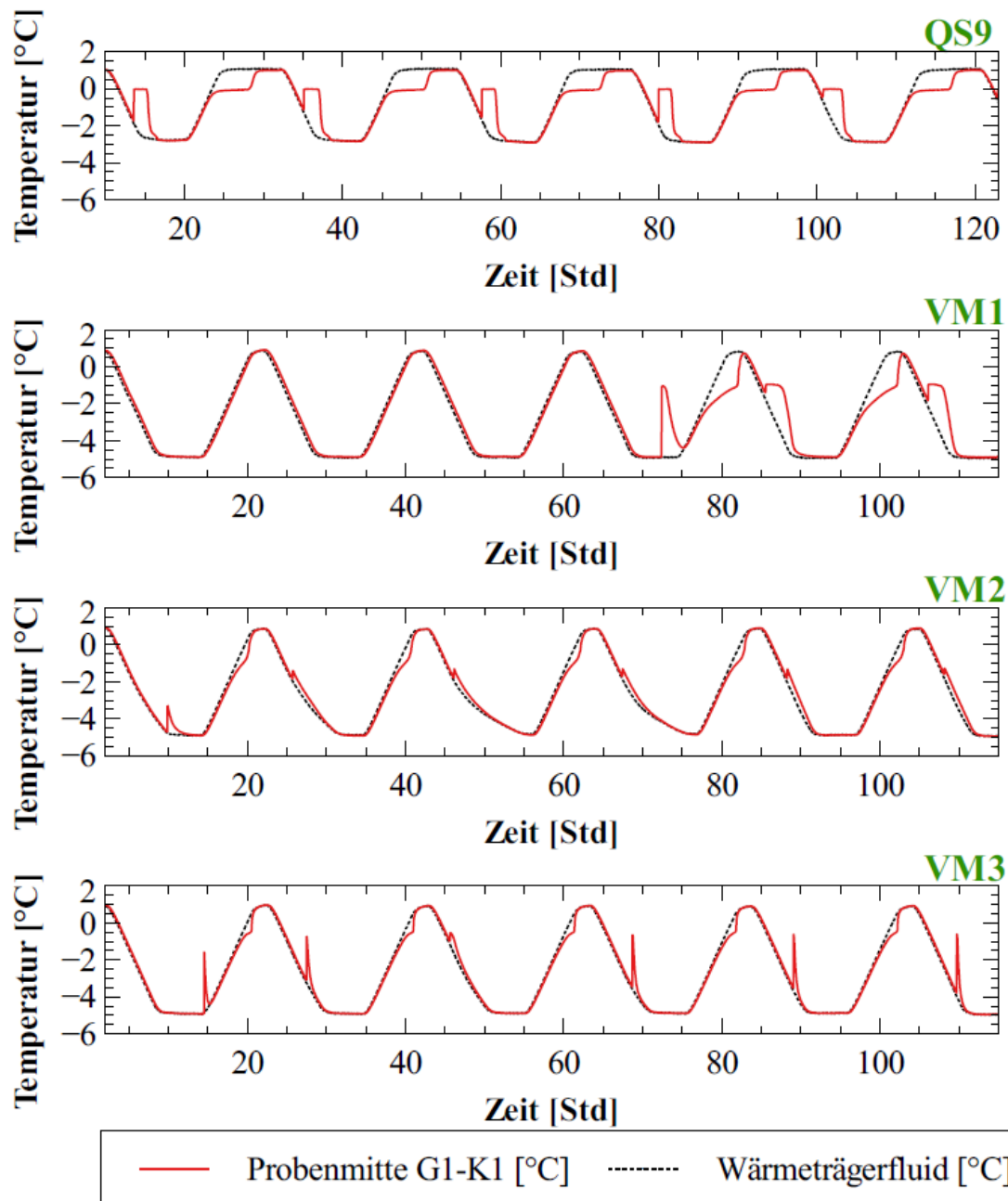


Abbildung 17: Zeitpunkte und Temperaturen der Nukleation in aufeinanderfolgender Frost-Tau-Zyklen

In Abbildung 18 ist die Abkühlung und Aufwärmung von drei Proben (P5, P6, P7) aus derselben VM1-Suspension und unter dem gleichen Temperaturprogramm (T4) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mehrere Abkühl- und Aufwärmzyklen stattfinden bevor die erste Nukleation stattfindet und der erste Gefrierprozess ausgelöst wird. Im oberen und mittleren Diagramm sind die Temperaturverläufe in zwei Proben aus VM1 dargestellt, die im Behälter gleichzeitig abgekühlt wurden. Die im unteren Diagramm gezeigte Probe wurde zu Vergleichszwecken im Thermostatbad, wie bei den Vorversuchen, abgekühlt. Aufgrund der leicht niedrigeren Temperatur im Bad (im Vergleich zur eingestellten Programmtemperatur) ist die erste Nukleation hier bereits bei der ersten Abkühlung beobachtbar.

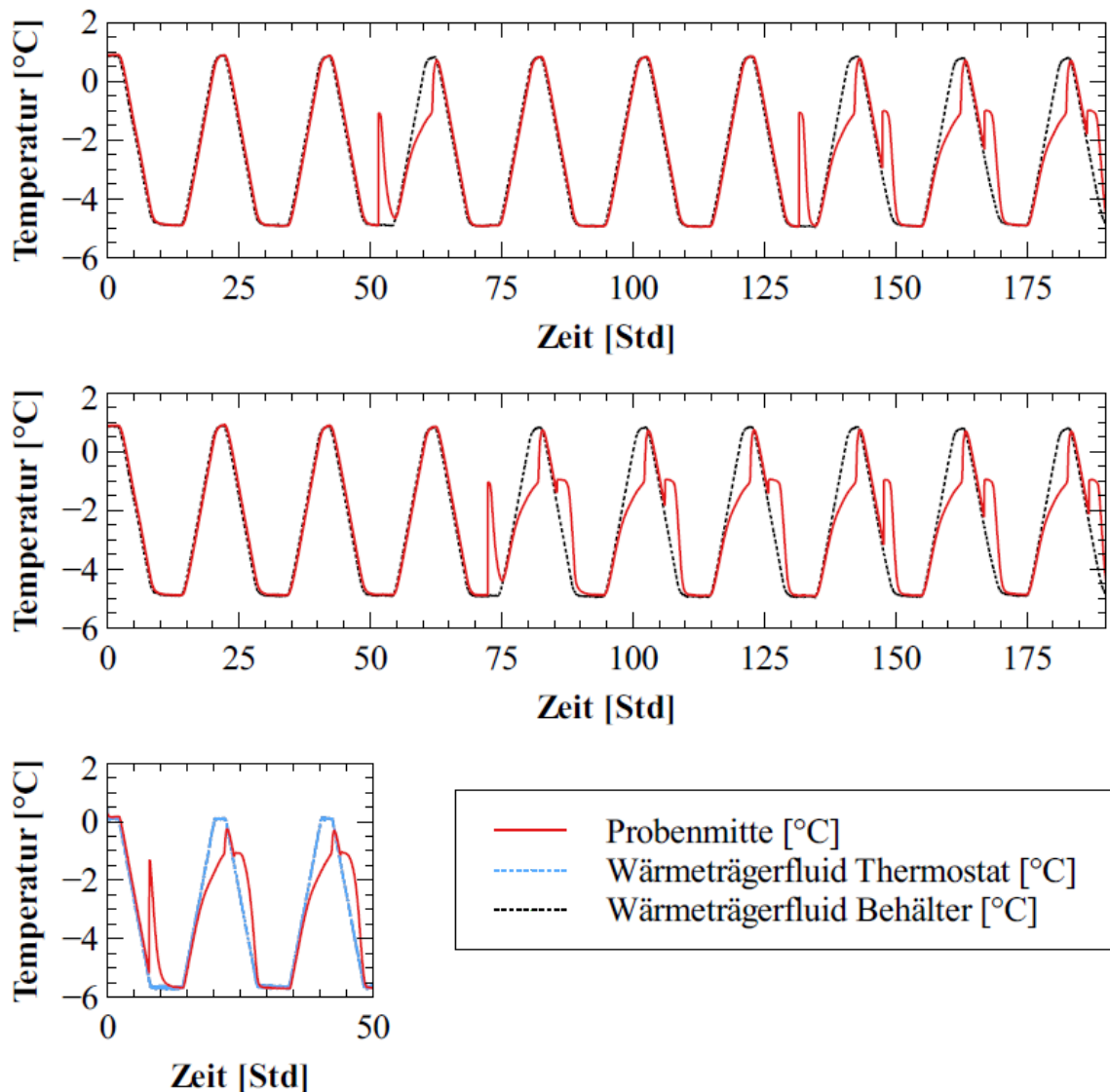


Abbildung 18: Drei Proben aus VM1 im Vergleich (oben: P5; Mitte: P6; unten: P7).

### 9.1.7 Ergebnisse Konfiguration 2

In Abbildung 19 wird das Verhalten einer Sandprobe und zweier zementgebundener Proben (VM1 und VM3) der Konfiguration 2 (Sensor in Probenmitte (blau) plus Sensor nahe Probenrand (rot)) bei unterschiedlichen FT-Zyklen verglichen. Aufgrund der kleinen Probengröße wurde das Einfrieren sofort von beiden Temperatursensoren registriert.

Bei der Probe QS9, die mehr Wasser enthält und deren Poren besser vernetzt sind, reagieren die Sensoren am Probenrand unterschiedlich zu denen in der Probenmitte. In der Probenmitte wird eine höhere Schmelzwärme freigesetzt, als ob mehr Porenwasser zur Verfügung stünde. Dies könnte auf die Wirkung der Gefrierfront und einem damit verbundenen Druckgradienten (hydraulisches Gefälle) nach der Bildung von Eiskristallen in den erweiterten Poren von außen nach innen zurückzuführen sein.

VM1 enthält deutlich mehr Anmachwasser als VM3 (W/Z Wert 0,8 gegen 0,3) und zeigt, wie bei K1 (9.1.6) weniger ausgeprägte Peaks als VM3. Bei nachfolgenden Nukleationen ist durch die Verminderung der Energiebarriere die Schmelzenthalpie ausreichend ein Plateau zu bilden. In diesem Fall reagieren, wie bei QS9, die Sensoren am Probenrand unterschiedlich zueinander in der Probenmitte. Der Probenrand kühlt schnell ab, nachdem die Schmelzenthalpie freigesetzt wurde. Auf Grund der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit des Materials VM1 zeigt der Sensor in der Mitte eine verzögerte Reaktion.

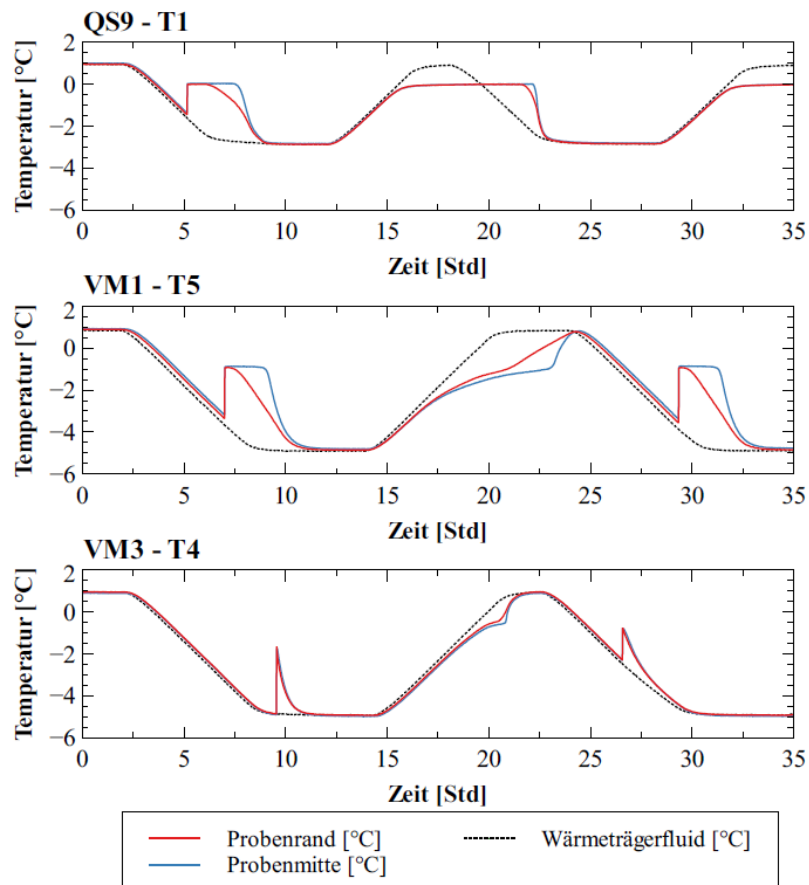


Abbildung 19: Vergleich der Frost- und Tauprozesse verschiedener Materialien in Konfiguration 2.

Abbildung 20 zeigt das Verhalten der Probe VM1 bei Anwendung unterschiedlicher Temperaturzyklen (Tabelle 8). Bei T1 (oben) fand bei einer Abkühlung auf -3 °C keine Nukleation statt. Bei T4 und T5 (Mitte, unten) wurde die Probe auf -5 °C abgekühlt und alle Nukleationen, einschließlich der ersten, traten knapp unter - 3,2 °C auf. Während bei beiden Proben bei zwei Stunden  $T_{\min}$  die Minimaltemperatur erreicht wurde, wurde bei einer  $T_{\max}$ -Dauer von 2h (T4) das Material noch nicht aufgetaut. Bei einer  $T_{\max}$ -Dauer von 4h (T5) war ein Frost-Tau Wechsel zu sehen.

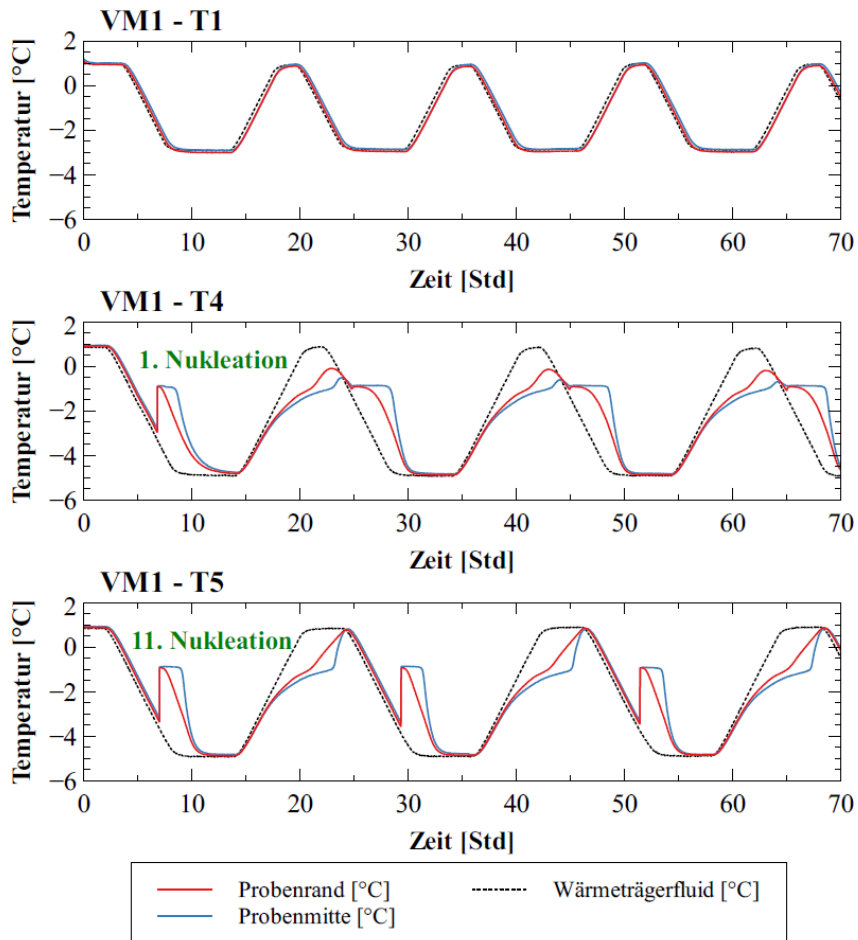


Abbildung 20: Verhalten der Probe VM1 bei unterschiedlichen Temperaturprogrammen.

### 9.1.8 Ergebnisse aus Konfiguration 3

In K3 sollte ein möglicher Einfluss der Sensortypen auf die Messergebnisse ermittelt werden. Dazu wurden Temperaturganglinien in zwei Proben aus VM3d mit jeweils vier unterschiedlichen Sensoren gemessen, die symmetrisch am Rand des Gefäßes (G2) angebracht waren (Abbildung 14). Eine Probe wurde im Kolloidmischer, die zweite manuell gemischt (Abbildung 1). Abbildung 21 zeigt die Temperaturentwicklung der verschiedenen Sensoren in der Probe des Füllmaterials VM3d aus dem Kolloidmischer. Von oben: Thermoelemente (TC K ohne, TC T und TC K mit Schutzhülse, Pt100). Die Temperatur des Wärmeträgerfluids im Behälter ist türkis dargestellt.

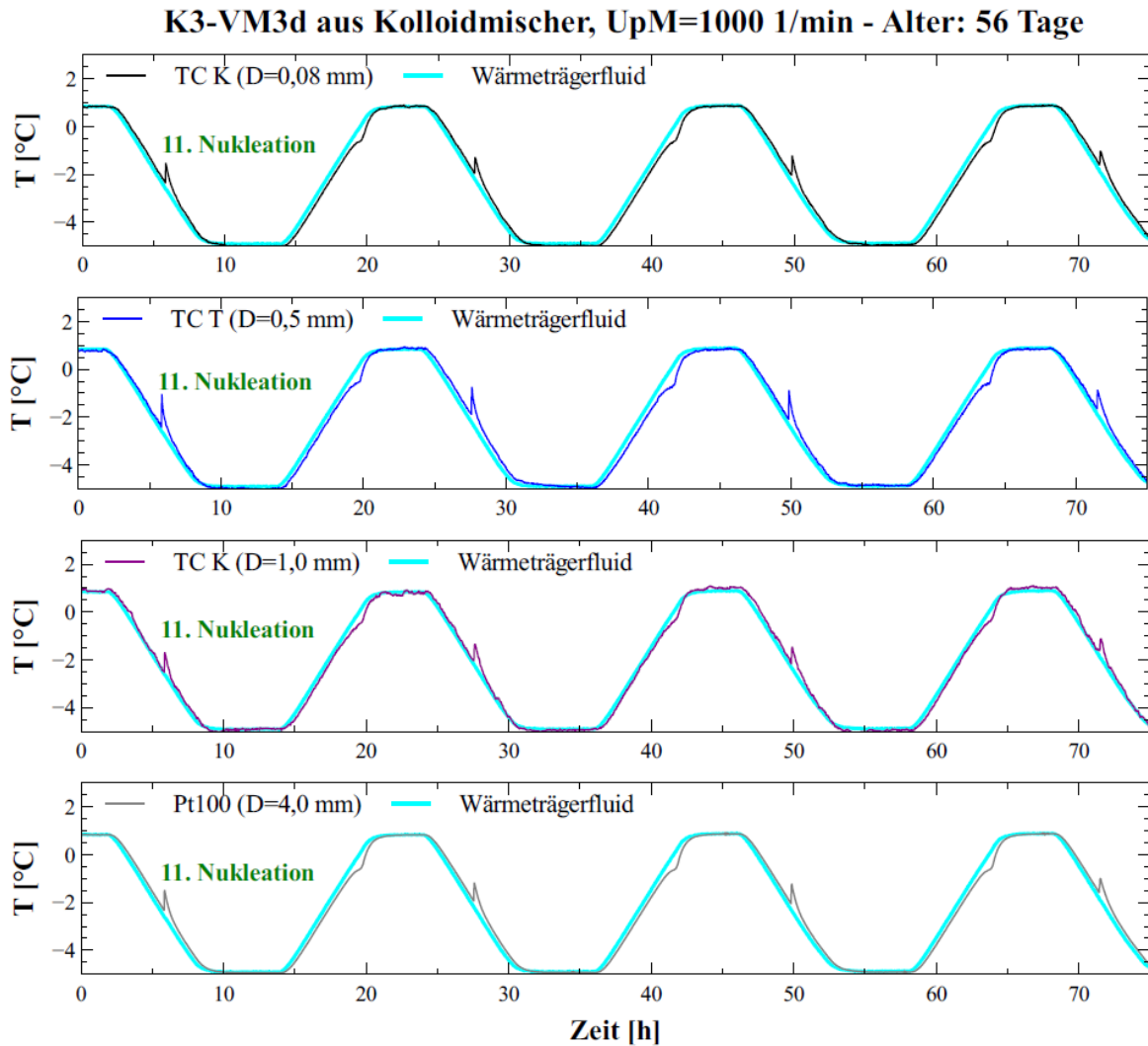


Abbildung 21: Vergleich der Sensoren bei Frost-Tauwechseln im „industriell“ hergestelltem Verfüllmaterial.

Abbildung 22 zeigt die Temperaturentwicklung der Sensoren in der manuell hergestellten Probe des Verfüllmaterials VM3d. Im ersten Diagramm (TC K) sind Datenübertragungsprobleme aufgrund einer losen Verbindung der sehr dünnen Drähte des kleinsten Sensors TC K zu erkennen.

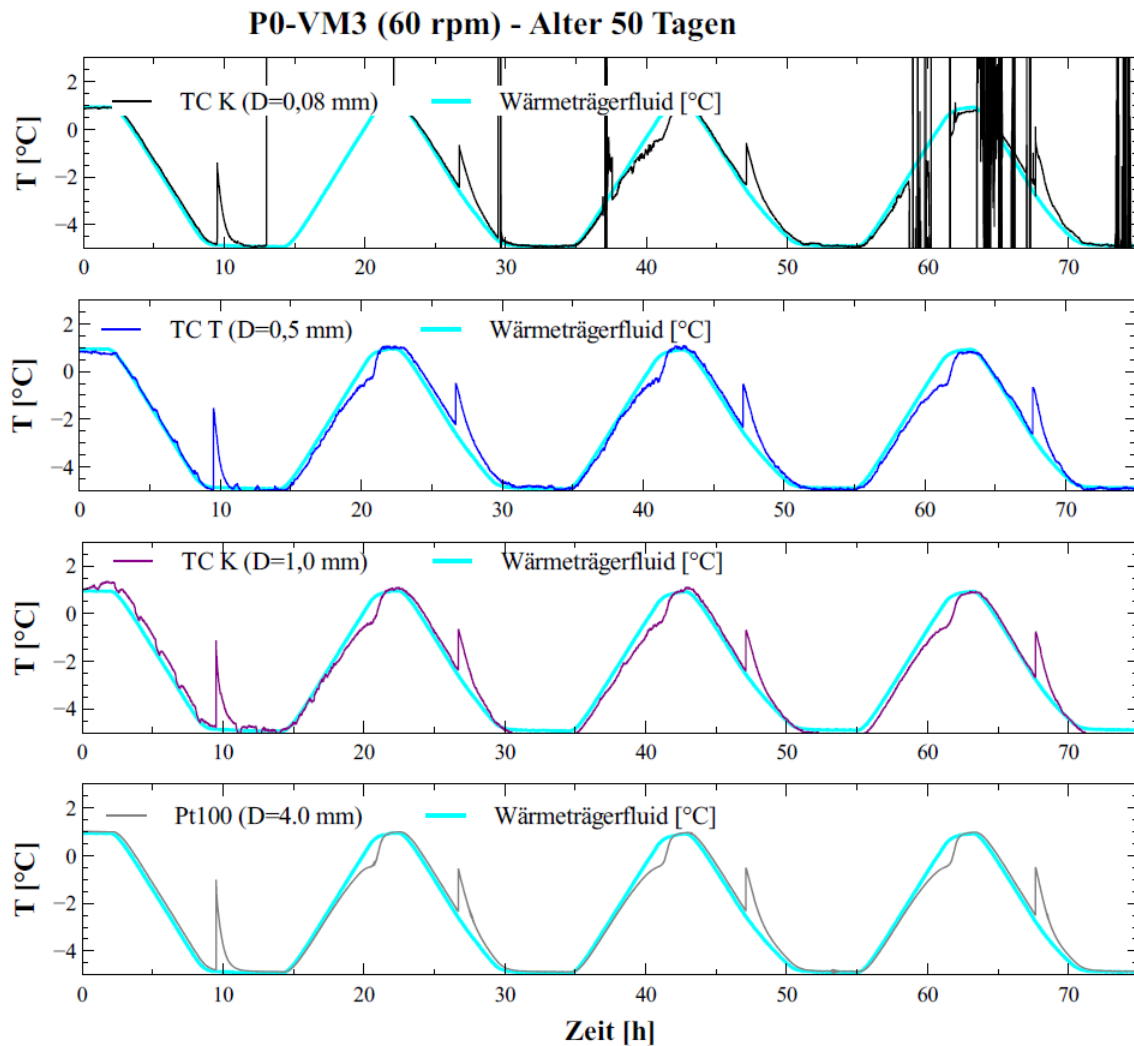


Abbildung 22: Probe der Konfiguration 3 aus Verfüllmaterial VM3d, auf die Kleinskala vorbereitet.

Alle Arten von Sensoren reagieren, unabhängig von ihrer Fläche und ihrem Messprinzip, beim Einfrieren auf die gleiche Weise. Konvektionsbewegungen im Wärmeträgerfluid waren von den Sensoren mit Schutzhülse als sehr geringe Temperaturschwankungen messbar. Die Messungen des Thermoelements (TC K ohne Schutzhülse) mit kleinerer Oberfläche waren denen der Pt100 sehr ähnlich.

Unabhängig von der Probenherstellung zeigen alle Sensoren bei den Frost-Tau-Wechseln parallele Peaks, wobei die Ausbildung der Peaks in den manuell hergestellten Proben (bei gleichem W/Z-Wert und gleichem Alter) viel ausgeprägter ist. Dies bestätigt das Ergebnis anderer Studien [19]: Die Methode der Suspensionszubereitung beeinflusst den Prozentsatz des an der Hydratation beteiligten Wassers und damit die Mikrostruktur des Materials.

Unter den in Formen gefrorenen Proben zeigten lediglich VM1 und teilweise VM3 nach den Versuchen einige Mikrorisse. Die Proben, die sich in kleinem Maßstab als die widerstandsfähigsten erwiesen haben, sind die aus Verfüllbaustoff VM2, die Tonminerale enthalten.



### 9.1.9 Grundlagen Betontechnologie und Gefrieren von Beton

Auf der Grundlage einer detaillierten Literaturstudie verbunden mit den Ergebnissen aus AP 1 wurde eine wissenschaftliche fundierte Erklärung zum Verständnis des Einfriermechanismus einer Sonde erarbeitet.

Beton wird aus Aggregaten (Gesteinskörnungen), zementartigem Bindemittel und Wasser hergestellt. Die letzten beiden (Zementleim) reagieren und ergeben die Zementsteinhydrate. Im ausgehärteten Beton lassen sich drei Bereiche unterscheiden: der Zementstein, die Zuschlagstoffe (Gesteinskörner) und die dazwischenliegende Übergangszone (ITZ, interfacial transition zone). Die Poren sind sowohl im Zementstein als auch in der ITZ verteilt und zeigen unterschiedliche Größen und Konnektivitäten.

Im Zementstein kann man zwischen verschiedenen Arten von Poren unterscheiden:

- Gelporen I: das Wasser ist chemisch in den Calciumsilikathydrat-Partikeln gebunden (CSH, Hydratprodukt), sie werden deshalb oft als CSH-Gel bezeichnet [ $r < 1,6 \text{ nm}$ ].
- Gelporen II: zwischen inneren CSH-Hydratprodukten [ $r = 1,6 - 100 \text{ nm}$ ].
- Kapillarporen: [ $r = 100 \text{ nm} - 100 \text{ }\mu\text{m}$ ] zwischen äußeren Hydratprodukten, sie sind Reste der ursprünglichen wassergefüllten Abstände zwischen den Zementkörnern.

Die Grenze zwischen Gel- und Kapillarporen ist unsicher. Bei den wichtigsten Ansätzen [(Powers-Brownyard-Modell [20] [21], Feldman-Sereda-Modell [22] [23], Jennings-Tennis-Modell [24] [25]) liegt sie zwischen 50 und 100 nm.

Die Eigenschaften der ITZ werden durch Form, Größe, mineralische Zusammensetzung, Oberflächenrauigkeit, Oberflächenfeuchtigkeit und Porosität der Gesteinskörner sowie dem Wasser/Zement-Verhältnis beeinflusst. Die ITZ hat eine sehr hohe Porosität mit „kritischen“ Poren ( $D_{\text{crit}} > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ), die beim Durchfrieren relevant sind.

Die Ursache für die Bildung der ITZ liegt im Größenunterschied zwischen Aggregaten- und Zementkörnern (1-100  $\mu\text{m}$ ). Jedes Aggregatpartikel wirkt wie eine kleine Wand, die die initiale Packung der Gesteinskörner stört, was dazu führt, dass die Zone, die dem Aggregat am nächsten ist, hauptsächlich kleine Körner enthält, während sich weiter außen größere Körner befinden [26]. In der Nähe dieser „Wand“ führt dies zum Auftreten großer Kristalle wie Calciumhydroxid (C-H) und Ettringit (C-A-S<sup>-</sup>H) als Hydratationsprodukte und damit zu einer deutlich höheren Porosität und höherem Wassergehalt.

Jede Fremdoberfläche, z.B. die Oberfläche eines Kunststoffgefäßes, eines Stahlsensors [27], eines PE-Rohres [28] oder eines anderen Einbauteils (Kunststoffhalterung, etc.) kann entsprechend dem so genannten „Wandeffekt“ zu einer porösen ITZ führen. Da die Objekte viel größer als Aggregate sind, erstreckt sich diese ITZ über das gesamte Objekt, ihre Durchdringungsbreite hängt von der Oberflächenkörnung (Rauigkeit) des Objekts ab. Im Vergleich zur einfachen ITZ zwischen Zement und Aggregat ist hier eine Porengröße  $> D_{\text{crit}}$  und gleichzeitig eine höhere Porenkonnektivität zu erwarten. Dabei bildet sich anfänglich ein Wasserfilm auf der Oberfläche [27], der später zu „Debonding“ [28] führt. Die mikroskopischen Eigenschaften der Übergangszone zwischen HDPE und Zement sind nicht so detailliert untersucht worden wie für das Aggregat oder den Stahl (Bauwesen). Debonding, und damit die Ausbildung einer ausgeprägten ITZ zwischen HDPE und Beton, konnte jedoch in den AP 1 Experimenten gezeigt werden.

Die Bedingung für das Gefrieren von Wasser in einer Pore ist eine ausreichende thermodynamische Triebkraft (Supercooling [14]) zur Überwindung einer Energiebarriere, die unter anderem von der Porengeometrie beeinflusst wird (Gibbs-Thomson Effekt). Kleinere Poren erfordern niedrigere Temperaturen (höhere Triebkraft). Damit in den Gelporen das Gefrieren von Wasser stattfinden kann, ist eine hohe thermodynamische Triebkraft erforderlich, d.h. sehr niedrige Temperaturen [17], die in unserer Anwendung (erlaubte Minimaltemperatur lt. LQS-BW =  $-3\text{ °C}$ , Minimaltemperatur bei AP 1 =  $-5\text{ °C}$ ) vernachlässigbar sind.

Bei den für den Betrieb von EWS relevanten Temperaturen kann es somit nur zum Einfrieren in den Kapillarporen kommen [18] [10]. Deren Bildung ist direkt abhängig von Wasserzugabe (Wasserzementwert) und Hydratationsgrad [29] und ihr Netzwerk bestimmt die Permeabilität des Verfüllbaustoffes. Das Gefrieren in einer Einzelpore kann von den hier beschriebenen Sensoren aufgrund der unterschiedlichen Skala nicht gemessen werden. Das Einfrieren einer Pore kann jedoch nur zu Strukturschäden führen, wenn sie in der Größenordnung von cm liegt [18].

Wenn ein Eiskristall in einer großen Pore nukleiert oder von der Außenseite des Körpers (wie z.B. in AP 1) in eine größere Pore eindringt, wird er eine relativ kurze Strecke vorankommen, bevor er auf eine Verengung trifft, die er nicht passieren kann. Der Kristall wird an der Verengung festgehalten, bis die treibende Kraft so weit ansteigt, dass er zur nächst kleineren Verengung weitergehen kann [18]. Damit der Kristall beliebig tief in den Körper vordringen kann, muss die treibende Kraft so groß sein, dass der Kristall die größte Öffnung durchdringen kann, die in ein perkolierendes Netzwerk größerer Poren führt („breakthrough radius“) [18]. In diesem Fall sind strukturelle Schäden möglich und dies könnte auch von den hier verwendeten Sensoren gemessen werden.

Zusammenfassend findet das Gefrieren in der ITZ zwischen einem Fremdkörper und dem Verfüllbaustoff statt, wenn die richtigen thermodynamischen Bedingungen gegeben sind. Der Umfang dieses Phänomens kann von einem Sensor gemessen werden. Die dafür nötige Unterkühlung hängt vor allem von der ITZ-Mikrostruktur ab, d.h. von den Materialien, aus denen die Übergangszone besteht. Eine Übertragung dieser kleinskaligen Betrachtung auf eine Feldanwendung ist nicht direkt möglich, weshalb Versuche im Technologiemaßstab durchgeführt werden müssen (AP 4).

#### 9.1.10 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse des AP 1

Die Untersuchungen in kleinem Maßstab unter vereinfachten und kontrollierbaren Randbedingungen haben es ermöglicht, die Faktoren zu identifizieren, die den Gefrierprozess in einer Verfüllmaterialprobe am meisten beeinflussen. Phänomene, die mit dem Phasenwechsel zusammenhängen, wie Supercooling und freigesetzte Enthalpie wurden beschrieben. Dies führte zur Unterscheidung der „Nukleationstemperatur“ von der „Gefriertemperatur“ [30] [31] [32].

Bei kleinskaligen zylindrischen Proben aus Verfüllmaterial kann die erste Nukleation bei einer Temperatur deutlich niedriger als  $-3\text{ °C}$  erfolgen. Im großskaligen Versuch (Erdwärmesondensystem) kann im Gegensatz dazu die erste Nukleation bereits bei einer höheren Temperatur ausgelöst werden, z.B. wenn die Wärmeträgerflüssigkeit im Rohr eine Temperatur von  $-3\text{ °C}$  hat. Dies wurde bereits im Forschungsvorhaben „EWS-Frost - (L75 14 011)“ [33] gezeigt.

Die AP 1-Ergebnisse können somit nicht direkt zu Aussagen hinsichtlich der Temperatur, bei welcher die erste Nukleation in einer EWS in einem realen Bohrloch stattfindet, herangezogen werden. Randbedingungen einer Feldanwendung, wie z.B. die radiale Frostausbreitung von innen nach außen (von der Wärmeträgerflüssigkeit in den PE-Rohren der EWS zum umgebenden porösen Medium), das Vorhandensein einer Grenzfläche zwischen Rohr und Verfüllmaterial, die mechanische Energie durch die Vibration der Rohre sowie eine Grundwasserströmung sorgen für thermodynamische Instabilität und senken die Nukleationsenergiebarriere [10].

Zusammenfassend kann für die kleinskaligen Versuche festgehalten werden:

Die Frostbildung findet in der ITZ (Gefäß – Verfüllbaustoff) statt. Diese Frostbildung führt jedoch (bei den hier angelegten Temperaturen) noch nicht zur Durchfrostung der gesamten Probe.

Die Nukleationstemperatur ist direkt von der ITZ und weiteren mikroskopischen Faktoren abhängig und ist nicht reproduzierbar.

Gefrier- und Tautemperatur sind Materialkonstanten des porösen Mediums. Sie sind abhängig von gelösten Substanzen im Porenwasser und der Geometrie der Kapillarporen in der ITZ.

## **9.2 AP 2: Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff (IGS)**

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die numerische Simulationsumgebung, die das IGS bereits seit mehreren Jahren zur Untersuchung von thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Phänomenen einsetzt, zur Prognose eines Phasenwechsels innerhalb von zementösen, porösen Baustoffen fortzuentwickeln, um eine korrekte Vorhersage über den Ort und Zeitpunkt des Phasenwechsels flüssig-fest, d.h. von ungefrorenem zu gefrorenem Material - und umgekehrt - innerhalb des Verfüllmaterials einer Erdwärmesonde und des umgebenden Untergrunds zu ermöglichen. Die durchgeführten Berechnungen basierten auf üblichen Modellen zur Abbildung des Phasenwechsels innerhalb eines porösen Mediums. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den Ergebnissen aus den Laboruntersuchungen aus (AP 1) verglichen.

Die Experimente aus AP1 wurden mit der Softwareumgebung COMSOL Multiphysics simuliert. Nachdem die Proben aus dem Experiment ausschließlich aus Verfüllmaterial bestanden war eine thermohydraulische Modellierung ausreichend.

Die zylindrischen Proben hatten in den Versuchen einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von 100 mm. Das zur Simulation verwendete achsensymmetrische Modell war somit 25 mm breit (entspricht dem Radius der Probe) und 100 mm hoch, der das Füllmaterial enthaltende Kunststoffbehälter war 2 mm dick (Abbildung 23). Eine Netzstudie ergab, dass bei insgesamt 1.948 Elementen, 1.748 Elementen für das Verfüllmaterial und 200 Elementen für den Kunststoffbehälter, eine optimale Netzdiskretisierung erreicht wird.

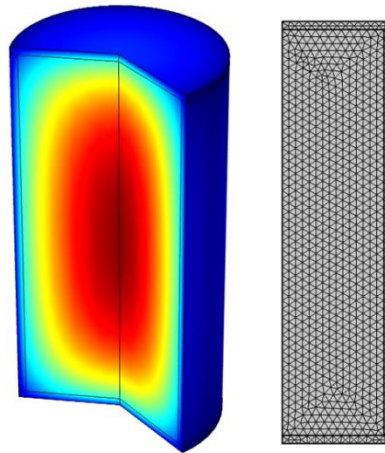


Abbildung 23: Achsensymmetrisches Modell

Die thermischen Parameter für die Füllmaterialien wurden den Datenblättern entnommen, für den verwendeten Kunststoffbehälter standen jedoch keine Datenblätter zur Verfügung, auch konnten die thermischen Parameter nicht im Labor überprüft werden. Durch den Vergleich mehrerer Datenblätter verschiedener Hersteller konnte abgeleitet werden, dass die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials Polypropylen im Bereich von 0,1 bis 0,2 W/(m·K) liegt. Am häufigsten wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 0,17 W/(m·K) und eine Dichte von 946 kg/m<sup>3</sup> angegeben, weshalb diese Werte im numerischen Modell verwendet wurden.

Für die numerische Umsetzung der Phasenwechsel ist in COMSOL eine Eingabemaske implementiert (siehe Gleichungen [1-1], [1-2], [1-3]). Für diese Phasenwechsel sind drei Eingaben erforderlich: die Phasenwechseltemperatur, die latente Wärme und das Transition-Intervall, d. h. das Intervall, in dem sich die Parameter der Probe vom normalen Füllmaterial zum gefrorenen Füllmaterial ändern, während gleichzeitig latente Wärme abgegeben wird (Abbildung 24).

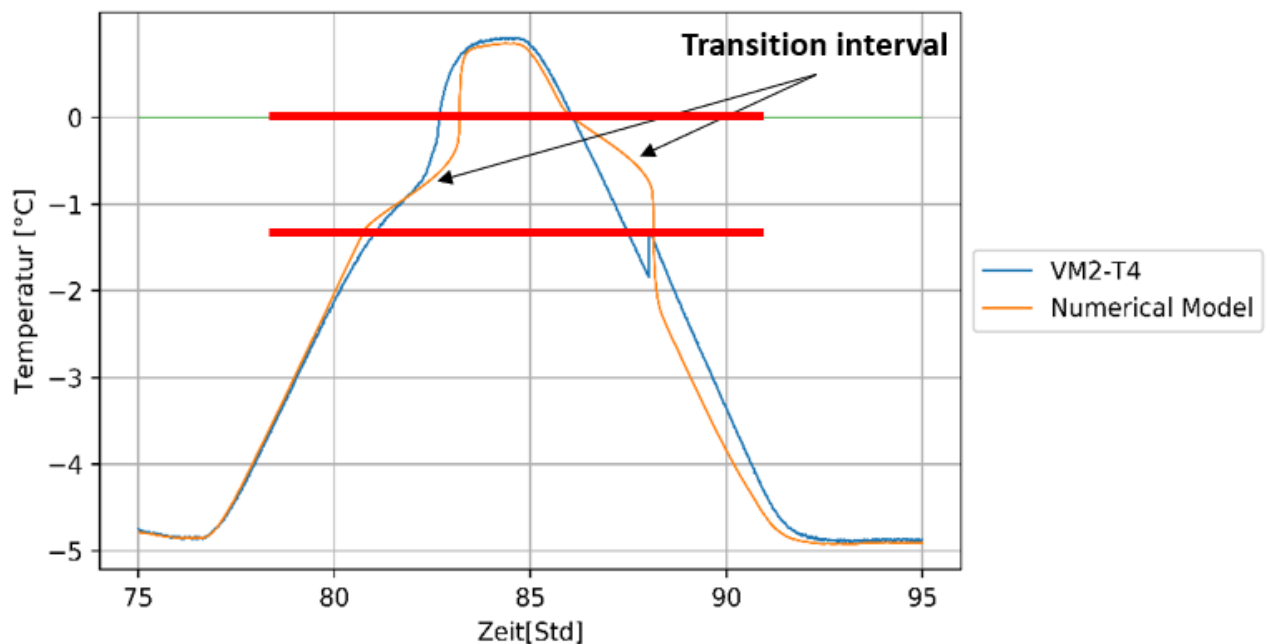


Abbildung 24: Transition Intervall

Das Transition-Intervall beschreibt die „Sanftheit“ des Übergangs zwischen den beiden Phasen, d.h. die thermische Energie die bei der latenten Zustandsänderung freigesetzt wird. Eine Verkleinerung dieses Übergangsintervalls würde bedeuten, dass die latente Wärme schneller freigesetzt wird, was zu einer Temperaturspitze führen würde, ähnlich der Spitze in der Auftau-Phase in Abbildung 24. Dies würde jedoch bewirken, dass diese Spitze bei beiden Phasenübergängen (Gefrieren und Auftauen) auftritt, was mit Ergebnissen von AP1 nicht vereinbar ist. Im Folgenden wurde deshalb ein Transition-Interval von 0,5 K verwendet.

Während des Phasenwechsels ändern sich die Anfangsparameter des Verfüllbaustoffes in der ungefrorenen Phase, bis sie mit den Parametern der neuen gefrorenen Phase übereinstimmen, sobald der Phasenwechsel abgeschlossen ist. Im numerischen Modell wird während des Phasenwechsels der aktuelle Parameter durch den gewichteten Durchschnitt bestimmt., d.h. der Parameter zum Zeitpunkt  $x$  des Phasenwechsels ist gleich der Summe der Anfangs- (ungefroren) und Endphasenparameter (gefroren), jeweils multipliziert mit dem jeweiligen relativen Volumenanteil zum gleichen Zeitpunkt.

Wie in Gleichung (1-1) dargestellt, ist die Dichte des Materials während dieses Phasenübergangs die Summe der prozentualen Wichtung des Materialvolumens in Phase 1 und der Dichte des Materialvolumens in Phase 2.

$$\rho = \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \quad (1-1)$$

Dabei sind  $\theta_1$  bzw.  $\theta_2$  [-] die Anteile der Materialien in Phase 1 bzw. in Phase 2 und  $\rho_1$  und  $\rho_2$  [M/L<sup>3</sup>] die jeweils zugehörigen Materialdichten.

Die gleiche Methode gilt für die anderen Parameter wie die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität (Gleichungen (1-2) und (1-3)).

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}) + L_{1 \rightarrow 2} \frac{\delta \alpha_m}{\delta T} \quad (1-2)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (1-3)$$

Dabei steht  $C_p$  für die Wärmekapazität,  $L_{1 \rightarrow 2}$  für die latente Wärme und  $k$  für die Wärmeleitfähigkeit

Wie im AP1 erwähnt sind einigen Proben auch bei einer unter  $0^\circ\text{C}$  gesunkenen Kühlmitteltemperatur nicht eingefroren. Abbildung 25 zeigt die Simulationsergebnisse (mit Phasenwechsel) im Vergleich zu den Versuchsergebnissen. Die numerische Simulation zeigt um die Gefrierzone eine deutliche Abweichung in der Modellvorhersage aufgrund der latenten Wärme. Die experimentellen Daten zeigen hingegen keinen Einfluss der latenten Wärme, was beweist, dass während dieses Experiments kein Phasenwechsel aufgezeichnet wurde.

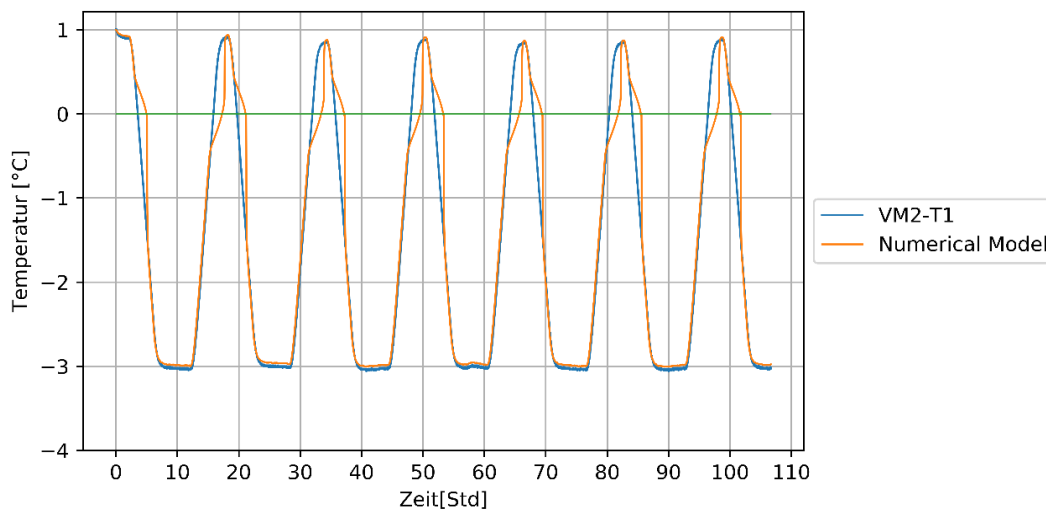


Abbildung 25: Versuch VM2-T1: Gegenüberstellung Messergebnisse und Ergebnisse der numerischen Simulation (mit Phasenwechsel)

Abbildung 26 zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 25 für einen 15 stündigen Abschnitt.

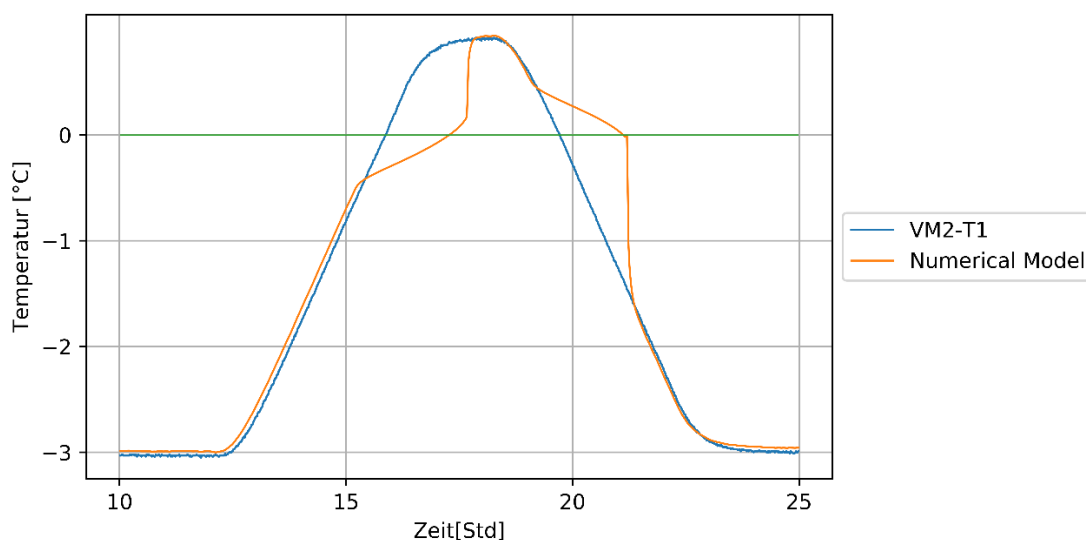


Abbildung 26: Versuch VM2-T1 mit Phasenwechsel (15-Stunden Abschnitt)

Abbildung 27 zeigt hingegen die Modellergebnisse ohne Berücksichtigung des Phasenwechsels und des einher gehenden latenten Wärmestroms, was zu einer genaueren Vorhersage des Temperaturverlaufes führt.

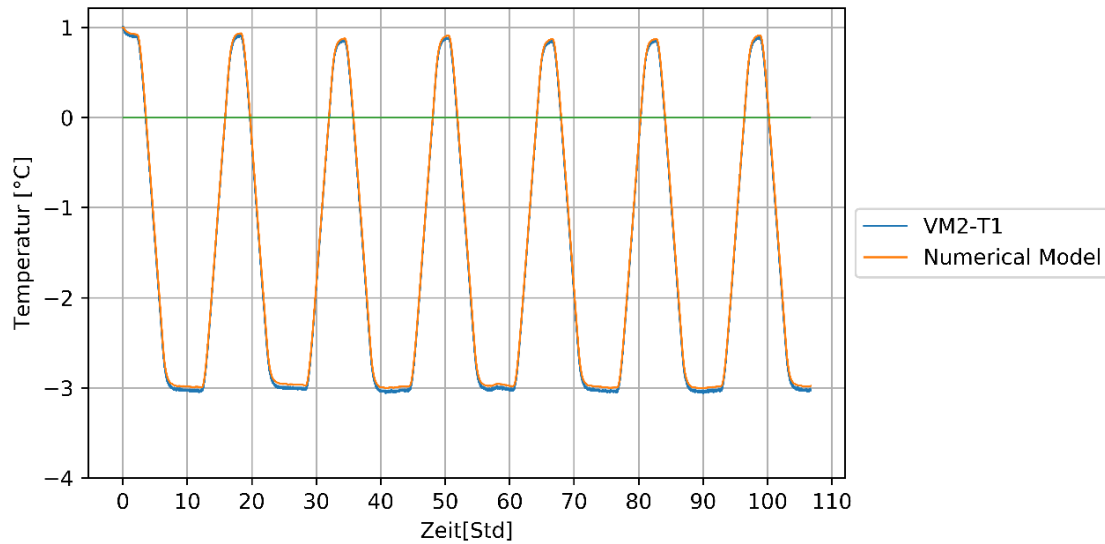


Abbildung 27: Versuch VM2-T1: Gegenüberstellung Messergebnisse (oranger Graph) und Ergebnisse der numerischen Simulation ohne Phasenwechsel (blauer Graph)

Abbildung 28 zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 27 für einen 15 stündigen Abschnitt.

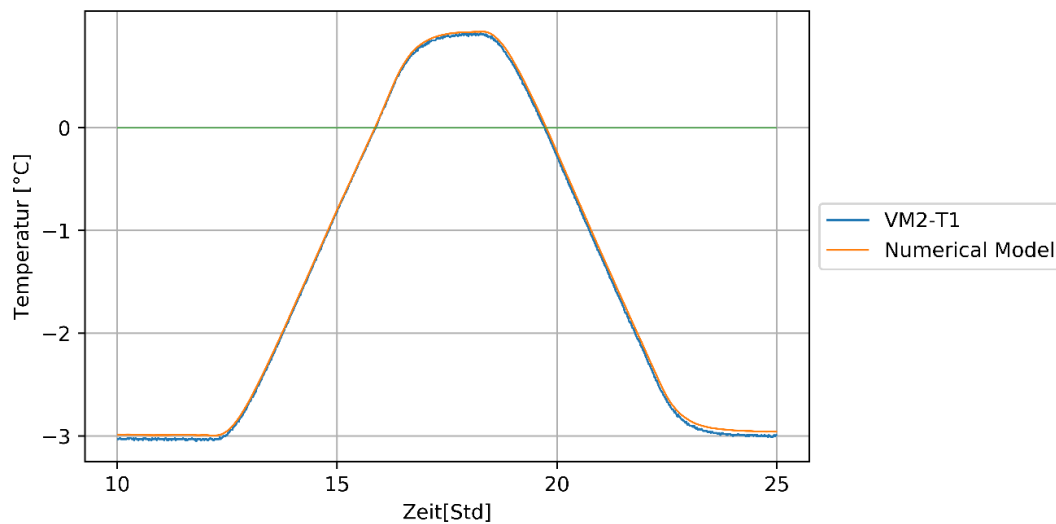


Abbildung 28: Versuch VM2-T1 ohne Phasenwechsel (15-Stunden Abschnitt)

Abbildung 29 zeigt einen Vergleich zwischen dem Experiment VM2-T4 und den Ergebnissen des numerischen Modells.

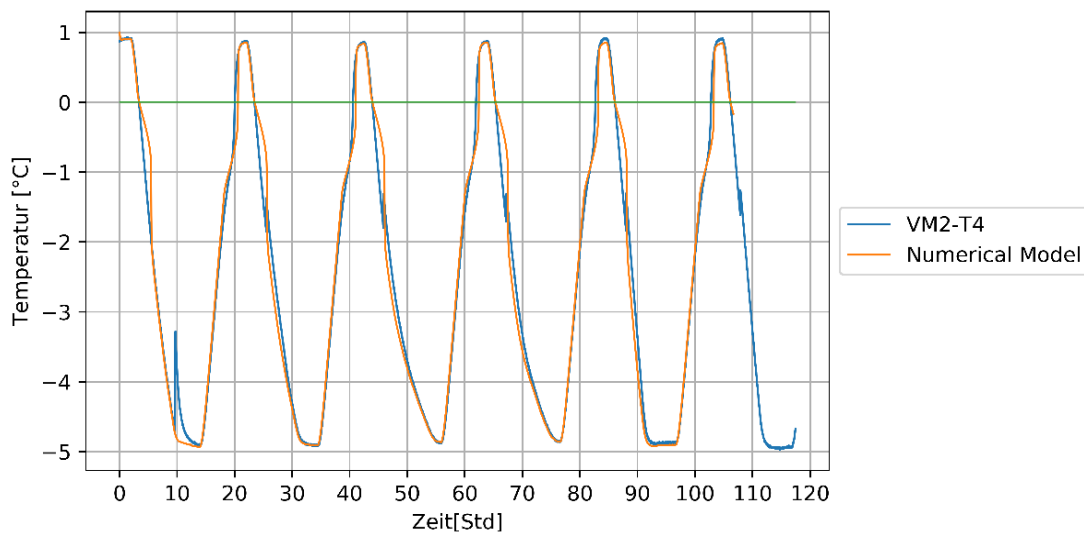


Abbildung 29: Versuch VM2-T4: Gegenüberstellung Messergebnisse und Ergebnisse der numerischen Simulation (mit Phasenwechsel)

Es wurde festgestellt, dass die Nukleation und die Supercooling-Effekte diskrete Temperaturspitzen verursachen können. Die Literatur zeigt, dass diese Effekte in kohäsiven porösen Medien wie Ton und Beton auftreten, wo die Gefrieretemperatur in der Regel unter  $0^\circ$  liegt. Während der Abkühlung sinkt die Temperatur unter die Gefrieretemperatur des Materials, bis sie die Nukleationstemperatur erreicht, bei der die Temperatur aufgrund der latenten Wärme wieder auf die Gefrieretemperatur ansteigt.

Abbildung 30 zeigt den Unterkühlungseffekt beim Abkühlen von Ton, wobei  $T_f$  die Gefrieretemperatur und  $T_n$  die Nukleationstemperatur ist.

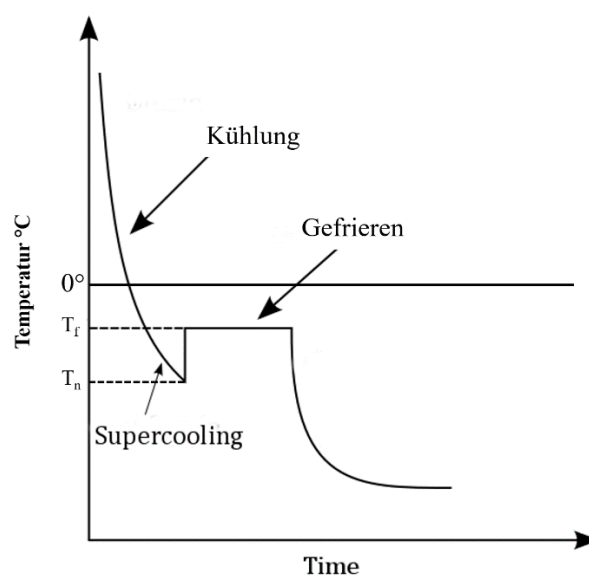


Abbildung 30: Supercooling und Nukleation



Diese Effekte sind nur im Phasenwechselprozess während der Abkühlphase vorhanden, wobei diese Spitzen im Experiment auch während des Auftauprozesses bei einer Temperatur unterhalb der Phasenwechseltemperatur festgestellt wurden.

Abbildung 31 zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 29 für einen 20 stündigen Zeitraum.

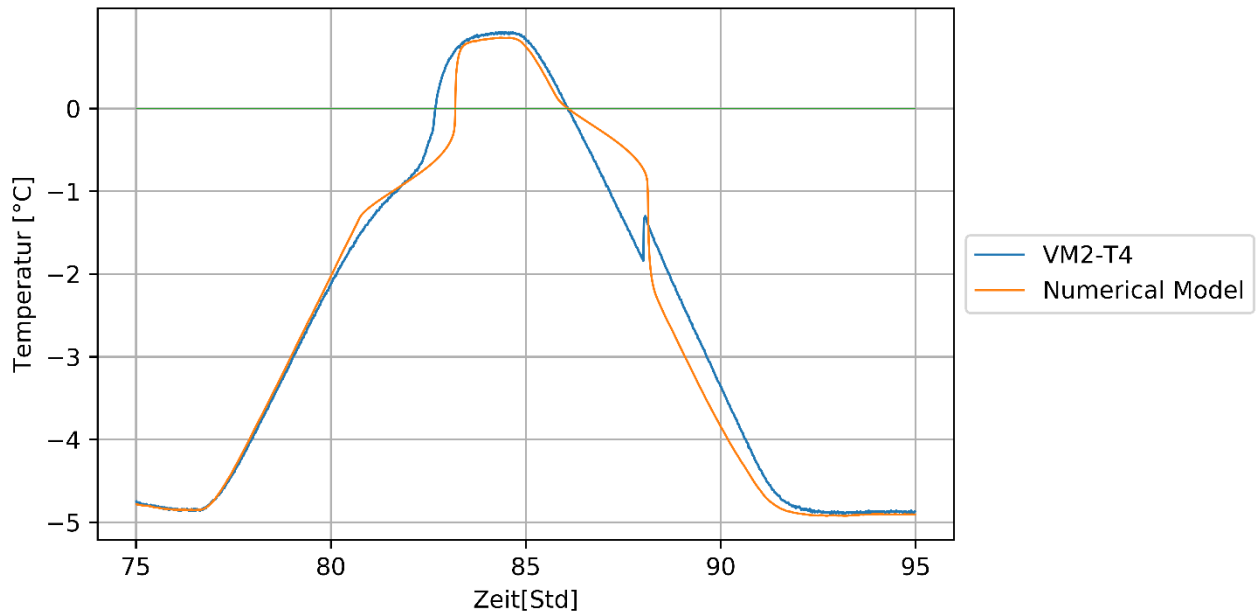


Abbildung 31: Versuch VM2-41 mit Phasenwechsel (20-Stunden Abschnitt)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das numerische Modell zwar die Phasenumwandlungseffekte simulieren kann, aber aufgrund der noch nicht verstandenen Effekte, die zu scheinbar zufälligen Zeitpunkten während der Abkühlungs- und der Auftauphase auftreten, kann nur die Temperatur angenommen werden, bei der die Phasenumwandlung stattfinden würde. Diese Temperatur muss für die Gefrier- und die Auftauphase gleich sein, was im Experiment jedoch nicht der Fall ist.

Es wurde auch festgestellt, dass das Übergangsintervall, in dem die latente Wärme abgegeben wird, zwischen den beiden Phasen unterschiedlich ist, obwohl der Temperaturunterschied für beide Programme (Gefrieren und Auftauen) gleich ist.

Daher konnte kein genaueres Modell erstellt werden, und es sind weitere Forschungen erforderlich, um das „Supercooling“ und die Nukleationseffekte zu verstehen, was den Rahmen dieses Arbeitspakets übersteigt.

### 9.3 AP 3a: Erstellung und Auswahl geeigneter Simulationsmodelle (Solites)

#### Ziel

Im Rahmen einer Simulationsstudie (s. AP 3b) sollte untersucht werden, bis zu welcher minimalen Vorlauftemperatur in Erdwärmesonden auch unter ungünstigen Bedingungen von einer Frostfreiheit des Verfüllbaustoffs und des Gebirges ausgegangen werden kann. Zu diesem Zweck wurden in der Simulationsstudie zahlreiche Parameter (u.a. Sondenrohrpositionen, Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds und der Verfüllmaterialien, Temperaturspreizung der Erdwärmesonde etc.) variiert.

In diesem Arbeitspaket wurde in einem ersten Schritt nachgewiesen, dass die Durchführung einer Simulationsstudie mit 2D-Simulationen möglich ist. Außerdem sollte gezeigt werden, dass für eine Betrachtungstiefe von 4 m näherungsweise dieselben Temperaturen herrschen wie am Sonderein- und austritt an der Geländeoberkante (GOK).

### Rahmenbedingungen

Es wird die Annahme getroffen, dass die Wärmepumpenaustrittstemperatur von  $-3^{\circ}\text{C}$  der Eintrittstemperatur der Erdwärmesonde entspricht.

Die Betrachtungstiefe von 4 m ergibt sich aus zwei Gründen: Unter thermischen Gesichtspunkten ist die Worst-Case-Betrachtungstiefe nahe der Oberfläche, denn je geringer die Betrachtungstiefe ist, desto geringer ist die Temperatur in der kalten Zulaufleitung. Es ist davon auszugehen, dass in 4 m Tiefe die Temperatur in der kalten Zulaufleitung näherungsweise der Erdwärmesondeneintrittstemperatur entspricht (maximale Abweichung ca. 0,2 K).

Um den Nachweis zu führen, wurden zunächst Simulationen mit einem voll ausdiskretisierten 3D-Modell durchgeführt. Modelliert wurden typische 2-U-Erdwärmesonden (EWS) (PE-100 Sondenrohre der Maße 32 x 2,9 mm) mit einem Bohrllochdurchmesser von 150 mm, welche mit folgenden Bedingungen betrieben wurden:

- EWS-Eintrittstemperatur =  $-3^{\circ}\text{C}$  = Verdampferaustrittstemperatur der Wärmepumpe
- Langfristiger Dauerbetrieb der Erdwärmesonden über 8 Wochen
- Turbulente Durchströmung der Erdwärmesonden mit konstantem Volumenstrom (Re-Zahl = 4000 unter Verwendung der Stoffwerte eines 20 %igen Wasser-Glykol-Gemischs bei  $-1,5^{\circ}\text{C}$ )
- Einheitliche effektive Untergrund-Wärmeleitfähigkeit von  $1\text{ W/(mK)}$
- Einheitliche initiale Bodentemperatur von  $10^{\circ}\text{C}$
- Zwei verschiedene Werte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Verfüllmaterials von 0,8 bzw.  $3,0\text{ W/(mK)}$ , die als Extremwerte der möglichen EWS-Verfüllbaustoffe dienen.

#### 9.3.1 Numerische Modellierung

Die Modellierung erfolgte mit dem Finite Elemente Programm FEFLOW v. 7.1 (update 1) und FEFLOW v. 7.3 (update 3) von DHI WASY GmbH. Die zugrundeliegende Numerik kann in [34] und [35] nachvollzogen werden. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden weder eigene Stoffgesetze entwickelt noch die Berechnungsmethoden von FEFLOW bearbeitet. Die Modelle wurden durch den in FEFLOW implementierten Algorithmus „GridBuilder“ zum Erstellen von Gitternetzen erzeugt und beinhalten rund 610.000 Polygon-Elemente für die 3D-Modellierung. Aufgrund der Netzgenerierungsmethode und der spezifisch gewählten Elementanzahl der einzelnen Komponenten, kann die Bohrlochgeometrie visuell gut nachvollzogen werden.

Als geometrische Variante wurde eine Einzel-EWS im nahezu unendlich ausgedehnten Untergrund mit einer symmetrischen Sondenrohranordnung wie in Abbildung 32 angesetzt. Dabei bleiben die Sondenrohrpositionen einheitlich über die gesamte Tiefe. Für die Worst-Case-Betrachtung wurde zudem entschieden, dass die EWS ohne Verpressrohr modelliert wird, um den direkten Kontakt der Sondenrohre zueinander zu ermöglichen. Abbildung 32 zeigt die verwendete Sondenrohranordnung die im folgenden Arbeitspaket (AP 3b) unter Geometrie „c“ geführt wird. Diese Konfiguration wurde gewählt, da sie aufgrund der maximierten Entfernung

zwischen Vor- und Rücklauf als Worst-Case-Geometrie in Bezug auf die minimale Temperatur in Hinterfüllung und Geologie angenommen wurde.

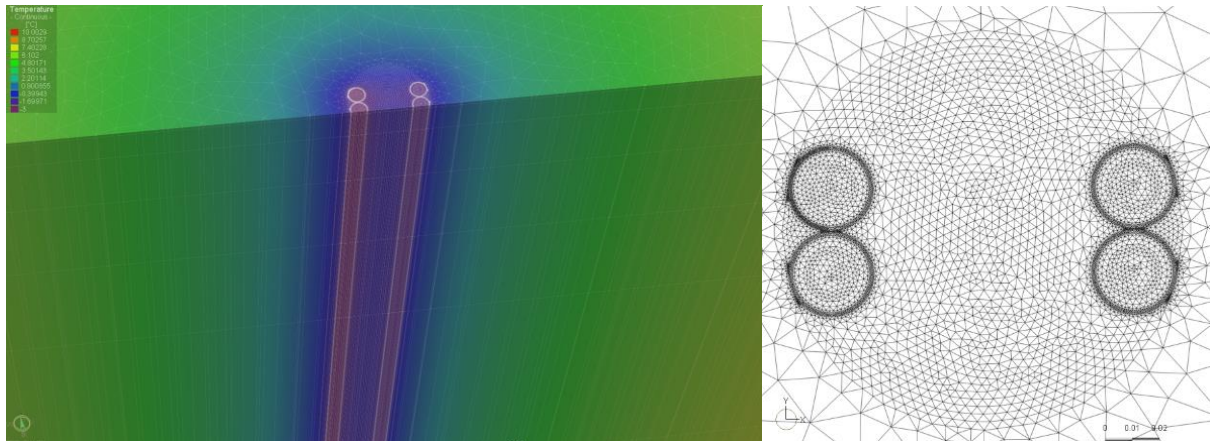


Abbildung 32: Draufsicht von schräg oben auf das 3D-FEFLOW-Simulationsmodell mit Vertikalschnitt durch den vorderen Sondenkreislauf (links). Geometrie c im horizontalen 2D-Schnitt (rechts)

### 3D-Modell

In Abbildung 33 ist links eine 3D-Ansicht des Modells dargestellt. Die vertikale Ausdehnung in Z-Richtung beträgt 40 m. Die mittlere Abbildung zeigt die Draufsicht auf die oberste Ebene des Modells. Die horizontale Ausdehnung des Modellzylinders beträgt 40 m. Die Erdwärmesondenbohrung mit einem Durchmesser von 15 cm (rechte Abbildung) befindet sich im Modellzentrum und hat eine Tiefe von 30 m. Die Dimensionen wurden so gewählt, dass mögliche Einflüsse von Randeffekten minimiert sind und daher vernachlässigt werden können. Um eine möglichst detaillierte Temperaturentwicklung im Bereich des Bohrlochs abbilden zu können, wurde das Berechnungsnetz vom Modellrand hin zum Bohrloch kontinuierlich verfeinert.

Das Modell besteht aus 31 Ebenen mit einer Höhe von 0,01 m bis 4 m. An allen Knotenpunkten der obersten Ebene (ausgenommen die Knotenpunkte des Vor- und Rücklaufs), der untersten Ebene sowie an der Mantelfläche des Berechnungsmodells wurden adiabatische Temperaturrandbedingungen vorgegeben. Die Materialeigenschaften können Tabelle 9 entnommen werden.

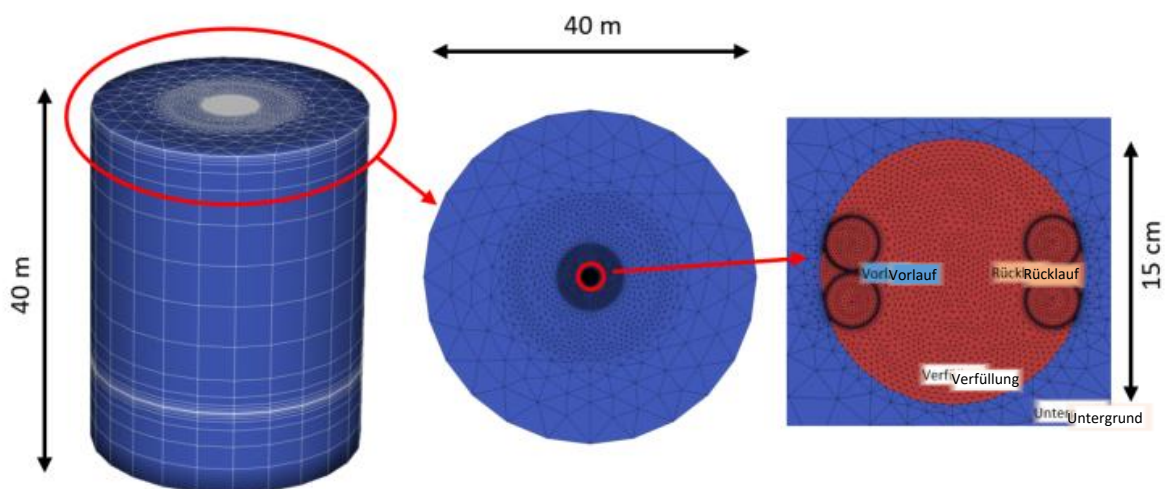


Abbildung 33: Darstellungen des Simulationsmodells. Links: 3D-Modell. Mitte: Draufsicht auf oberste Ebene. Rechts: Modellzentrum mit Bohrloch, Verfüllung und Erdwärmesonden-Vor- und Rückläufen

Tabelle 9: Materialparameter

	PE Rohre	Untergrund	Hinterfüllung	
Wärmeleitfähigkeit	0,3294	1	0,8 und 3,0	W/(mK)
Wärmekapazität	1,62	2,52	2,17	MJ/(m³K)

FEFLOW ist kein CFD-Programm und kann die strömungsmechanischen Vorgänge durch die Sondenrohre nicht numerisch berechnen. Der Wärmetransport durch den EWS-Kreislauf erfolgt daher durch sogenannte „Discrete-Feature-Elemente (DFE)“. Dies sind zweidimensionale Finite-Elemente-Objekte („Linielemente“), die zusätzlich in das 3D-Gitternetz eingesetzt werden. FEFLOW stellt solche Elemente zur Verfügung, um schmale Objekte wie Tunnel, Rohre, Abflüsse, Verwerfungen oder Brüche darzustellen, die in einem weit ausgedehnten Raum eher Merkmale von zweidimensionalen Formen erfüllen. Je ein vertikales Linielement befindet sich im Zentrum jedes Sondenrohres (Abbildung 34). In 30 m Tiefe erfolgt die Übergabe zwischen beiden Vor- und Rückläufen durch horizontale Linielemente, sodass die beiden Schleifen der Doppel-U-Sonde entstehen. Den diskreten Linielementen werden alle nötigen Parameter zugewiesen, um die Strömung des Wärmeträgermediums in der Doppel-U-Sonde darzustellen (Tabelle 10). Die Übergabe der Wärme von den DFEs auf die Innenseite der PE-Sondenrohre erfolgt durch eine extrem hohe horizontale Wärmeleitfähigkeit des Matrixmodells im Inneren der Sondenrohre, wohingegen die vertikale Temperaturleitung unterbunden wird.

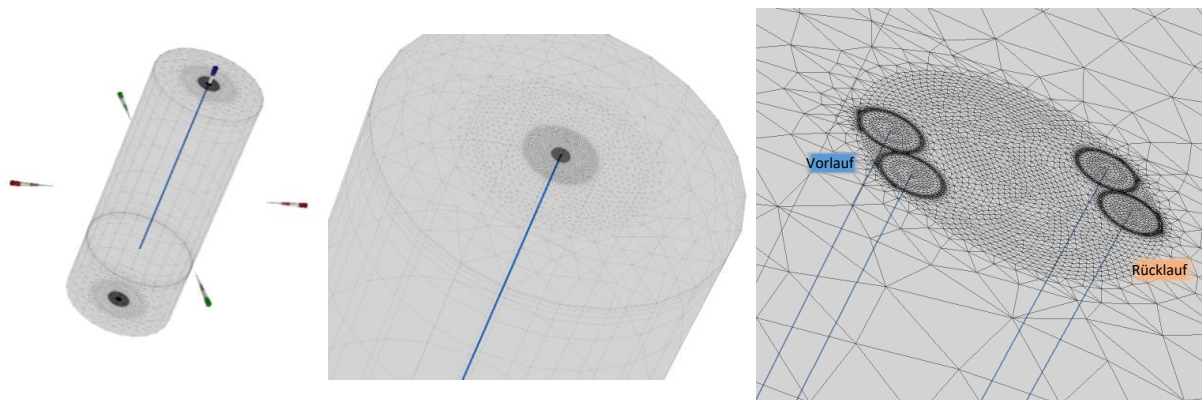


Abbildung 34: Ansicht in das halbdurchsichtige 3D-Modell von schräg oben in drei Zoom-Stufen von links nach rechts. Die Wärmeübertragung erfolgt mittels diskreter Linielemente (blaue Linien) die sich im Zentrum der Sondenrohre befinden

Tabelle 10: Eigenschaften der 2D-Discrete-Feature-Elemente (DFE) zur Temperaturübertragung in den Sondenrohren

Querschnittsfläche	0,00054	m <sup>2</sup>
Hydraulische Apertur	0,016	m
Spezifische Speicherung (Kompressibilität)	0	1/m
Ausdehnungskoeffizient	0	1/K
Volumetrische Wärmekapazität des Wärmeträgers	4,047	MJ/(m³K)
Wärmeleitfähigkeit (WLF) des Wärmeträgers	0,498	W/(mK)
Dispersivität in Längs-/Transversalrichtung	0	m

Um zu überprüfen, ob die Dimensionierung des Modells ausreicht, wurden zwei Simulationen mit minimaler und maximaler Wärmeleitfähigkeit von Hinterfüllung und Untergrund durchgeführt. In Abbildung 35 ist die Endtemperatur an der Modelloberfläche nach 56 Tagen dargestellt. Es fällt auf, dass keine Temperaturabsenkung am Modellrand stattfindet. Werden der Hinterfüllung und dem Untergrund niedrige Wärmeleitfähigkeiten zugeordnet, hat der von den Sonden beeinflusste Bereich einen ca. 12 m großen Radius um die EWS (Abbildung 35, rote Linie). Für hohe Leitfähigkeiten beträgt der Radius ca. 17 m.

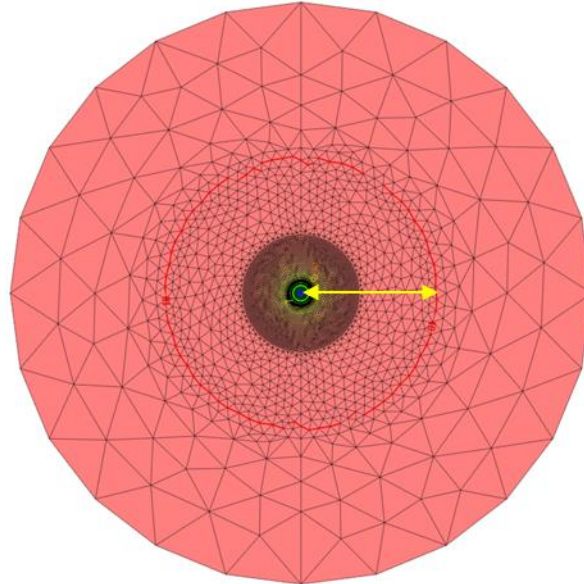


Abbildung 35: Darstellung der Temperaturschichtung nach 56 Tagen. Rote Linie: 10 °C-Isolinie; Gelber Pfeil: Symbolisiert den Radius der maximalen Temperaturbeeinflussung durch den Sondenbetrieb.

## 2D-Modell

Für das 2D-Modell wird dasselbe Gitternetz verwendet, aus dem die einzelnen Ebenen des 3D-Modells bestehen. (Abbildung 36, links, Mitte). Das 2D-Modell stellt ein horizontales Schnitt durch das 3D-Modell in 4 m Tiefe dar und beinhaltet 22.000 Elemente.

2D- und 3D-Modell unterscheiden sich im Wesentlichen durch die thermischen Randbedingungen der Vor- und Rückläufe. Der Wärmetransport auf das Modell erfolgt, anders als im 3D-Modell, nicht durch DFEs sondern durch feste Temperaturrandbedingungen im Vor- und Rücklauf (Abbildung 36, rechts). Die Temperaturrandbedingungen werden durch die Endtemperaturen in den Sondenrohren der 3D-Simulation nach 56 Tagen bestimmt.

Um den Wärmübergang zwischen der turbulenten Strömung des Fluids auf das PE-Material abzubilden, wird dem Material der PE-Sondenrohre eine angepasste Wärmeleitfähigkeit zugeordnet, die sich aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von  $728,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , der Wärmeleitfähigkeit des PEs von  $0,43 \text{ W}/(\text{mK})$  und einer Wandstärke von  $0,29 \text{ mm}$  ergibt. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde gemäß VDI-Wärmeatlas [36] nach anerkannter Nußelt-Korrelation berechnet. Für den in der Simulation angesetzten Volumenstrom von  $1.135 \text{ L/h}$  des 20 %igen Wasser/Glykol-Gemischs und einem Innendurchmesser der Rohre von  $26,2 \text{ mm}$  ergibt sich damit eine angepasste Wärmeleitfähigkeit von  $0,329 \text{ W}/(\text{mK})$  für das PE-Material. Der Volumenstrom von  $1.135 \text{ L/h}$  entspricht einer Reynolds-Zahl (Re-Zahl) von  $4.000$ .

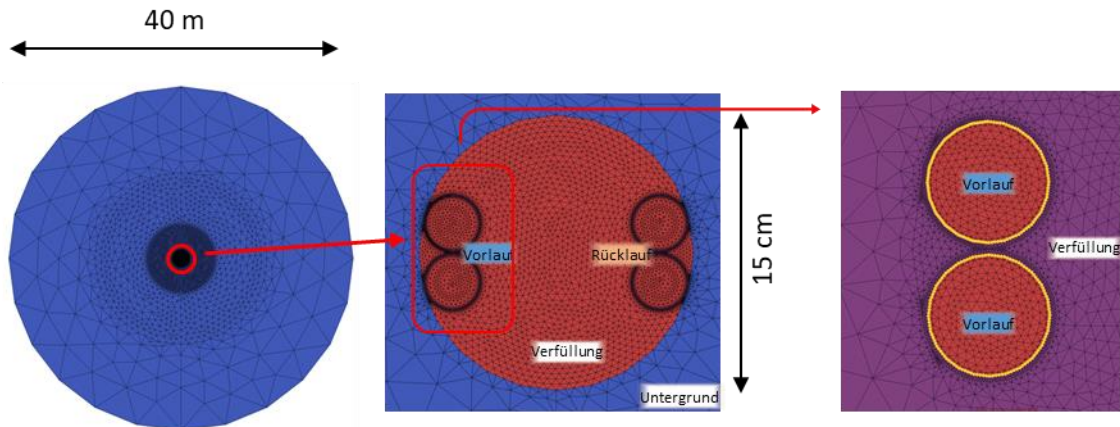


Abbildung 36: links, Mitte: Darstellung des 2D-Modells mit den Abmessungen; Rechts: Thermische Randbedingung (gelb) an der Innenseite der Sondenrohre

### 9.3.2 Ergebnisse

Ein Ziel der 3D-Simulation ist zu zeigen, wie sehr sich die Temperaturen des Wärmeträgermediums in den Sonden an der Geländeoberkante (GOK) von denen in 4 m Tiefe unterscheiden. Durch die neuen 3D-Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Fluidtemperaturen des Wärmeträgermediums in der Betrachtungstiefe von 4 m gegenüber der GOK maximal um 0,026 K im Vorlauf bzw. 0,005 K im Rücklauf abweichen, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK) (Abbildung 37) beträgt. Als Kriterium wurde eine maximale Abweichung von 0,2 K angenommen.

Für die Variante mit einer Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von 3 W/(mK) ergeben sich Abweichungen von lediglich 0,020 K im Vorlauf bzw. 0,005 K im Rücklauf (Abbildung 38).

Die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds, die geringe Sondenlänge, sowie der hohe Volumenstrom ( $Re$ -Zahl = 4.000) führen zu einer relativ geringen Gesamttemperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf von 0,24 K an der GOK bei einer WLF der Hinterfüllung von 0,8 W/(mK) bzw. 0,26 K bei einer WLF von 3,0 W/(mK).

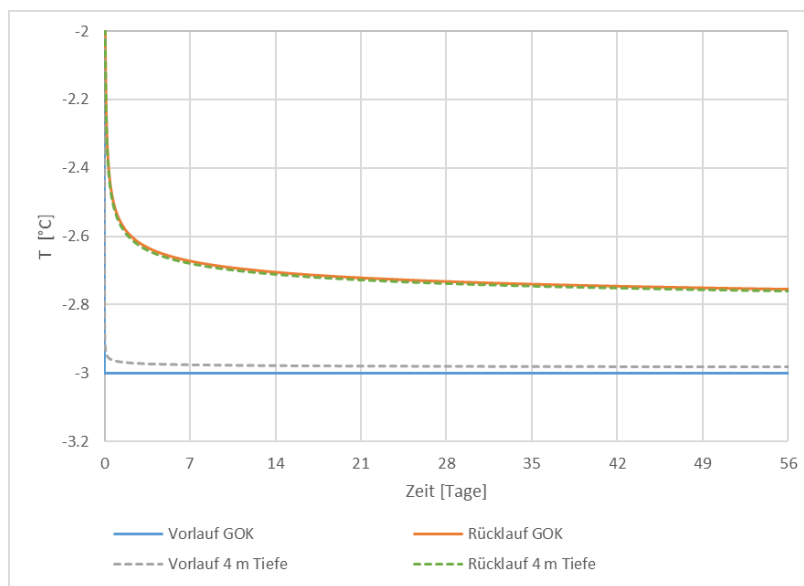


Abbildung 37: Temperaturentwicklung im 3D-Modell bei einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Hinterfüllung von 0,8 W/(mK)

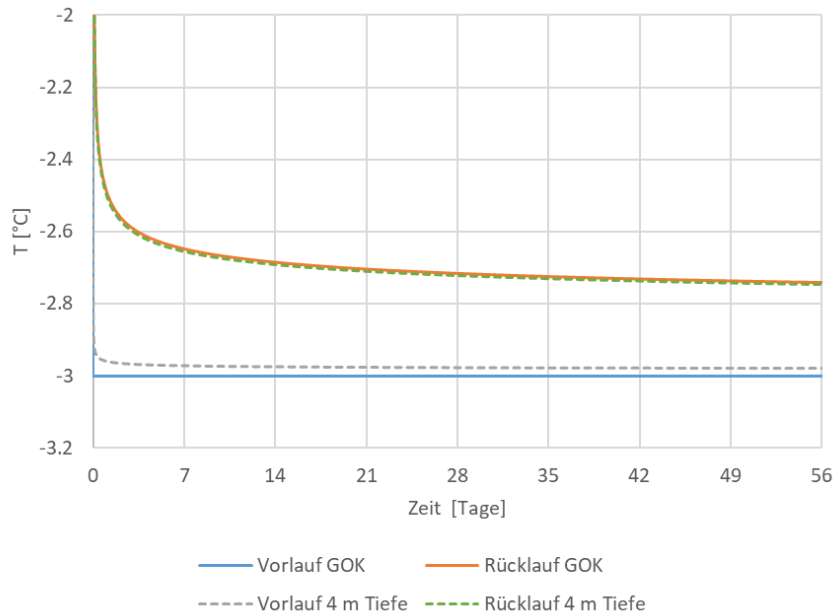


Abbildung 38: Temperaturentwicklung im 3D-Modell bei einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Hinterfüllung von 3 W/(mK)

### Vergleich von 2D- und 3D-Modell

Der Vergleich der beiden Modellansätze wird anhand von an ausgewählten Stellen gesetzten Beobachtungspunkten gezogen. An diesen Beobachtungspunkten wurde die Temperatur nach dem Simulationszeitraum von 56 Tagen ausgelesen. Abbildung 39 zeigt die Beobachtungspunkte, die in verschiedenen Kategorien unterteilt sind: „Vor- und Rücklauf“ zeichnet die Temperaturen des Wärmeträgers auf; „Sondenrohre“ zeichnet die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen PE-Material und Hinterfüllung auf; „Hinterfüllung“ ist für die Beurteilung der Temperaturverteilung der Hinterfüllung; „Bohrlochwand“ zeichnet die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen Untergrund und Hinterfüllung auf; zusätzlich wird ein Temperaturpunkt im „Untergrund“ in 4 cm Entfernung zum Bohrloch gesetzt.

Am Ende des achtwöchigen Simulationszeitraums zeigt der Vergleich von 2D- und 3D-Modell eine hohe Übereinstimmung der Temperaturen an allen in Abbildung 39 dargestellten Beobachtungspunkten. Anhand der in Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgeführten Endtemperaturen für 2D- und 3D-Modell können ausgewählte Beobachtungspunkte miteinander verglichen werden.

Die niedrigsten Temperaturen treten an der Kontaktfläche zwischen Sondenrohren des Vorlaufs und Umgebungsmaterial auf. Die Beobachtungspunkte an den Kontaktflächen sind in Abbildung 39 mit schwarzen Fähnchen markiert. Da der Punkt *B2* sowohl den Kontakt zwischen PE-Rohr und Bohrloch als auch den Kontakt zwischen Bohrloch und Untergrund darstellt, wird dieser als kritischster Punkt angesehen. Der Punkt *U1* befindet sich 4 cm horizontal vom Bohrloch entfernt, wo mit einer Temperatur von weniger als  $-1\text{ °C}$  dort immer noch negative Temperaturen herrschen. Punkt *H1* befindet sich mittig zwischen Vor- und Rückläufen und zeigte ebenfalls negative Temperaturen.

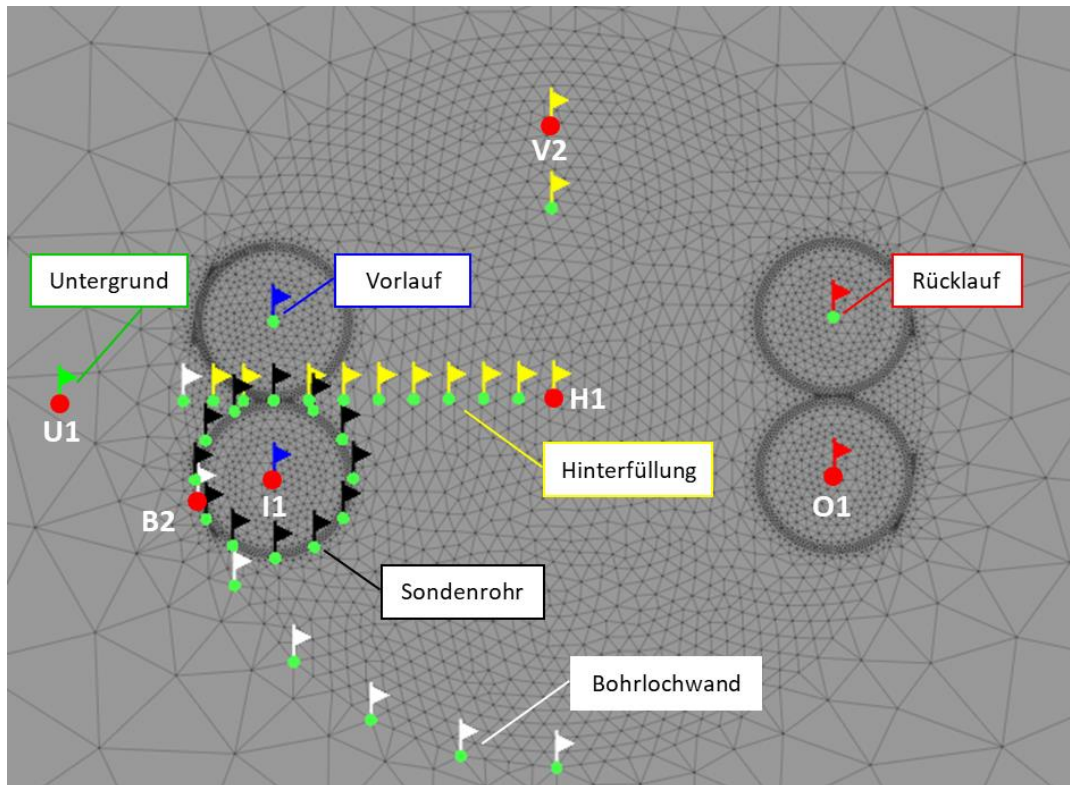


Abbildung 39: Beobachtungspunkte zur Temperatursauslesung für den Vergleich von 2D- und 3D-Modell. Die Temperaturen der rot markierten Beobachtungspunkte werden für den Vergleich in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt.

Am Ende des achtwöchigen Simulationszeitraums zeigt der Vergleich von 2D- und 3D-Modell eine hohe Übereinstimmung der Temperaturen an allen in Abbildung 39 dargestellten Beobachtungspunkten. Anhand der in Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgeführten Endtemperaturen für 2D- und 3D-Modell können ausgewählte Beobachtungspunkte miteinander verglichen werden.

Die niedrigsten Temperaturen treten an der Kontaktfläche zwischen Sondennrohren des Vorlaufs und Umgebungsmaterial auf. Die Beobachtungspunkte an den Kontaktflächen sind in Abbildung 39 mit schwarzen Fähnchen markiert. Da der Punkt *B2* sowohl den Kontakt zwischen PE-Rohr und Bohrloch als auch den Kontakt zwischen Bohrloch und Untergrund darstellt, wird dieser als kritischster Punkt angesehen. Der Punkt *U1* befindet sich 4 cm horizontal vom Bohrloch entfernt, wo mit einer Temperatur von weniger als  $-1\text{ °C}$  dort immer noch negative Temperaturen herrschen. Punkt *H1* befindet sich mittig zwischen Vor- und Rückläufen und zeigte ebenfalls negative Temperaturen.

Tabelle 11: Temperaturen in  $^{\circ}\text{C}$  an ausgewählten Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei  $\lambda_{\text{Hinterfüllung}} = 0,8\text{ W/(mK)}$  (vergl. rote Punkte in Abbildung 39)

Beobachtungspunkt	I1	O1	B2	H1	U1	V2
2D-Modell	-3,000	-2,761	-2,547	-2,090	-1,088	-1,092
3D-Modell	-3,000	-2,761	-2,542	-2,077	-1,066	-1,076
Abweichung	0,000	0,000	0,005	0,014	0,022	0,016



Tabelle 12: Temperaturen in °C an ausgewählten Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei  $\lambda_{\text{Hinterfüllung}} = 3,0$  W/(mK) (vergl. rote Punkte in Abbildung 39)

Beobachtungspunkt	I1	O1	B2	H1	U1	V2
2D-Modell	-3.000	-2.747	-2.667	-2.368	-1.444	-1.949
3D-Modell	-3.000	-2.747	-2.662	-2.353	-1.421	-1.933
Abweichung	0.000	0.000	0.005	0.014	0.023	0.015

Der Vergleich zeigt, dass es eine ausreichend hohe Übereinstimmung zwischen den 2D- und 3D-Modellen gibt. Mit einer maximalen Abweichung von 0,023 K im Untergrund in horizontaler Richtung 4 cm entfernt zum Bohrloch, ist der Nahbereich um das Bohrloch hinreichend genau abgebildet. Im Bohrloch selbst liegen die Abweichungen bei maximal 0,015 K. Eine Parametervariation in einer 2D-Simulation ist einer 3D-Variante aufgrund dieser ausreichend geringen Abweichungen vorzuziehen, da der Rechen- und Modellierungsaufwand erheblich reduziert wird. Durch die Reduktion auf ein zweidimensionales Problem, wird eine Simulationsstudie mit mehreren hundert Varianten ermöglicht, wohingegen bei einer Durchführung in 3D nur einzelne Varianten betrachtet werden können.

#### 9.4 AP 3b: Simulationsstudie mit Parametervariation zur Identifikation der kritischen Fälle (Solites)

Im Rahmen einer Simulationsstudie sollte untersucht werden, bis zu welcher minimalen Zulaufemperatur in Erdwärmesonden auch unter ungünstigen Bedingungen von einer Frostfreiheit des Verfüllbaustoffs und des Gebirges ausgegangen werden kann. Zu diesem Zweck wurden in der Simulationsstudie zahlreiche Parameter (u.a. Sondenrohrpositionen, Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds/der Verfüllmaterialien, Temperaturspreizung der Erdwärmesonde etc.) variiert. Als Ergebnis jeder einzelnen Simulation wurde die am Simulationsende minimal im Verfüllmaterial und im Untergrund auftretende Temperatur ermittelt.

##### Rahmenbedingungen

Für die Variantenbetrachtung wurden folgende Parameter herangezogen:

- einheitliche initiale Starttemperatur des Untergrunds von 10 °C
- Als Eintrittstemperatur in den kalten Sondenrohren wird jeweils ein Wert von -3 °C verwendet.

Bei den Variantenbetrachtungen wurden die folgenden Parameter-Kombinationen untersucht.

- 2-U-EWS PE 32 x 2,9 mm
- Effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds (keine direkte Berücksichtigung von Konvektion): 1 – 2 – 3 W/(mK)
- Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials: 0,8 – 1,5 – 2 W/(mK)
- Bohrlochdurchmesser: 150 mm
- Festlegung der Spreizung zwischen Zu- und Rücklauf als Synonym für die EWS-Länge: 1 – 2 – 3 K
- Sondenrohranordnung a, b und c wie in Abbildung 40 dargestellt
- Der EWS-Volumenstrom wird so gewählt, dass  $Re = 3.000 - 4.000 - 5.000$  beträgt.

Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in den Sondenrohren wurden gemäß des VDI-Wärmeatlas [36] nach anerkannter Nußelt-Korrelationen berechnet.

### 9.4.1 Numerische Modellierung

In AP 3a wurde bestätigt, dass die Betrachtung in der Parameterstudie mit 2D-Simulationen für eine Betrachtungstiefe von 4 m unter GOK durchgeführt werden kann.

Für die Parameterstudie sind insgesamt 243 Varianten untersucht worden. Um die Parametereingabe für die große Anzahl an Varianten zu ermöglichen, wurde ein Python-Skript erstellt, welches dem Simulationsmodell beliebige Eingabeparameter zuweisen kann und die Simulation sowie die Datenausgabe automatisiert. Simuliert wurden die Varianten mit den Geometrien „a, b und c“ (Abbildung 40) und den Eingabeparametern laut Tabelle 13.

Tabelle 13: Eingabeparameter für Stoffwerte der Parameterstudie (\* $\lambda_{\text{Ersatz-PE-Rohr}}$  Abhängigkeit von Re-Zahl und bestimmt durch Nußelt-Korrelation nach VDI Wärmeatlas [36])

Re-Zahl [-]	* $\lambda_{\text{Ersatz-PE-Rohr}}$ [W/(mK)]	$\lambda_{\text{Untergrund}}$ [W/(mK)]	$\lambda_{\text{Verfüllmaterial}}$ [W/(mK)]	Spreizung [K]	Sondenanordnung
3.000	0,282	1	0,8	1	a
4.000	0,329	2	1,5	2	b
5.000	0,350	3	2	3	c

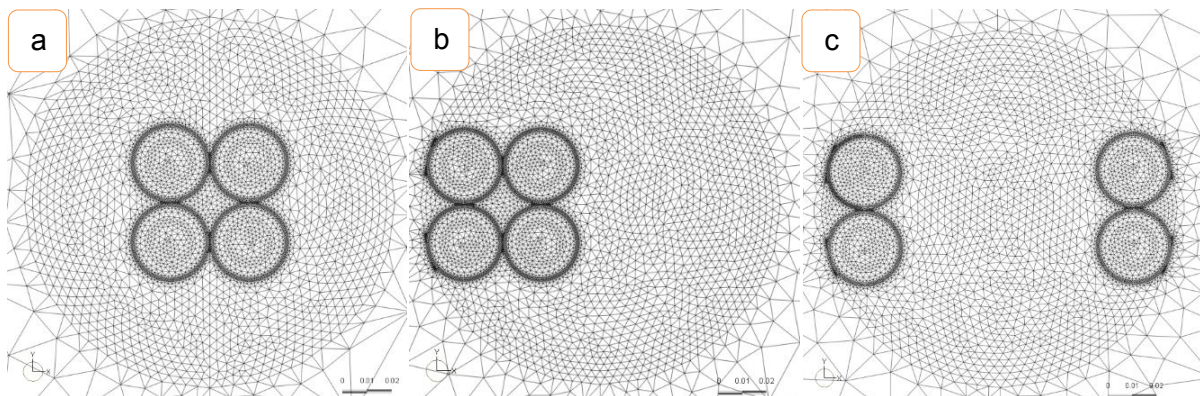


Abbildung 40: Bohrlochgeometrie der 2D-Modelle mit den drei untersuchten Sondenanordnungen (a, b, c) der Parameterstudie.

Die erzeugten Datensätze aus den Simulationen müssen nach den Minimaltemperaturen an bestimmten Beobachtungspunkten gesichtet werden. Um dies zu ermöglichen wurde ein Python-Skript entwickelt, welches mit dem FEFLOW-Ausgabeformat kompatibel ist und die Minimaltemperaturen automatisiert ausliest.

### 9.4.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt zunächst nacheinander für die drei Geometrien *a*, *b* und *c*. Anschließend wird ein Vergleich zwischen den drei Geometrien gezogen. Da die Darstellung aller Beobachtungspunkte den Rahmen sprengen und nicht zum Verständnis beitragen würde, beschränkt sich die Darstellung auf einige repräsentative Beobachtungspunkte. Bei diesen handelt es sich um zwei Punkte an der Bohrlochwand *B1* und *B2*, zwei Punkte an der Grenzschicht von Verfüllung und Sonde *PE1* und *PE5*, den Punkt *H6* in der Verfüllung, und *U1* im Untergrund, 4 cm vom Bohrloch entfernt. Die Positionen der Beobachtungspunkte

der Sondenrohre PE ändern sich in den drei Geometrien, die übrigen Punkte sind in allen Varianten am selben Ort.

In Tabelle 14 sind alle simulierten Varianten in einer Untersuchungsmatrix aufgeführt. Auch hier werden nicht alle Ergebnisse dargestellt, sondern es findet eine Beschränkung auf die Worst-Case-Szenarien und auffällige Ergebnisse statt. Über einen Vergleich der minimalen Temperaturen an den Beobachtungspunkten kann herausgefunden werden, welche Parameter einen maßgeblichen Einfluss haben. Da die Frostfreiheit der EWS das Ziel ist, sind die minimalen Temperaturen maßgeblich für die kritischen Fälle.

Tabelle 14: Untersuchungsmatrix mit allen simulierten Varianten

Geometrie Spreizung [K] Re-Zahl [-]		a			a			a			b			b			b			c			c					
		1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3
[W/mK]		3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000
$\lambda_{\text{Verfüllmateri}}$	$\lambda_{\text{Untergrund}}$																											
0.8	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
1.5	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
0.8	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
1.5	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
0.8	3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
1.5	3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2	3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

**Geometrie a**

Tabelle 15 zeigt die Varianten mit der Parameterkonstellation, bei der die minimalen Temperaturen an den ausgewählten Beobachtungspunkten auftreten (rote Kreise in Abbildung 41). Es fällt auf, dass für alle Varianten eine geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund zu minimalen Temperaturen führt. Geringe Wärmeleitfähigkeiten der Verfüllung führen demnach bei dieser Sondenordnung zu niedrigen Temperaturen in der EWS. Dagegen ist eine hohe Leitfähigkeit der Verfüllung ungünstig für die Temperaturen im Bohrloch und im Untergrund. Für alle Varianten ist die kleinste Spreizung von 1 K der ungünstigste Fall. Ebenso gilt, dass ein hoher Volumenstrom und damit die hohe Reynolds-Zahl von 5.000 die niedrigsten Temperaturen an den Beobachtungspunkten verursachen.

Tabelle 15: Minimale Temperaturen an Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei Geometrie a

Punkt	RE-Zahl	$\lambda_{\text{Untergrund}}$ [W/(mK)]	$\lambda_{\text{Verfüllmaterial}}$ [W/(mK)]	Spreizung [K]	Temperatur [°C]
U1	5000	1	2	1	-0,093
B1	5000	1	2	1	-1,083
B2	5000	1	2	1	-1,086
B7	5000	1	2	1	-0,802
H6	5000	1	2	1	-2,475
PE5	5000	1	0,8	1	-2,635
PE1	5000	1	0,8	1	-2,999

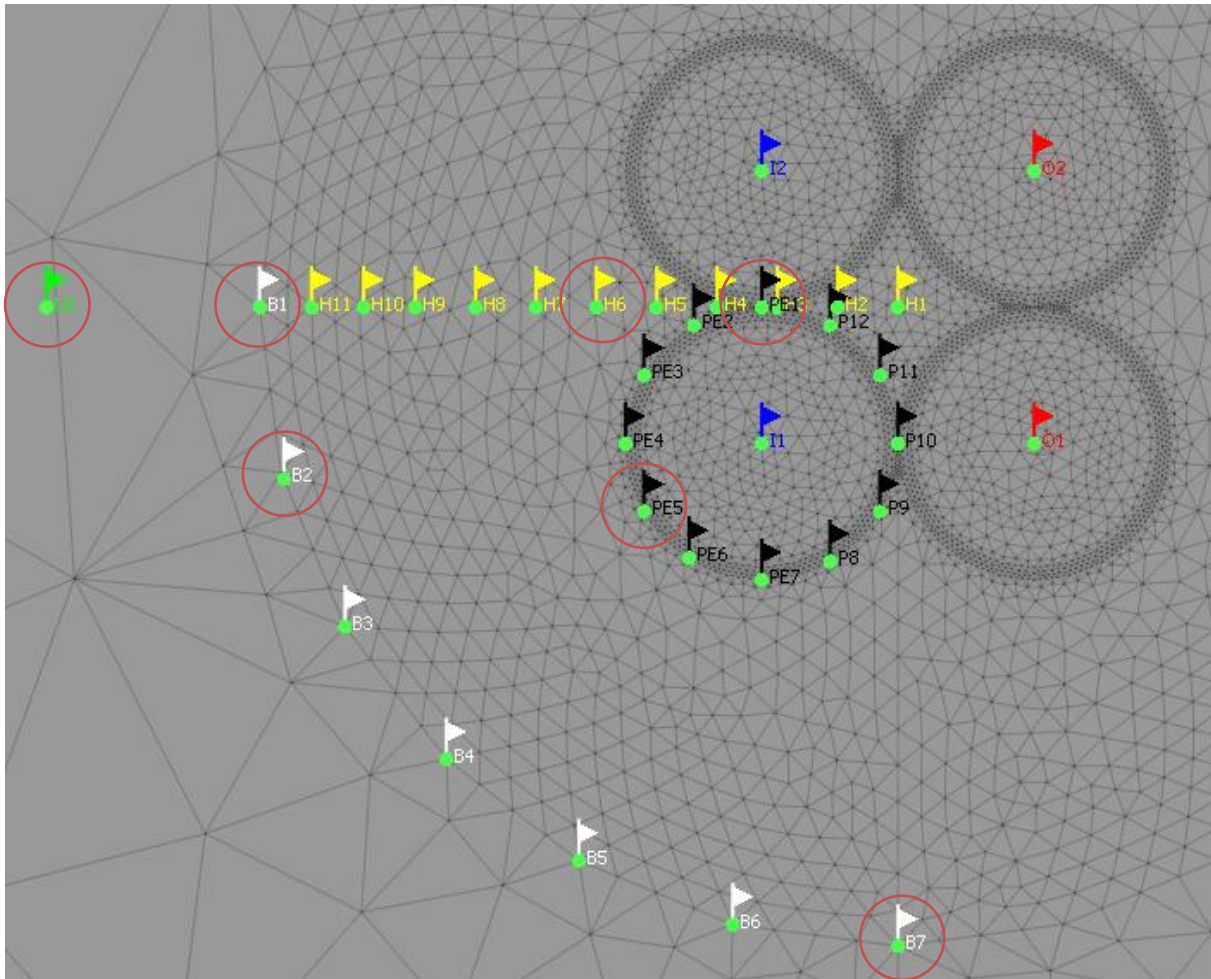


Abbildung 41: Position der Beobachtungspunkte in Geometrie a

### Konfiguration b

Bei Geometrie b ist das Sondenbündel an den linken Rand des Bohrlochs verschoben (Abbildung 42). Dennoch gelten für die RE-Zahl, die Wärmeleitfähigkeit im Untergrund und Temperaturspreizung dieselben Eigenschaften als ungünstig in Bezug auf die Minimaltemperatur wie in Geometrie a, (Tabelle 16). Durch den Kontakt der Sonden mit der Bohrlochwand befinden sich die Punkte *B1* und *B2* im Nahbereich um die Sonden. Somit erzeugt an diesen Punkten, im Gegensatz zu Geometrie a, eine geringe Wärmeleitfähigkeit im Verfüllmaterial minimale Temperaturen.

Tabelle 16: Minimale Temperaturen an Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei Geometrie b

Punkt	RE-Zahl	$\lambda_{\text{Untergrund}}$ [W/(mK)]	$\lambda_{\text{Verfüllmaterial}}$ [W/(mK)]	Spreizung [K]	Temperatur [°C]
U1	5000	1	2	1	-1,039
B1	5000	1	0,8	1	-2,421
B2	5000	1	0,8	1	-2,675
B7	5000	1	2	1	-0,174
H6	3000	1	2	1	-2,258
PE5	5000	1	0,8	1	-2,658
PE1	5000	1	0,8	1	-2,999

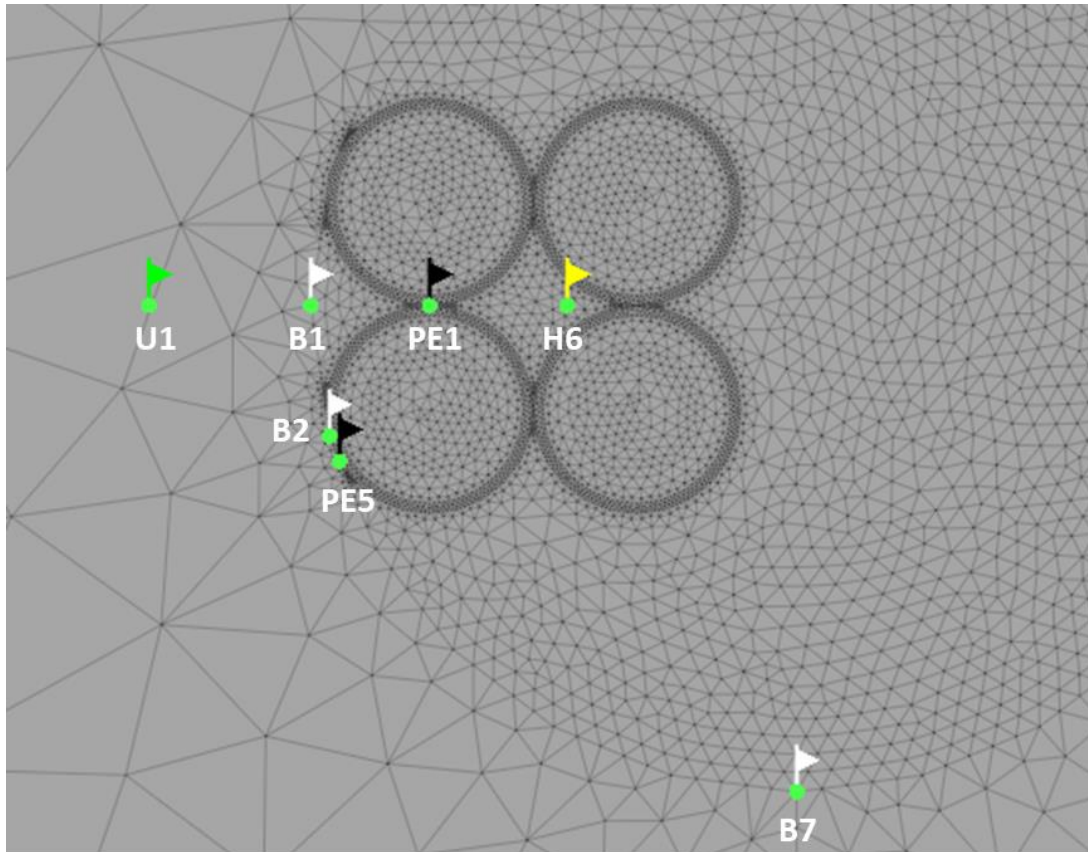


Abbildung 42: Position der Beobachtungspunkte in Geometrie b

### Konfiguration c

Für Geometrie c ergibt sich ein sehr ähnliches Bild für die Parameterauswahl die zu den minimalen Temperaturen führen (Tabelle 17). Auffällig ist der Punkt *PE1*, der obwohl er den direkten Kontakt zum PE-Material hat, bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung die niedrigste Temperatur hat. An Punkt *B7* wird deutlich, dass diese Geometrie niedrige Temperaturen über einen großen Bereich des Bohrlochs verteilt. Die Temperatur liegt dort ca. 0,9 K unter der von Geometrie *b* und 0,4 K unter der von Geometrie *a*.

Tabelle 17: Minimale Temperaturen an Beobachtungspunkten nach 56 Tagen bei Geometrie c

Punkt	RE-Zahl	$\lambda_{\text{Untergrund}}$ [W/(mK)]	$\lambda_{\text{Verfüllmaterial}}$ [W/(mK)]	Spreizung [K]	Temperatur [°C]
U1	5000	1	2	1	-1,307
B1	5000	1	2	1	-2,591
B2	5000	1	2	1	-2,642
B7	5000	1	2	1	-1,083
H6	5000	1	2	1	-2,571
PE5	5000	1	2	1	-2,627
PE1	5000	1	0,8	1	-2,998

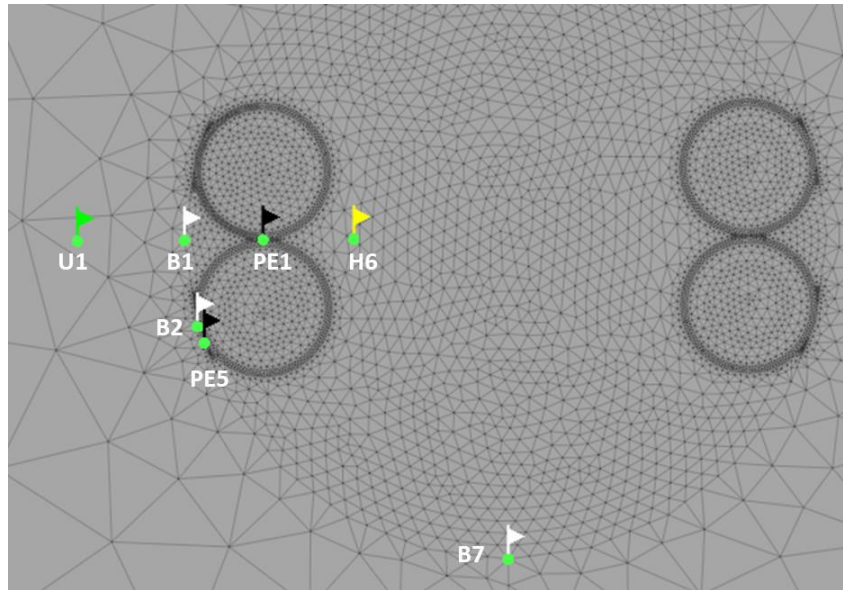


Abbildung 43: Position der Beobachtungspunkte in Geometrie c

### Vergleich zwischen den Geometrien

Die niedrigsten Temperaturen an der Kontaktfläche zwischen Sondenrohren und Hinterfüllung zeigt Geometrie c. Da die kalten Rohre des Vorlaufs weit von den wärmeren Rohren des Rücklaufs entfernt sind, ist der wärmende Einfluss deutlich geringer als bei den Geometrien a und b.

In Bezug auf die Temperaturen an der Bohrlochwand bzw. im Untergrund hat Geometrie a den geringsten Einfluss. Vor allem bei niedriger Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von  $0,8 \text{ W/(mK)}$  wird der Wärmezufuss aus dem umliegenden Untergrund durch das Bohrloch gehemmt.

### **Zusammenfassung**

Durch die Simulationsstudie konnten folgende Erkenntnisse für die kritischen Fälle gewonnen werden:

Als Worst-Case-Szenarien an der Grenzschicht von Sonden und Hinterfüllung gilt die Kombination folgender Eigenschaften:

- hoher Volumenstrom in den Sonden
- geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund
- geringe Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
- geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf
- hohe räumliche Entfernung von Vor- und Rücklauf.

Als Worst-Case-Szenarien an der Bohrlochwand gilt die Kombination folgender Eigenschaften:

- hoher Volumenstrom in den Sonden
- geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund
- hohe Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
- geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf
- hohe räumliche Entfernung von Vor- und Rücklauf
- Sonden liegen nah am Bohrlochrand

## 9.5 AP 4: Durchführung von mittelskaligen Frost-Experimenten (VEGAS)

### 9.5.1 Versuche zur Bestimmung von Beschädigungen der Verfüllbaustoffe durch Frost-Tau-Wechsel

Mittelskalige Versuche, repräsentativ für den Abschnitt einer von einem porösen Material umgebenen Doppel-U-Erdwärmesonde, wurden in VEGAS entwickelt. Jede Versuchskonfiguration besteht aus einem 1,4 m langen EWS-Segment, das in eine mit porösem Medium gefüllte PVC-Säule von etwa 50 cm Durchmesser eingebaut wurde (Abbildung 44). Die Experimente wurden unter kontrollierten Temperaturrandbedingungen ( $T = 10 \pm 2 \text{ °C}$ ) in einem Kühlraum durchgeführt.

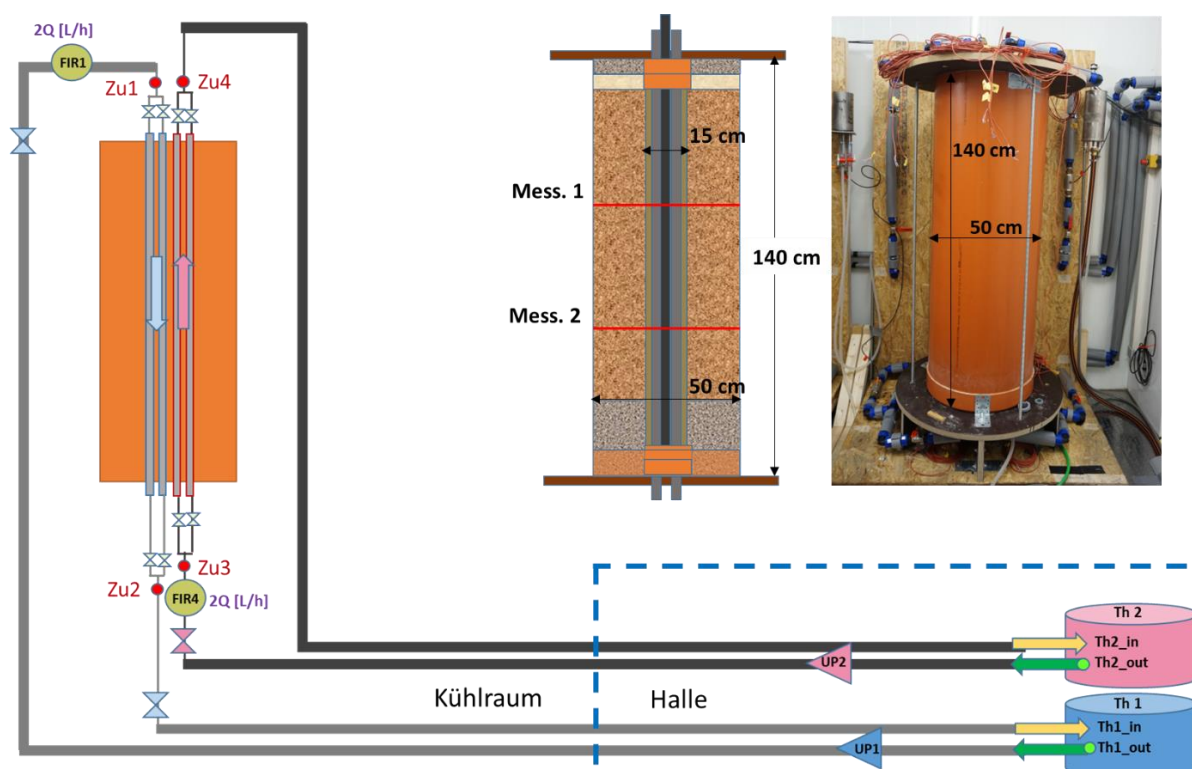


Abbildung 44: Versuchsstand im Kühlraum mit Darstellung der Trägerfluidleitungen und der außerhalb abgestellten Thermostate (Mitte Querschnitt, rechts Bild des Versuchs)

Aufgrund der begrenzten Länge des EWS-Segments wäre es nicht sinnvoll gewesen, einen Doppel-U-PE-Wärmetauscher zu installieren, da dies keine Temperaturspreizung zwischen Zu- und Ablaufrohr erlaubt hätte [33]. Stattdessen wurden vier getrennte PE-Rohre eingebaut und je paarweise (in Abbildung 44 links mit unterschiedlichen Farben markiert) durch zwei unabhängige Thermostate (Wärmeträgerfluid jeweils 20 %V Etylglycol in Wasser) betrieben. Eine genau definierte Temperaturspreizung war somit sichergestellt. Um Feldsituationen möglichst nahe zu reproduzieren wurden Zulaufrohre von oben nach unten und Rücklaufrohre in umgekehrter Richtung durchströmt. Aufgrund der geringen Rohrlänge waren jedoch zwischen Zu- und Auslauf des Experiments keine Temperaturänderungen messbar. Durch die angelegte Temperaturspreizung kann die Situation an einer bestimmten Sondentiefe untersucht werden. Die zugehörigen Erddrücke waren im Experiment jedoch nicht reproduzierbar.





Charge einer Kolloidmischung (Tabelle 2) entnommen. Die Versuchskonfigurationen einer Reihe können sich hinsichtlich der Geometrie (G), des porösen Materials oder anderer Faktoren voneinander unterscheiden. Dies wird in der Beschreibung der Ergebnisse jeder einzelnen Reihe im Einzelnen dargelegt. Als Gebirge (poröses Medium) wurden der hoch wärmeleitende Quarzsand (Dorsilit Nr. 8, QS8, 2,6 W/(mK)), der wenig wärmeleitende Bentonit (BT, Mikolite 00 GWE, 1,25 W/(mK)) und ein hoch wärmeleitender Flüssigboden (Carbofill, FB,  $\lambda > 2$  W/(mK)) zur Simulation eines festen Gebirges eingesetzt.

Tabelle 18: Überblick der in Rahmen der AP4 durchgeführten mittelskaligen Experimente

ID	VM	poröses Medium	therm. Leitfähigkeit [W/(mK)]	Zulauf $T_{\min}$ [°C]	Rücklauf $T_{\min}$ [°C]	$\Delta T$	FT/N	Temp-Messung für Randbed.	TP	
<b>Frost-Experimente</b>										
R1	R1-G1	VM3d	QS8	2,6	-3/-2,5	-2/-1,5	1	9	AW, L Isol.	-
	R1-G2							6		-
	R1-G3							5		-
R2	R2-G1	VM2	QS8	2,6	-3	0	3	4/6	AW, L	TP1
	R2-G2							6/6		
	R2-G3							1/4 (6)		
R3	R3-G1	VM1	BT	1,25	-3	0	3	6/6	AW, L	TP1
	R3-G2							0/6		
	R3-G2_0							-		
R4	R4-G1	VM3d in situ	BT	1,25	-3	0	3	0/6	AW, L	TP2
	R4-G2							2/6		
	R4-G3							4/6		
R5	R5-G2S	VM3d	QS8	2,6	-3	0	3	5/6	IW, L	TP2
	R5-G2		BT					1,25		
	R5-G3							3/4 (6)		
<b>Läufigkeits-Experimente</b>										
R6	R6-G1	VM3d in situ	FB	>2	1	1	0/3	4	IW, AW, L	TP3
	R6-G1-P1							4	L	
	R6-G1-P2							4		

VM: Verfüllmaterial (Tabelle 2); QS: Quarzsand (Tabelle 3); BT: Bentonit; FB: Flüssigbeton; FT/N: Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in N Temperaturzyklen; IW/AW: Innenwand/Außenwand des Experiments; L: Luft Kühlraum; TP: Temperaturprogramm (siehe unten)

Reihe 1 waren die „Prototyp-Versuche“. Sie dienten in erster Linie dem Test des gesamten Versuchsaufbaus. Sie sind daher mit den anderen nicht direkt vergleichbar.

Zur Betrachtung von Worst-Case-Szenarien wurden eine Minimalzulaufemperatur von  $-3$  °C (gemäß LQS-BW) und eine Temperaturspreizung von 3 K eingesetzt. Die anderen Parameter wurden dann variiert, um Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchen zu ermöglichen. Zur Modellierung der Versuche in AP 5 war eine detaillierte Aufnahme der Temperaturrandbedingungen notwendig. Dafür wurden Temperatursensoren im Kühlraum (Luft), an der Außenwand (AW) und/oder Innenwand (IW) der PVC-Säule des Versuchstandes eingebracht.

Die Läufigkeit-Experimente (R6) wurden in allen Aspekten gemeinsam mit dem Partner IGS geplant, um die Entwicklung des thermomechanischen Modells in AP 5 zu unterstützen.

Die Temperaturganglinien der beiden Temperaturprogramme TP1 und TP2, die bei den „Frost-Experimente“ verwendet wurden, sind in Abbildung 46 dargestellt. Die ersten 3 Zyklen sind identisch (die Minimaltemperatur wird 6 Stunden gehalten). In TP2 wurde ab Zyklus 4 die Dauer der angelegten Minimaltemperatur auf 10 Stunden verlängert um eine vollständige Untersuchung bei niedrigwärmeleitendem umliegendem Boden zu gewährleisten. Unabhängig

davon wurde jederzeit eine Temperaturspreizung von 3K durch die beiden Thermostate sichergestellt.

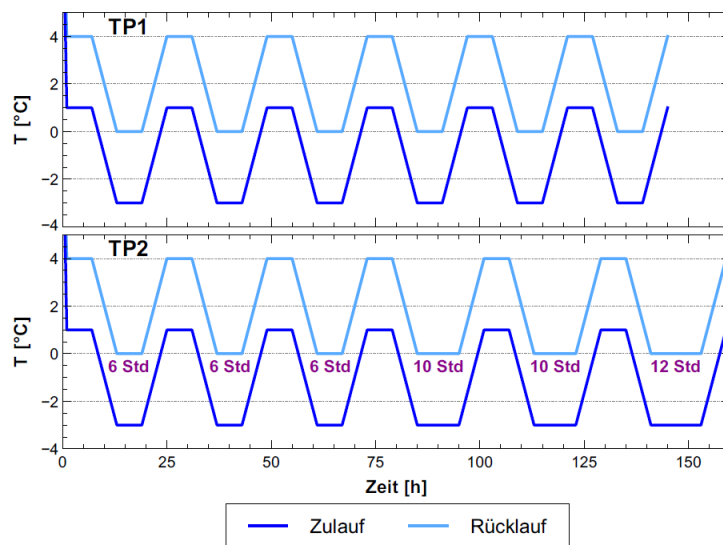


Abbildung 46: In Frostversuche angewendete Temperaturprogramme

Die EWS (PE-Rohre und Verfüllbaustoff) wurden für die Experimente der Reihen R1, R2, R3 und R5 extern vorgefertigt (Abbildung 47, Abbildung 48). Dazu wurden in einer Schalung (PVC-Rohr, L = 1,4 m, ID 150 mm) jeweils vier Sondenrohre sowie ein Verpressrohr mittels speziell hergestellten Abstandhaltern fixiert. Die Temperatursensoren wurden im Ringraum durch Kunststoffsensorhalterungen positioniert (Wenn möglich wurden diese am Verpressrohr befestigt, um künstlich produzierte Schwachstellen an der Kontaktfläche Einbauteil-Sondenrohr zu vermeiden). Die messende Sensorspitze wurde in maximalem Abstand von der Halterung platziert. Um Einflüsse durch die Kabel zu minimieren wurden diese mindestens 15 cm über der Messebene nach außen geführt. Die Kabeldurchführungen wurden vor dem Verpressen mit Silicon versiegelt. Die so gefertigten EWS-Kerne wurden für mindestens 28 Tage im VEGAS-Kühlraum zur Aushärtung gelagert. (Ausnahme: Aushärtung der EWS R1 am KIT bei 20-30 °C).



Abbildung 47: Vorbereitung Wärmetauscher im PVC Rohr: Anordnung der Rohre (Geometrie), Einbringung Innensensoren

Nach Aushärtung wurde die PVC-Schalung entfernt und die Temperatursensoren des Übergangs EWS-Gebirge wurden mit schnellhärtendem Zements fixiert (Abbildung 48). Der EWS-Kern wurde mittels der gebliebene PVC-Fußkappe in der Mitte der großen PVC-Versuchsstandsäule befestigt. Dann wurde der verbleibende Raum zwischen der Sonde und der Außenwand des Versuchstandes mit porösem Material gefüllt und im Falle von Sand mittels eines am Boden verlegten perforierten Rohrs gesättigt. Während der Befüllung wurden die Temperatursensoren in das poröse Medium eingebracht (Abbildung 48 rechts). Die letzten ca. 3 cm wurden mit Bentonit befüllt und die Säule mittels einer Platte, die mit der Basis des Experiments verspannt war, verschlossen. Dadurch wurde sichergestellt, dass das poröse Medium während der Versuche fixiert blieb. Nach Fertigstellung wurden die Säulen in den Kühlraum transportiert und auf die experimentelle Initialtemperatur gebracht.



Abbildung 48: Verpressung (links), Einbringung der Außensensoren an die EWS-Rand (Mitte), Befüllung der Versuchsstandsäule (rechts)

Um den Einfluss der Anbindung des Betons an das poröse Medium während der Aushärtung zu berücksichtigen, wurde die EWS der Reihe 4 direkt im porösen Medium verpresst (Abbildung 49). Dazu wurde der Wärmetauscher mit Hilfe einer PVC-Schalung wie oben beschrieben aufgebaut. Die Fühlerkabel wurden jedoch nach oben herausgeführt und die Fußkappe wurde nicht mit der Schalung verklebt, sondern bereits in der Mitte der großen PVC-Versuchsstandsäule befestigt. Dann wurde der Raum zwischen Schalung und Außenwand des Versuchstandes mit Bentonit befüllt um eine gewisse Standsicherheit zu gewährleisten. Zur Vermeidung von Beschädigungen wurde das Bentonitmaterial während des Ziehens der Schalung stabilisiert. Schließlich wurde der Raum zwischen dem Gebirge und dem Wärmetauscher verpresst. Bei diesem Verfahren ist es nicht möglich Temperatursensoren an der Bohrlochwand zu platzieren.

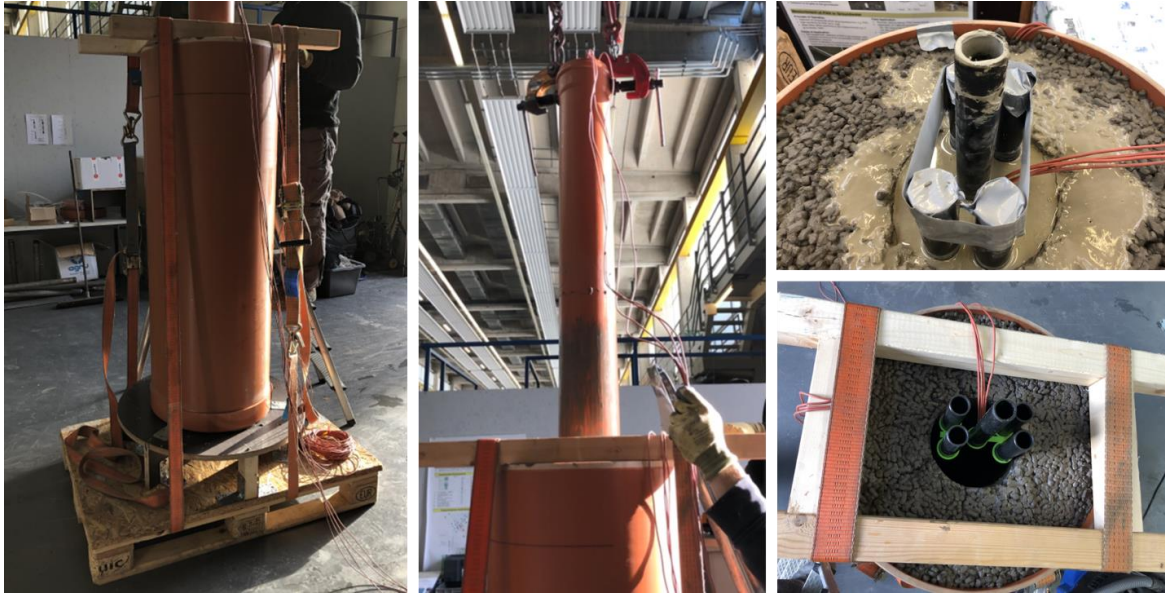


Abbildung 49: „in situ Vepressung“

### 9.5.2 Prototypexperimente Reihe 1

Der Aufbau und Betrieb der drei Prototypen (Reihe 1: R1G1, R1G2, R1G23) war auf Grund unerwarteter Probleme extrem herausfordernd (mehrere Monate Mehraufwand).

Die Schalungen mit den Einbauteilen der drei Erdwärmesonden (G1, G2, G3, Abbildung 45) wurden wie oben beschrieben in Stuttgart hergestellt und am KIT mit dem Verfüllbaustoff VM3d verpresst. Nach Aushärtung im KIT-Labor ( $T = 20\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) wurden die EWS-Segmente nach Stuttgart transportiert. Nach Entfernung der Schalung und Einbau von Temperatursensoren wurden sie im Versuchstand eingebaut und der Raum zwischen EWS und Außenwand wurde verfüllt. In der Basis des Versuchstandes wurde Troptogel eingebracht, um die Dichtigkeit zu verbessern. Dann wurden die Säulen mit 10 cm Steinwolle und 3,2 cm Armaflex isoliert (Abbildung 50).

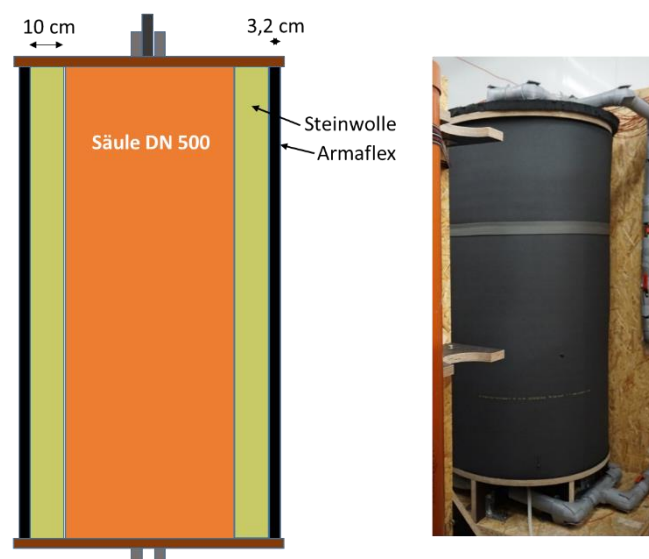


Abbildung 50: Isolierung rund um die Versuchsstandsäule

Das Temperaturtestprogramm (Tabelle 19) bestand aus drei Zyklen. Für die Prototypen wurden unter anderem die absoluten Temperaturen, die Temperaturspreizung, die Intensität (Dauer der Temperaturwechsel) und die Dauer der Phasen mit konstanter Temperatur variiert, um den Einfluss dieser Parameter auf die nachfolgenden Experimente abschätzen zu können.

Tabelle 19: Temperaturprogramme R1

Dauer	Zulauftemperatur	Rücklauftemperatur	Spreizung
initial	konstant 11 °C	konstant 11 °C	0 K
1 h	lineare Änderung auf -3 °C	lineare Änderung auf -2 °C	
48 h / 24 h <sup>1)</sup>	konstant -3 / -3,5 / -3,5 °C <sup>2)</sup>	konstant -2 / -2,5 / -3,5 °C <sup>2)</sup>	1 / 1 / 0 K <sup>2)</sup>
1 h	lineare Änderung auf 11 °C	lineare Änderung auf 11 °C	
6 h	konstant 11 °C	konstant 11 °C	0 K

<sup>1)</sup> 48 h für R1G1, 24 h für R1G2, R1G3

<sup>2)</sup> Zulauf- und Rücklauftemperatur und damit Spreizung unterschiedlich bei verschiedenen Zyklen

Die gewählte Dauer der konstanten Minimaltemperatur (48 h, R1G1; 24 h, R1G2, R1G3) sind in der Praxis völlig unrealistisch, sind jedoch vergleichbar mit den im Projekt „EWS-Frost“ durchgeführten Großversuchen [4]. Die gewählte „Erholungszeit“ (6 h) war nicht ausreichend um im gesamten Versuch wieder eine konstante Initialtemperatur zu erreichen; das Temperaturprogramm unterscheidet sich thermisch-physikalisch völlig von dem, was in einem intermittierendem EWS-Betrieb geschieht.

Für jede Konfiguration wurden mit jeweils großem zeitlichem Abstand zwei Experimente durchgeführt (a und b in Tabelle 20), bei denen das gleiche Temperaturprogramm verwendet wurde (Tabelle 1, Tabelle 19) Bei den „a-Versuchen“ war die Strömung in den PE-Rohren jedoch wesentlich turbulenter (für die Strömung im Rundrohr <2300 laminar, transient <4000, >4000 voll turbulent). Für die Konfiguration R1G1 wurde auch eine c-Variante durchgeführt (wie b, aber ohne Isolierung der Versuchsstandsäule.) Die Zeile N fasst die Anzahl aller Zyklen zusammen, die die einzelnen Konfigurationen durchlaufen haben.

Tabelle 20: Überblick der unterschiedlichen Experimente mit den unterschiedlichen Konfigurationen

	<b>R1G1</b>	<b>R1G2</b>	<b>R1G3</b>	<b>TP</b>	<b>Durchfluss</b>	<b>Isolierung</b>
	R1G1 a	R1G2 a	R1G3 a	TP0	1130 L/h	ja
	R1G1 b	R1G2 b	R1G3 b *)	TP0	760 L/h	ja
	R1G1 c	-	-	TP0	760 L/h	keine
<b>N</b>	9	6	5*			

\*) Überhitzung eines Thermostats, zwei von den drei Zyklen abgeschlossen.

Die Abbildung 51 zeigt die Temperaturverläufe der Sensoren bei R1G1 a/b. Die Nukleation ist an Sensor 1 zwischen den beiden Zulaufrohren T = -3 °C) gut zu beobachten. Die in der Nähe von Sensor 1 freigesetzte Schmelzenthalpie wurde aufgrund der Wärmeleitung auch von Sensor 3, einem Zulauf- und Rücklaufrohr, und Sensor 2, zwischen Sensor 1 und der Bohrlochwand, in geringerem Maße registriert.

Während im Großversuch [4] bei Re = 4000 die Nukleation nach 20 Stunden kontinuierlicher Abkühlung auf -3 °C stattfand, wurde sie in dem mittelskaligen Versuch R1G1 a (Abbildung 51 links) bereits nach 5 Stunden beobachtet. Bei Re = 2600 waren die entsprechenden Zeiten ca. 100 Stunden im Großversuch aber weniger als 5 Stunden in R1G1 b (Abbildung 51 rechts).

Weiterhin zeigten die mittelskaligen Versuche im Nahfeld Temperaturen unter 0 °C was beim Großversuch nie der Fall war.

Dies war nicht wirklich überraschend, da die beiden Versuche sehr unterschiedliche Randbedingungen hatten (Großversuch: Labortemperatur, mittelskaliger Versuch: Kühlraum mit zusätzlicher Isolierung).

Der Unterschied bestand hauptsächlich darin, dass bei den mittelskaligen Experimenten durch die Isolierung eine „no-flow“ Temperaturrandbedingung angelegt worden war, wodurch sich die Experimente sehr schnell abkühlten (keine Energiezufuhr über Systemrand). Dieser Effekt ist auch darin zu beobachten, dass unter diesen Randbedingungen der Einfluss der Reynolds-Zahl abnimmt und es selbst bei wenig turbulenter Strömung zu schneller Frostbildung kam (R1G1b). Für die folgenden Reihen wurde daher auf die Isolierung verzichtet.

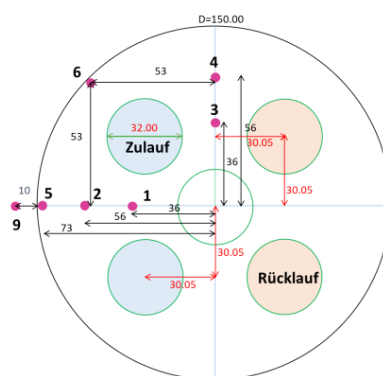
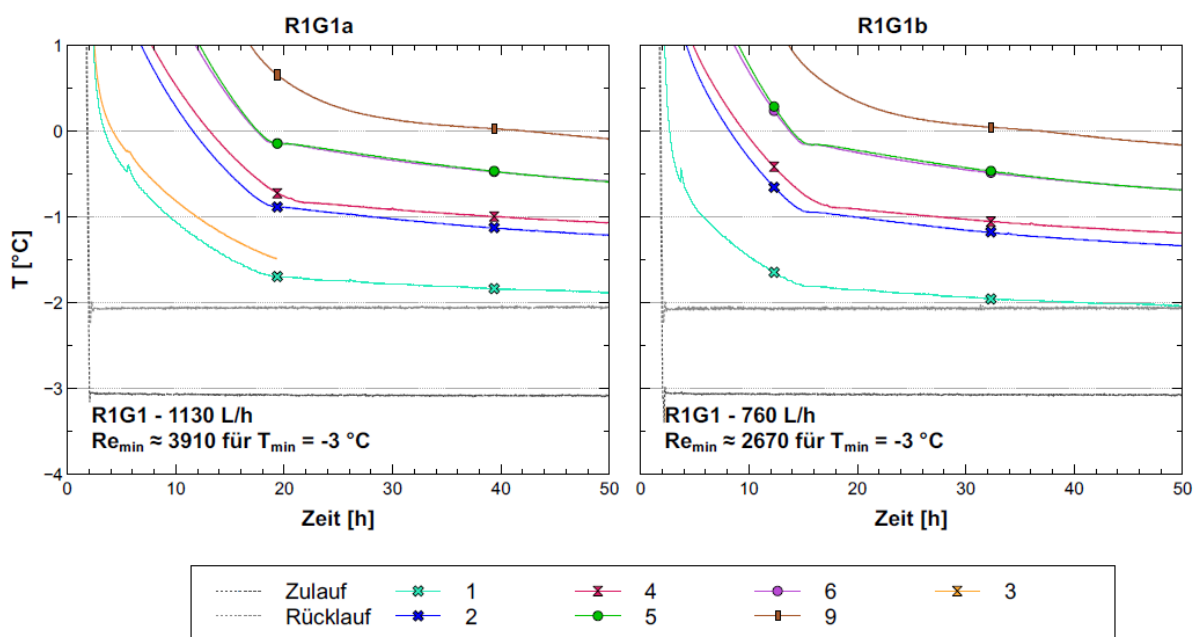


Abbildung 51: Einfluss des Soledurchflusses auf die Temperaturentbreitung.

Abbildung 52 zeigt den Vergleich der ersten Abkühlzyklen der Experimente R1G1 b und c. beide Versuche wurden mit derselben Re-Zahl durchgeführt, für den „c-Versuch“ wurde jedoch die Isolierung entfernt. Tatsächlich stellte die Isolierung eine große thermische Impedanz dar, die in der Praxis nicht vorhanden ist, und die resultierende Temperaturverteilung war zu niedrig (Abbildung 52 links).

Im Laufe der Experimente wurden an der Bohrlochwand Temperaturen  $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht und selbst im Sand nahe am Bohrlochrand konnte das Gefrieren beobachtet werden (hier nicht dargestellt, wurde aber bei der Interpretation der visuellen Überprüfung nach Versuchsende berücksichtigt).

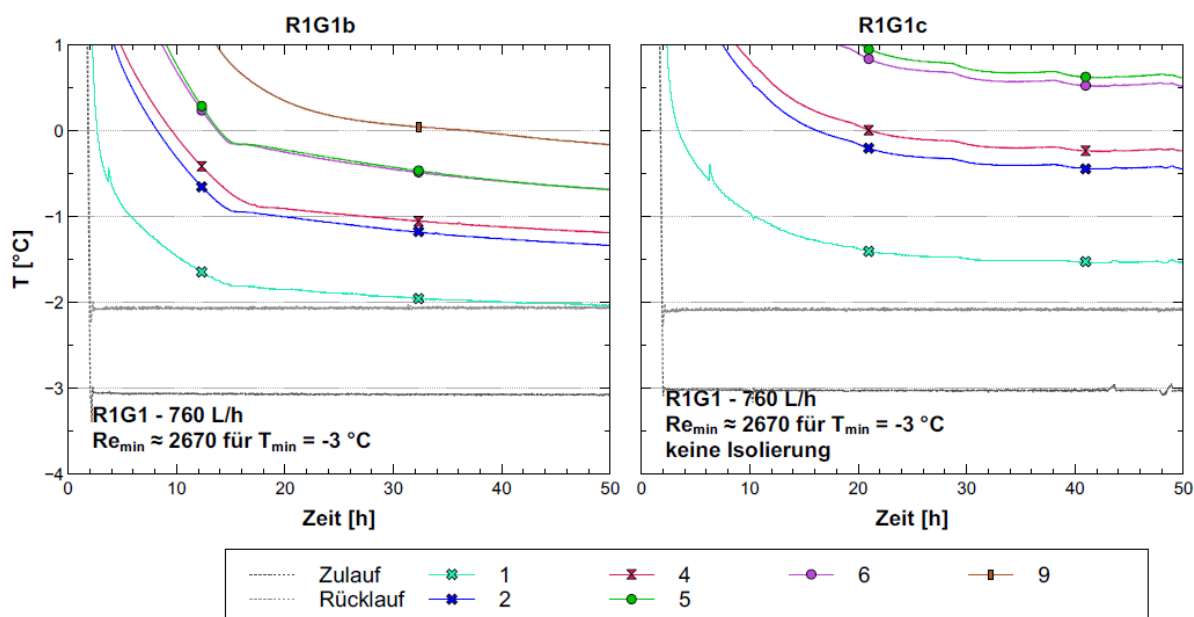


Abbildung 52: Einfluss der Isolierung auf die Temperatursausbreitung

Nach den F-T-Wechseln wurden die Säulen geöffnet und die entsprechenden EWS-Abschnitte auf Schäden untersucht. Bei R1G1 (aber auch den anderen Säulen) zeigte die mit dem gesättigten Sand in Berührung stehende EWS-Oberfläche viele kleine Risse, die im Bereich der undurchlässigen, steifen Troptogel-Basis nicht nachgewiesen wurden (Abbildung 53). Da sich die „Frostfront“ von den PE-Rohren bis zur Bohrlochwand ausbreitete und sich dort gesättigter Sand befand, handelt es sich hierbei um Oberflächenabwitterung („Surface Scaling“), die durch mehrere Frost-Tau-Wechsel verschärft wurde. Ob sich diese Mikrorisse nach innen ausbreiten konnten und inwieweit Aushärtungs- und Einbaubedingungen der EWS einen Einfluss auf die Sondenstabilität haben, konnte hier noch nicht untersucht werden.

Bei den Konfigurationen R1G2 und R1G3, bei denen die Rohre nahe an der Bohrlochwand angebracht waren und die Dicke des Betons zwischen dem porösen Medium und den Rohren weniger als einen Meter betrug, konnten Risse über die gesamte Länge der Rohre beobachtet werden (Abbildung 54). Dies könnte auf den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Polyethylens, aus dem die Rohre bestehen, und des verwendeten Verfüllbaustoffes, oder auf das Einfrieren eines dünnen Wasserfilms, falls vorhanden, zwischen dem PE-Rohr und dem gesättigten Material zurückzuführen sein.

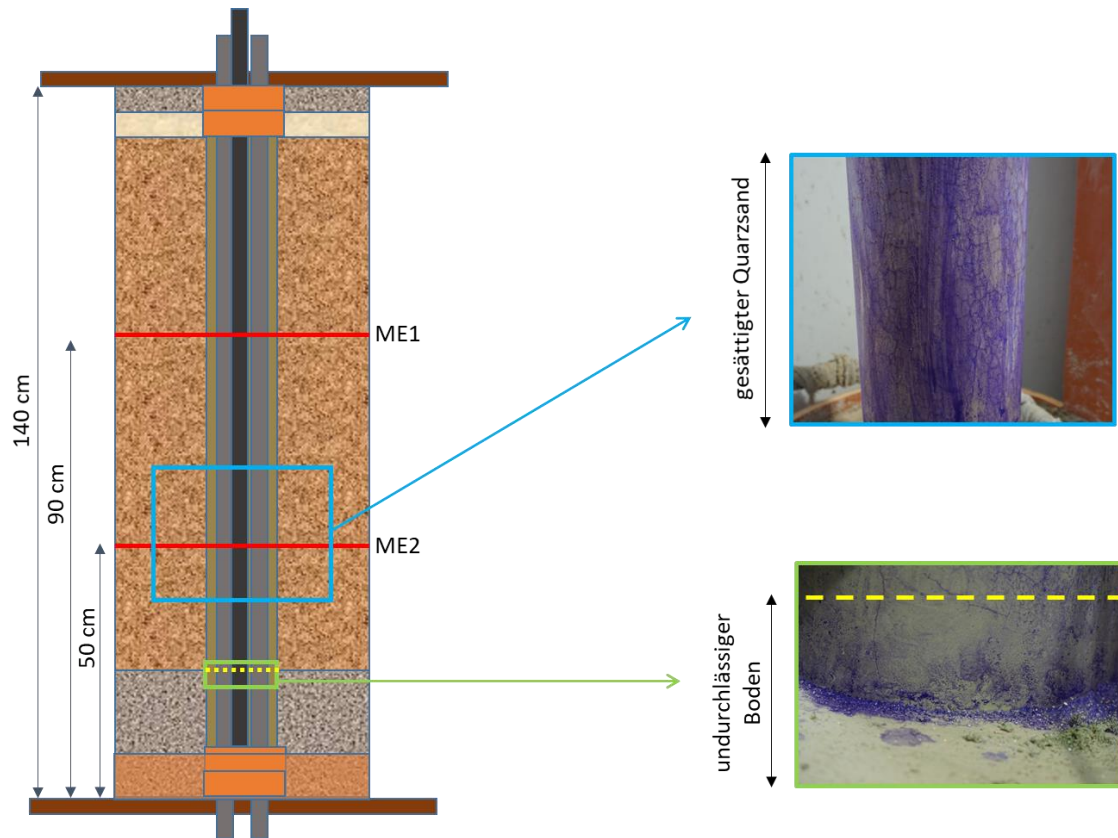


Abbildung 53: visuelle Bewertung der Schäden bei der Versuchskonfiguration R1G1 nach den Frost-Tau-Experimenten

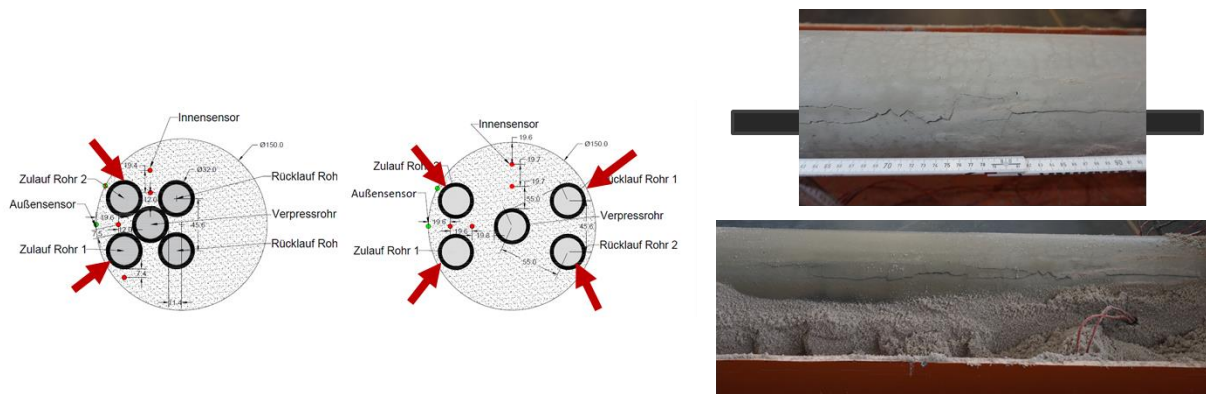


Abbildung 54: visuelle Bewertung der Schäden bei der Versuchskonfiguration R1G2 und R1G2 nach den Frost-Tau-Experimenten

Erkenntnisse aus den Prototypversuchen:

- Verwendung von Innenzentrierungen, um die Röhren in Position zu halten, anstelle von Außenzentrierungen (R1) und deren Positionierung am Fuß und Kopf des Verfüllbaustoffs geeigneter, da die entlang der EWS der Reihe 1 angeordneten Außenzentrierungen während der Herstellung zu Inhomogenität des Verfüllbaustoffs und bei den Frostversuchen zu Risse führten.



- Dichtung des Experimentbodens mit Troptogel nicht ausreichend wasserdicht (Abbildung 47).
- „realistische“ Temperaturprogramme (die kalten Tagen entsprechen) wurden entwickelt (Abbildung 46).
- Isolierung der Versuchssäulen hat maßgeblichen, verfälschenden Einfluss auf Ergebnisse und wird daher nicht weiter angewendet. Sole Leitung von Thermostat zu den Versuchen bleibt isoliert.
- Sondenherstellung komplett bei VEGAS und Aushärtung im Kühlraum ( $10\pm 2^\circ\text{C}$ ) zur Vermeidung von Schwachstellen durch Transport bzw. Aushärtung unter Raumtemperatur.
- Keine weitere Variation der Re-Zahl notwendig. Ab Reihe 2 wurden alle Versuche mit einem Durchfluss von 1100 l/h durchgeführt, was einer minimalen Re-Zahl von  $Re \approx 3907$  im Einlaufrohr ( $T_{\min} = -3^\circ\text{C}$ ) und  $Re \approx 4467$  im Rücklaufrohr ( $T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ ) entspricht.

### 9.5.3 Frost-Tau-Experimente Reihe 2

In Reihe 2 wurde der Verfüllbaustoff VM2 für alle drei Geometrien untersucht. Die Säulen wurden bei VEGAS hergestellt und zur Aushärtung im Kühlraum gelagert. Das Gebirge bestand aus voll gesättigtem Sand. Alle Konfigurationen wurden mit dem Temperaturprogramm TP1 (Abbildung 46) betrieben und in Abbildung 55 verglichen. Die Sensorwerte sind jedoch bei den verschiedenen Konfigurationen aufgrund der unterschiedlichen Position der Rohre im EWS-Querschnitt nicht direkt vergleichbar.

Bei Geometrie 3, bei der die Zulaufrohre und die Rücklaufrohre auseinanderliegen, weisen die Sensoren 1 und 2 (auf der kälteren Zulaufseite) und die Sensoren 3 und 4 (auf der wärmeren Rücklaufseite) einen größeren Temperaturunterschied auf als bei den anderen Geometrien.

Bei den Geometrien 1 und 3 findet die Keimbildung nicht bei allen Zyklen statt. Nur bei Geometrie 2 ist die Nukleation in jedem Zyklus des Programms zu beobachten, und sie scheint sehr ausgeprägt zu sein, als ob mehr Wasser für den Phasenwechsel zur Verfügung stünde und daher mehr Schmelzenthalpie freigesetzt würde.

In der Geometrie 3 ist zu erkennen, dass die Nukleation nur an der Schnittstelle der kalten Rohre stattfindet und daher von den Sensoren 1 und 2 mit fast gleicher Intensität wahrgenommen wird, da beide sehr nahe beieinander zwischen den beiden Zulaufrohren liegen, wo die Temperatur auf  $-3^\circ\text{C}$  fällt. Von den Sensoren 3 und 4 wurde nichts registriert.

Auch in Geometrie 1 tritt die Keimbildung an der Schnittstelle zwischen den kältesten Zulaufrohren auf und wird aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes von Sensor 1 sehr gut und von den anderen Sensoren auf der Achse, die durch die Position des Sensor 1 auf der Seite der kälteren Rohre verläuft, leicht wahrgenommen. Noch geringer ist die Wirkung auf Sensor 3, bei Sensor 4 wurde keine Wirkung festgestellt.

In Geometrie 2 findet die Nukleation wieder zwischen den kalten Zulaufrohren statt und wird von Sensor 2 deutlich wahrgenommen. Ein starker Einfluss auf den Sensor 5 ist auch beobachtbar. Sehr interessant ist, dass Sensor 1 und Sensor 6 von der freigesetzten Enthalpie absolut nicht beeinflusst sind, auch nicht durch Leitung.

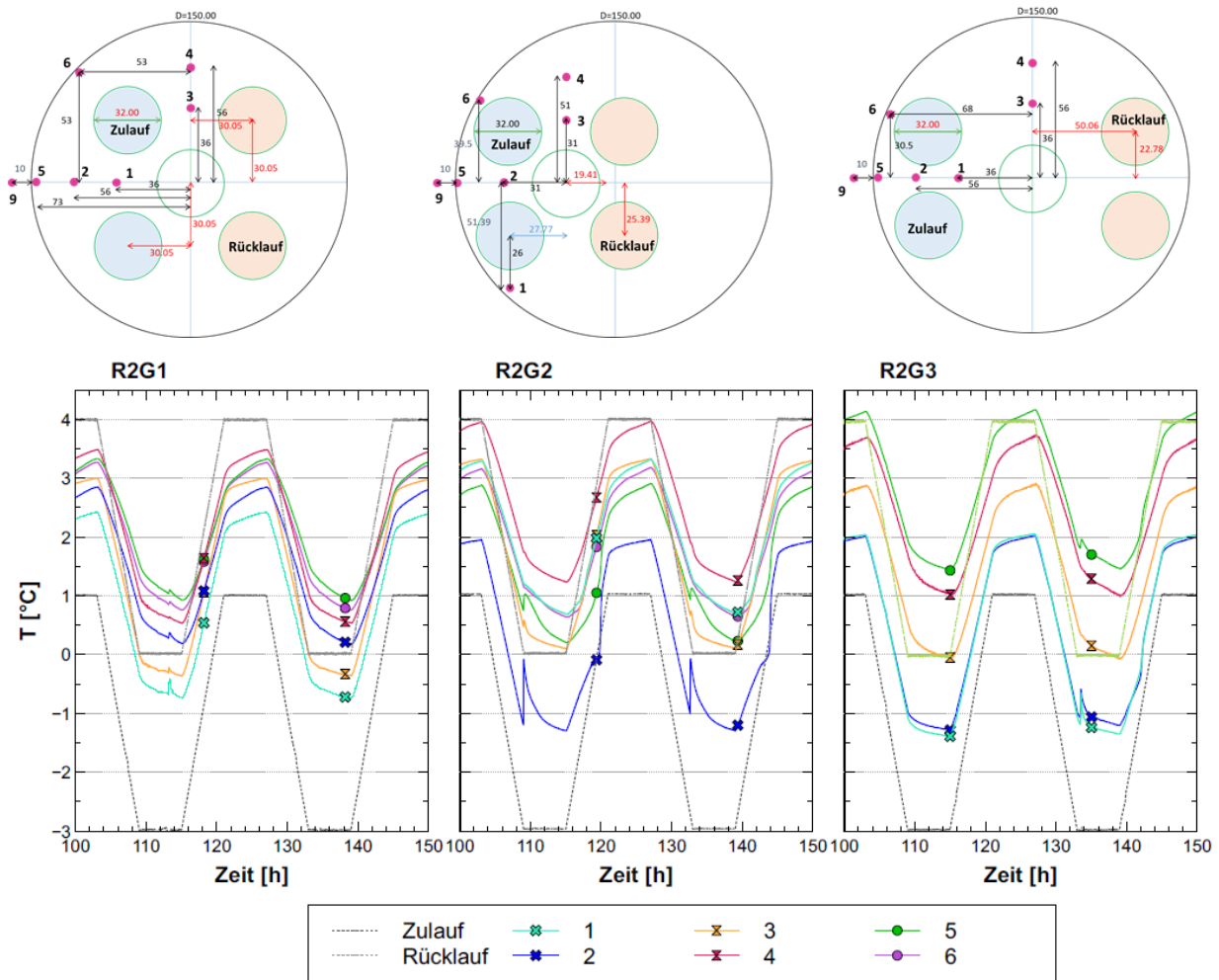


Abbildung 55: Temperaturausbreitung der unterschiedlichen Geometrien für Reihe 2 (VM2: >2 W/(m\*K), QS8: 2,6 W/(m\*K))

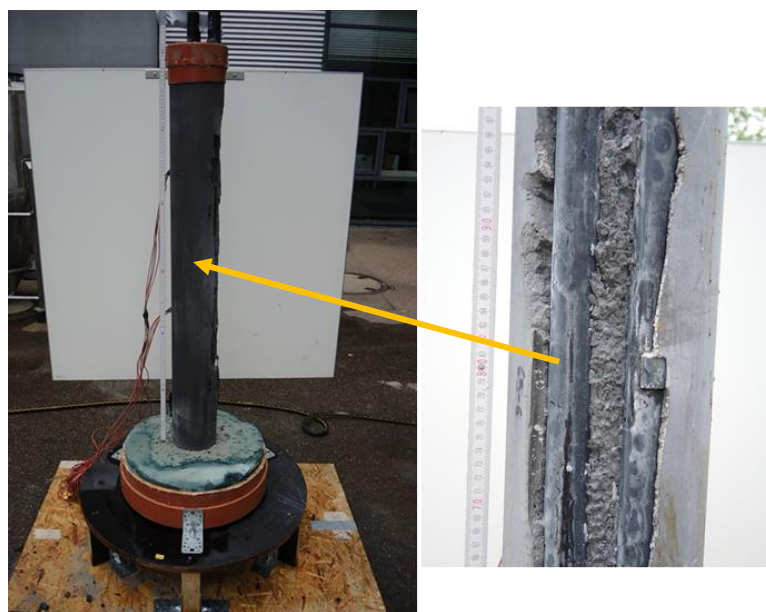


Abbildung 56: visuelle Beobachtung der Konfiguration R2G2 nach dem Frost-Experiment

Die Konfiguration R2G2 ist die einzige aller in AP 4 durchgeführten Experimente, die beim Abbau und bei der visuellen Beobachtung offensichtliche Risse aufwies. Es ist möglich, dass Wasser in diese Risse eindrang und dort, wo die Temperaturen „günstig“ waren, die Nukleation begünstigt/ verschlimmert hat.

### 9.5.4 Frost-Tau-Experimente Reihe 3

In Reihe 3 wurde der thermisch nicht verbesserte Verfüllbaustoff VM1 untersucht. Als Versuchsgeometrien wurden R3G2 und R3G3 ausgewählt. Das dritte Experiment (R3G20) wurde als Duplikat von R3G2 aufgebaut, jedoch ohne Sensoren im Verfüllbaustoff, um die Auswirkungen der Sensoren und ihrer Einbauteile (Sensorenhalterungen und -kabel) auf die beobachteten Schäden zu untersuchen. Die EWS wurden wie in Reihe 2 hergestellt. Die Versuchssäule wurde mit Bentonit befüllt. Da die Bentonit-Pellets schwellen, wurde ein gewisser stabilisierender Druck auf die EWS ausgeübt. Die Wärmeleitfähigkeit des Bentonits (ca. 1,25 W/(m\*K)) wurde im Rahmen des Projekts ermittelt. Die Säule war nicht isoliert. Alle Konfigurationen wurden mit dem Programm TP1 (Abbildung 46) betrieben.

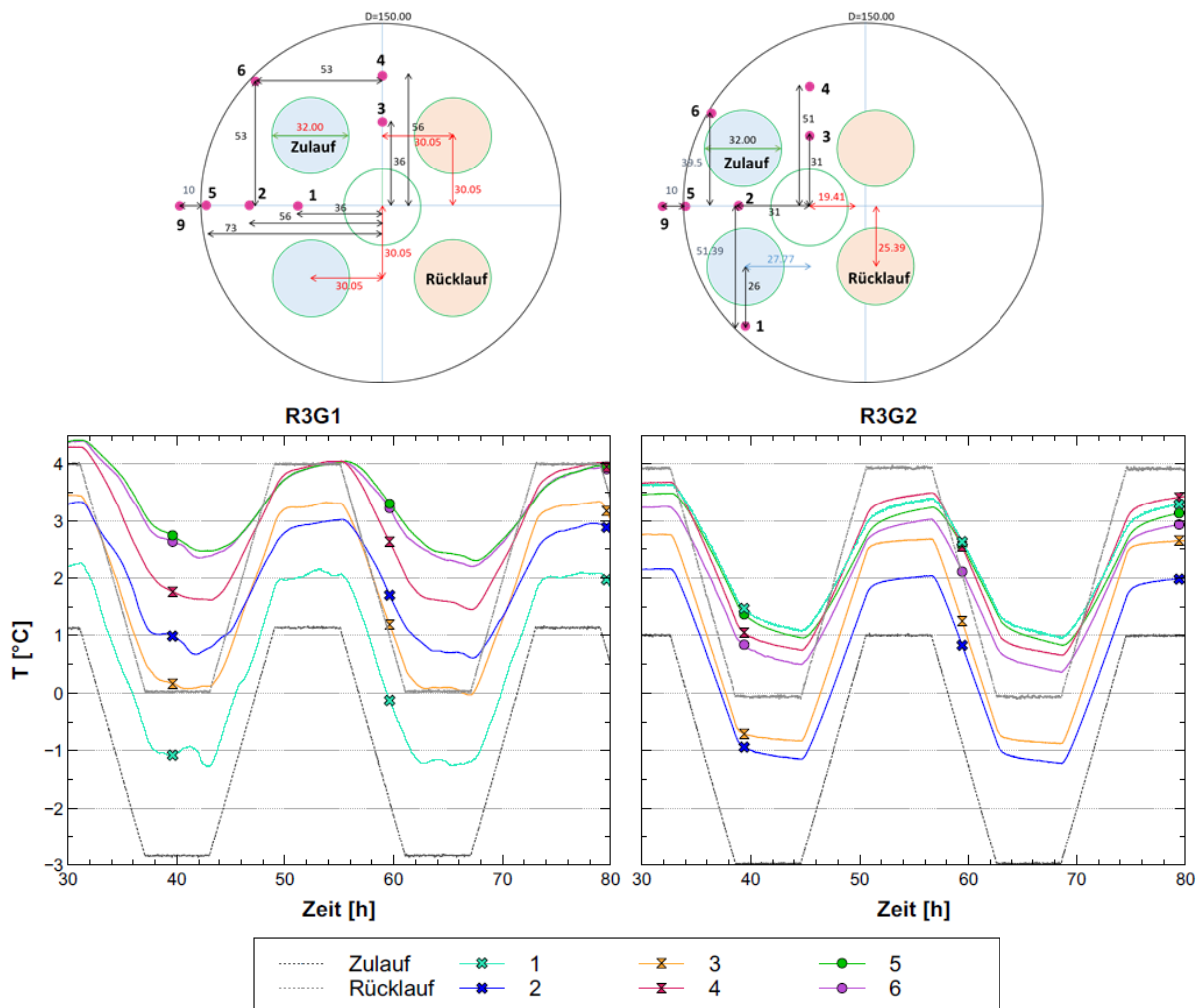


Abbildung 57: Temperaturausbreitung der unterschiedlichen Geometrien für Reihe 3 (VM1: 1,2 W/(m\*K), BT: 1,25 W/(m\*K))

Während des Experiments mit der Konfiguration R3G2 wurde keine Keimbildung beobachtet. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit von Verfüllmaterial und „Gebirge“ liegt die Temperatur auf einem höheren Niveau als im Experiment R2G2. Bei R3G2 wurden keine Schäden bei der visuellen Untersuchung festgestellt, obwohl die PE-Rohre direkt an der Bohlochwand positioniert waren.

Im Gegensatz dazu konnte bei der Konfiguration R3G1 eine Nukleation in allen sechs Zyklen des TP1 beobachtet werden. Diesmal war das Einfrieren nicht als Spitze, sondern als Plateau zu erkennen, wie auch in AP1 für VM1 beobachtet. Aufgrund der in Reihe 3 verwendeten Materialien, Verfüllbaustoff mit geringer Wärmeleitfähigkeit, ist die symmetrische Geometrie G1 gefährlicher als G2, da es schwieriger ist, Wärme durch eine dicke, gleichmäßige schlecht leitende Betonschicht zurückzugewinnen, was bei G1 zu kälteren Temperaturen auf der Zulaufseite führt. Bei R3G2 war die Betonschicht zwischen den Zulaufrohren und dem Boden kleiner, so dass die thermischen Bedingungen für die Nukleation ungünstiger waren.

Die Ergebnisse des R3G2 wurde durch R3G20 bestätigt.

#### 9.5.5 Frost-Tau-Experimente Reihe 4

Bei einem vorgefertigten EWS-Abschnitt (Kap. 9.5.1, Abbildung 47, Abbildung 48) erscheint die Kontaktfläche zur Schalung eben und fühlt sich glatt an. Die mikroskopische Porenstruktur dieser Oberfläche (Kap. 9.1.1) unterscheidet sich eindeutig von der im Inneren. Zusätzlich wird diese Schicht während der Vorbereitung des Experiments (Entfernen der Schalung, Anbringung der Randsensoren, Befüllen der Versuchssäule) thermischen Änderungen wie auch Druckänderungen ausgesetzt. Dies kann dazu beitragen, dass beim Abbau Oberflächenrisse (Surface Scaling) beobachtet werden, die nicht auf Frostbelastung zurückzuführen sind. Aus diesem Grund wurden die EWS-Segmente der Reihe 4 in-situ hergestellt (Kap. 9.5.1, Abbildung 49).

Bei den Versuchen der Reihe 4 wurde als Gebirge Bentonit und als Verfüllbaustoff VM3d verwendet. Alle drei Geometrien wurden untersucht. Während der Verpress- und Aushärtungsprozesse, bewegten sich die PE-Rohre im oberen Bereich der Geometrie 2 leicht nach innen, so dass diese Konfiguration ihre stark asymmetrische Charakteristik im Querschnitt verlor: der Abstand zwischen den Zulaufrohren und der Gebirgewand vergrößerte sich.

Alle Konfigurationen wurden mit dem Programm TP2 (Abbildung 46) betrieben. Diese Wahl wurde getroffen, nachdem in Reihe 3, in der auch Bentonit verwendet wurde, oft keine für die Nukleation „günstigen“ Temperaturen erreicht wurden.

Trotzdem wurde in R4G1 keine Nukleation beobachtet.

Abbildung 58 vergleicht das Verhalten der Materialien VM1 und VM3d (jeweils mit Bentonit als Gebirge) während der ersten drei Temperaturzyklen (identisch für R3 und R4). R3G1 zeigt eine gewisse Kontinuität in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit zwischen Boden und Verfüllbaustoff VM1 (1,2 bzw. 1,25 W/(m\*K)). Bei der Konfiguration R4G1 hingegen leitet der Verfüllbaustoff VM3d die Wärme viel besser als der Boden (2 bzw. 1,25 W/(m\*K)). Hier wird die Wärme viel schneller vom EWS-Ringraum zum Wärmeträgerfluid in den PE-Rohren transportiert als der Boden Wärme in den Ringraum nachliefern kann. Der Verfüllbaustoff VM3d im EWS-Ringraum R4G1 wird somit viel stärker abgekühlt als der VM1 in R3G1.

Trotz der niedrigeren Temperaturen, die in R4G1 (Abbildung 58 rechts) erreicht wurden, kam es zu keiner Nukleation. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Konfiguration mit VM1 bei jedem Zyklus zu einer Nukleation, die eher als „Plateau“ denn als Spitze sichtbar ist.

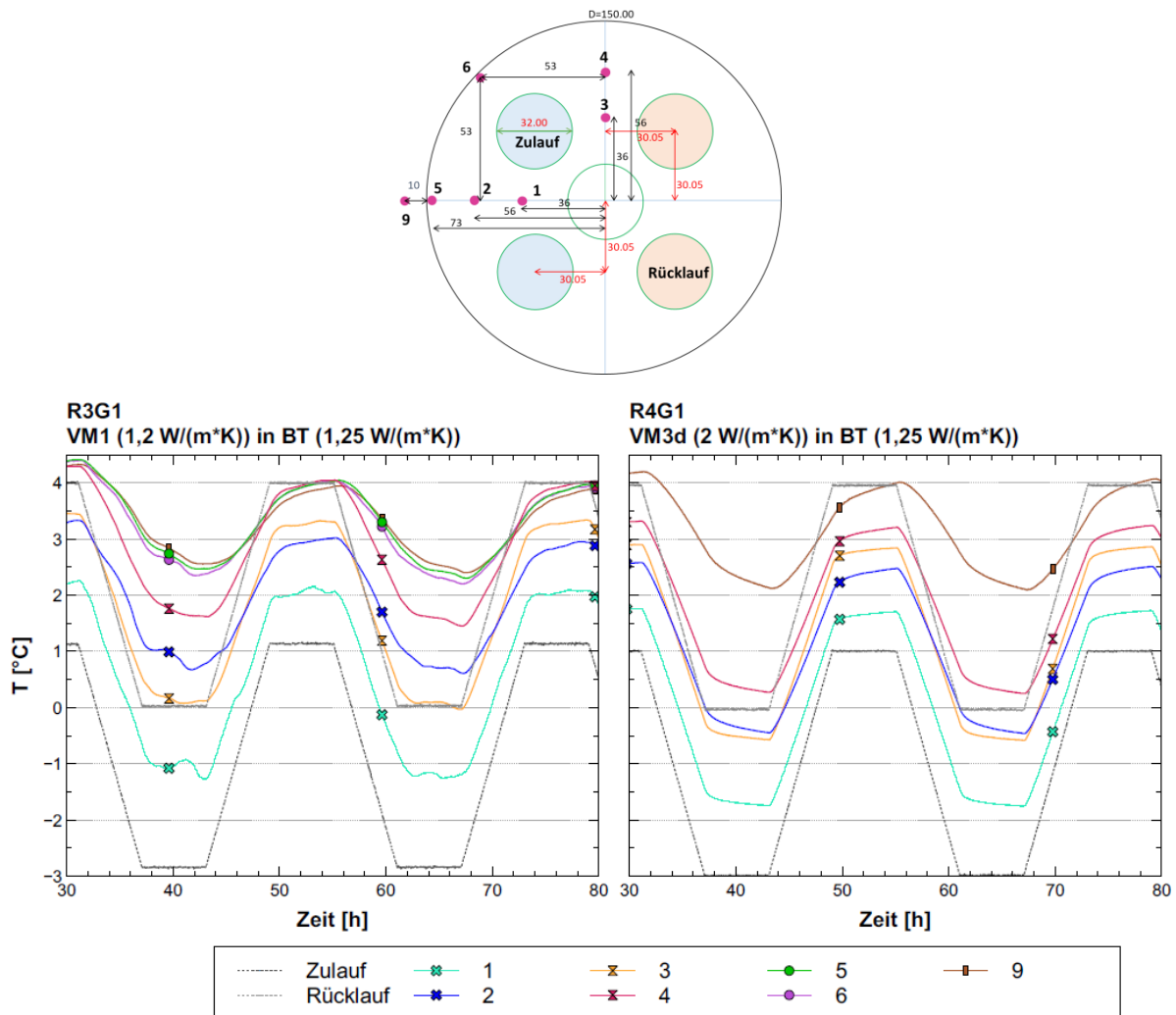


Abbildung 58: Vergleich der Temperaturen von VM1 und VM3d in Geometrie 1 mit umliegendem schlecht wärmeleitenden Bentonit-Boden.

Bei R4G2 (weniger asymmetrisch als die übliche G2-Geometrie) waren die Auswirkungen von zwei Nukleationen am Sensor G2-1 (beim dritten und sechsten Zyklus) zu beobachten, bei R4G3 wurden in 4 Zyklen (Zyklus 3 bis Zyklus 6) an den Sensoren G3-1 und G3-2 Nukleationseffekte beobachtet. Die beobachteten Auswirkungen sind jedoch sehr gering (Abbildung 60).

Die Abbildung 59 zeigt den Zustand des EWS-Segments der Konfiguration R4G3 am Ende des Frost-Experiments (vier Nukleationen beobachtet). Abgesehen von der Oberseite, wo das Verfüllmaterial durch den Kontakt mit Luft gehärtet wurde und die Begrenzungsspannung geringer war, erscheint das gesamte Segment weniger beeinträchtigt als die extern hergestellten Segmente der anderen Reihen. Die in Bodenkontakt gehärtete Fläche erscheint rau aber stabil.



Abbildung 59: visuelle Beobachtung des EWS-Abschnitt der Versuchskonfiguration R4G3.

### 9.5.6 Frost-Tau-Experimente Reihe 5

Verfüllbaustoff der Reihe 5 ist, wie bei Reihe 4, VM3d. Die EWS-Segmente der Reihe 4 und der Reihe 5 wurden aus derselben Mischung verpresst, R4 in-situ und R5 in einer Schalung. Zwei der Versuchskonfigurationen der Reihe 5 sind mit Bentonit-Boden befüllt und durch unterschiedliche Geometrien gekennzeichnet: (R5G2bent, R5G3). Als dritte Konfiguration wurde ein EWS-Segment mit Geometrie 2 in gesättigten Quarzsand eingebettet (R5G2sand).

Alle Konfigurationen werden mit dem Programm TP2 (Abbildung 46) betrieben. Bei R5G3 wurden aufgrund eines technischen Fehlers die Daten bei den ersten 2 Zyklen nicht erfasst. Ab Zyklus 3 stimmen alle R5G3 Daten mit den R4G3 Daten überein. Dies bedeutet, dass die beiden unterschiedlichen Herstellungsverfahren (in-situ/ex-situ) keinen Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben. Aus mechanischer Sicht wurde die höhere Stabilität der Versuche in Reihe 4 schon nachgewiesen.

In Abbildung 60 wird der Einfluss der drei verschiedenen Geometrien auf VM3d in Bentonit verglichen. Wie oben bereits angemerkt sind die Daten von Sensoren mit identischer Kennzeichnung auf Grund der unterschiedlichen Geometrien nicht direkt vergleichbar. Im Gegensatz zu den Geometrien G1 und G2 (keine Nukleation) wurden bei G3 Nukleationen bei vier Zyklen beobachtet. Wie das R4G3-Diagramm zeigt, wurden bei G3 viel niedrigere Temperaturen in der Nähe der kälteren Zulaufrohre erreicht, da diese zum einen weit vom Einfluss der wärmeren Rücklaufrohre entfernt sind und sich zum anderen in der Nähe des Bentonits befinden, der im Gegensatz zum Verfüllmaterial VM3d um die Rohre ein schlechter Wärmeleiter ist. Der Vergleich von Versuchen aus Reihe 4 und Reihe 5 in Abbildung 60 ist darin begründet, dass beide Reihen aus denselben Materialien bestanden und damit die Temperaturentwicklung identisch ist. Lediglich die Stabilität ist durch unterschiedlichen Einbau (in-situ vs. ex-situ) unterschiedlich

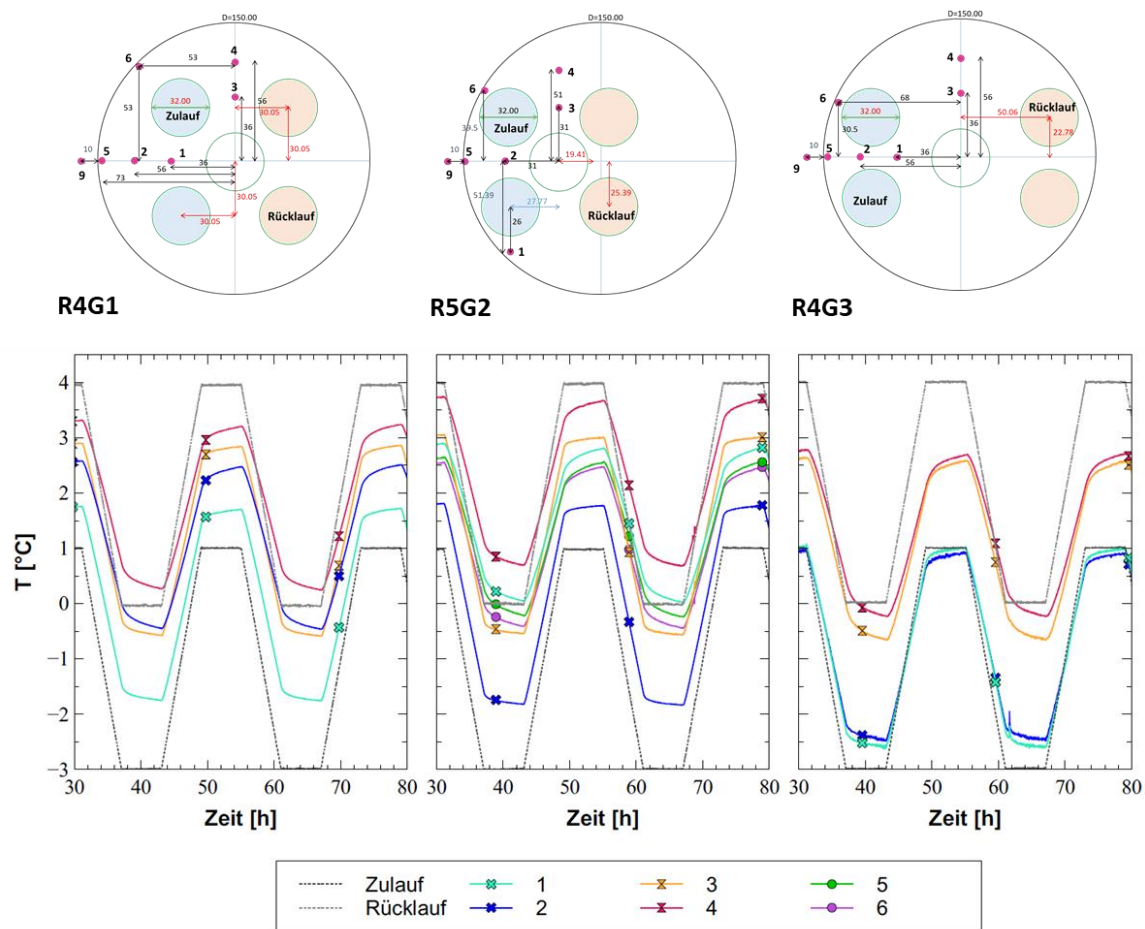


Abbildung 60: Temperaturschichtung der unterschiedlichen Geometrien für Reihe 4/5 (VM3d: 2 W/(m\*K), BT: 1,25 W/(m\*K))

Abbildung 61 zeigt die Versuchskonfigurationen R5G2 in Quarzsand bzw. in Bentonit. Die Auswirkungen des anstehenden Bodens auf die Temperaturverteilung im Ringraum ist klar erkennbar. So kühlt bei R5G2 mit umliegendem Quarzsand der Bereich zwischen Zulauf- und Rücklaufrohren schneller ab. Das Porenwasser im Quarzsand ist freier als im (gequollenen) Bentonit und kann somit leichter in die äußeren Schichten an der Bohrlochwand eindringen. Dies könnte, vor allem in der Nähe der an der Bohrlochwand liegenden kälteren Zulaufrohre, zu Frostbildung führen. In der Konfiguration mit Sand (Abbildung 61 links) werden in 5 von 6 Zyklen Nukleationen beobachtet, in der Konfiguration mit Bentonit (Abbildung 61 rechts) keine.





Abbildung 63 zeigt einen Vergleich zwischen den Verfüllmaterialien VM2 und VM3d in Geometrie 2 in gesättigtem Sand. Wie in Abbildung 61 (R5G2 Sand) waren auch bei R2G2 (VM2, Sand, Abbildung 63) bei allen Zyklen Nukleationsspitzen zu beobachten, obwohl es sich um das TP1-Programm handelt, bei dem in alle Segmente die Mindesttemperatur für 6 Stunden konstant gehalten wurde. Bei R5G2sand handelt es sich um TP2 (Abbildung 46). Aus thermodynamischer Sicht wurden für R2G2 niedrigere Temperaturen erwartet, da das Verfüllmaterial eine Wärmeleitfähigkeit  $>2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; (nicht gemessen) hat. Dies wird durch die Daten bestätigt: der Ringraum wird schneller gekühlt. Die Peaks für das VM2d-Material waren ebenfalls sehr ausgeprägt, als ob in der Nähe des Nukleationsorts mehr Wasser zur Verfügung gestanden hätte.

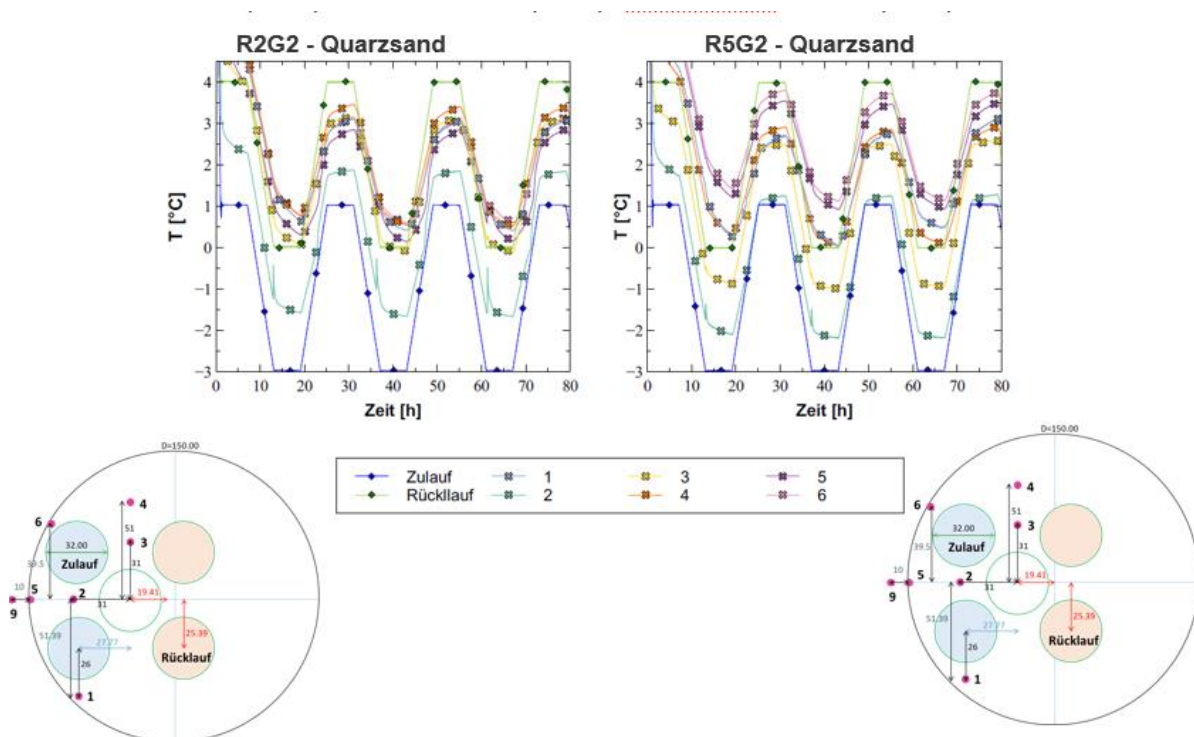


Abbildung 63: Vergleich der Verhalten von VM2 ( $>2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) rechts und VM3 ( $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) links in Geometrie 2 mit umliegendem stark wärmeleitenden Quarzsand-Boden ( $\text{QS}: 2,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )

Abbildung 64 zeigt der Zustand des Kernes der Konfiguration R5G2sand nach dem Frost-Experiment. Er war im Vergleich zum R2G2-Kern (Abbildung 56) wesentlich stabiler und zeigte weniger starke Risse, da bei R5G2 die kälteren Zulaufrohre nicht so nah am Rand des Bohrlochs lagen.



Abbildung 64: visuelle Beobachtung der Konfiguration R5-G2sand nach dem Frost-Experiment

### 9.5.7 Versuche zur Bestimmung von Beschädigungen der Verfüllbaustoffe durch Frost-Tau-Wechsel: Zusammenfassung und Interpretation

Die wichtigsten Ergebnisse der in Rahmen des AP 4 durchgeführten mittelskaligen Versuche sind im Folgenden zusammengefasst:

#### Gefrierort

- Durch die Untersuchung verschiedener Geometrien und der Möglichkeit, die Zu- und Rücklaufrohre im aufgebauten EWS-Abschnitt mit unterschiedlichen Temperaturen ( $\Delta T -3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) zu beaufschlagen, wurde gezeigt, dass die Nukleationsphänomene nur in unmittelbarer Nähe der kälteren Zulaufrohre auftreten, da hier die niedrigsten Temperaturen und in der Übergangszone zwischen PE-Rohr und Verfüllbaustoff die günstigsten thermodynamischen Bedingungen herrschen.
- Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der Temperaturbereich, in dem eine Nukleation stattfindet in Abhängigkeit des Verfüllbaustoffs ändert, da die Porenstruktur der ITZ für unterschiedliche Verfüllmaterialien im Kontakt mit PE Rohren unterschiedlich ist.
- Die Temperaturerhöhung infolge der freigesetzten Schmelzwärme äußert sich, wie bei AP 1, je nach Verfüllmaterial unterschiedlich. Der mikroskopische Wasserfilm um die Rohre und damit der Debonding-Effekt und die ITZ ändern sich, je nachdem wie viel freies Wasser das Verfüllmaterial enthält. So zeigt VM3d mit geringem Wassergehalt sehr kleine Peaks und VM1 aufgrund des höheren Wassergehalts ein Plateau.

### Thermodynamische (thermische) Aspekte

- Das Gefrieren dringt nicht in die poröse Struktur des Verfüllmaterials ein, sondern bleibt auf die ITZ beschränkt. Die entsprechenden Sensoren zeigen Temperaturen über Null oder leicht unter Null, aber keine Nukleation.
- Ob bei einem bestimmten Verfüllbaustoff eine Nukleation zu beobachten ist oder nicht, hängt davon ab, ob die thermodynamischen Bedingungen günstig sind, d. h. ob die kritische Temperatur zur Überwindung der Nukleationsbarriere erreicht ist.
- Im Vergleich zu den Verfüllmaterialproben von AP 1 wurden in AP 4 Nukleationen bei höheren Temperaturen für dasselbe Verfüllmaterial beobachtet. Dies erklärt sich durch eine höhere Instabilität der ITZ, die vom Gefrieren betroffen ist, sowohl durch eine andere Struktur (diesmal zwischen HDPE und dem Verfüllmaterial und viel ausgedehnter), aber auch durch die mechanische Wirkung (Mikrovibrationen) infolge der Turbulenz in den PE-Rohren.
- Im Allgemeinen hängen die Temperaturverteilung und damit die verfügbaren thermodynamischen Bedingungen von der Überlagerung folgender Faktoren ab:
  - Art des Verfüllmaterials, insbesondere seine Wärmeleitfähigkeit.
  - Betrieb der EWS (Minimalzulauftemperatur, Temperaturspreizung, Dauer der maximalen Entzugsleistung).
  - Umliegendes poröses Medium, insbesondere dessen Wärmeleitfähigkeit.
  - Geometrie: Sie bestimmt den minimalen/maximalen/durchschnittlichen Abstand im Verfüllbaustoff zwischen den Wärmetauschern und dem porösen Medium.
  - Räumliche Ausdehnung des Mediums („Domain“) und Temperaturbedingungen am Rand der „Domain“.

Wenn auch nur einer dieser Faktoren geändert wird, ändert sich auch die Art und Weise, wie die anderen unveränderten Faktoren das neue System beeinflussen (siehe Reihe 1 mit/ohne Isolierung oder siehe Simulationen der R5 im unendlichen Bereich).

### Mechanische Aspekte

- Die extern gefertigten EWS-Segmenten der Reihe 1 waren mehreren Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt und der umgebende gesättigte Sand ist manchmal gefroren. Daher waren später an der Außenoberfläche der EWS-Kerne leichte Mikrorisse zu beobachten (Abbildung 53) (Surface Scaling, typisch in Winter auf Straßen und an Gebäuden). Bei den asymmetrischen Geometrien, bei denen die Verfüllmaterialschicht zwischen der Bohrlochwand und den PE-Rohren dünn ist, wurden leichte kontinuierliche Risse entlang des vertikalen Profils der Zulaufrohre in Geometrie 2 bzw. aller Rohre in Geometrie 3 beobachtet (Abbildung 54). In Reihe 1 wurden alle Rohre mit derselben Temperatur betrieben.
- In dem extern gefertigt R2G2-Segment lagen die Zulaufrohre näher an der Bohrlochwand als in allen anderen G2-Konfigurationen. Die Verfüllmaterialsschicht (VM2 mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit) zwischen PE-Zulaufrohr und umliegendem Sand war sehr dünn ( $\ll 1\text{cm}$ ). Das Wasser drang in die ITZ. Die Nukleationsspitzen am Sensor 2 (zwischen den Rohren) waren sehr stark und nahmen an Intensität zu. Bereits beim dritten Zyklus war die Intensität der Nukleation so stark, dass sie selbst am Sensor 5 an der Bohrlochwand durch Wärmeleitung (aktuelle Temperatur  $>0\text{ °C}$ ) registriert wurde (Abbildung 63). Entsprechend trat bei R2G2 der größte Schaden auf (Abbildung 56).
- Beim extern gefertigten EWS-Segment der Reihe 3 kam es bei den asymmetrischen Konfigurationen R3G2 und R3G20 zu keiner Nukleation, und es wurden keine vertikalen Risse entlang der Bohrlochwand nahe der Zulaufrohre beobachtet.

- Bei der in-situ hergestellten EWS der R4G3 (in Bentonit-Boden verpresst) wurden trotz beobachteten Nukleationen keine Risse entlang der Zulaufrohre beobachtet (Abbildung 59). Im Gegenteil erschienen alle EWS-Kerne sehr stabil.
- Bei den extern gefertigten EWS-Segmenten R5G2 und R5G3 mit umliegendem Bentonit-Boden kam es zu keiner Nukleation, und es wurden keine vertikalen Risse entlang der bohrlochwandnahen Zulaufrohre beobachtet.
- Bei dem extern gefertigten asymmetrischen EWS-Segment R5G2sand (in Sandboden) wurden mehrere Nukleationen, sowie leichte vertikale Risse entlang der bohrlochwandnahen Zulaufrohre beobachtet.

Daraus kann geschlossen werden, dass die extern gefertigte EWS-Kerne mechanisch schwächer waren, da beim Aushärten in einem PVC-Rohr zwei ITZs entstehen, d.h. zwei Übergangszone mit kritischer Porosität, einer internen zwischen HDPE-Rohren und Verfüllmaterial und einer externen zwischen dem Schalungsrohr aus PVC und dem Verfüllmaterial. Nach Entfernung der Schalung unterlag dieser äußere Bereich während dem Einbau in das Experiment Temperaturänderungen und es fand eine Verdunstung des in den größeren Poren enthaltenen Wassers statt. Dieser Bereich (äußere ITZ) zeigte nach Versuchsende die größten Schäden. (Surface Scaling in Reihe 1, [15]).

Für die in der Anwendung der Oberflächengeothermie erreichten Temperaturen (hier ist der Worst Case dargestellt: Zulauftemperatur: -3; Rücklauftemperatur: 0) waren die praxisnah gebauten EWS-Abschnitte nukleationsbeständig. Selbst wenn alle gezeigten negativen Bedingungen im Feld zusammen auftreten sollten, d.h. schlimmstes Temperaturszenario im Querschnitt an einer bestimmten Tiefe (Zulauftemperatur: -3; Rücklauftemperatur: 0), zwei kalte Zulaufrohre sehr nahe beieinander, sowie ungünstige Kombination aller oben genannten Faktoren, muss man auch den positiven Effekt des passiven Erddrucks berücksichtigen (sowohl während der Aushärtung des Verfüllbaustoffs als auch während des Betriebs, der in dieser Studie nicht vollständig reproduzierbar war).

Zusammenfassend wurde sowohl theoretisch als auch experimentell gezeigt, dass bei den hier untersuchten Temperaturen ein sachgerecht eingebauter Erdwärmesonden-Verfüllbaustoff zwar in den Frostbereich ( $T > -3^{\circ}\text{C}$ ) abkühlt, eine „Durchfrostung“ (also eine Eisbildung) jedoch auf die ITZ beschränkt bleibt.

Für die hydraulisch-thermischen Modelle der AP 5, AP 6 und AP 7 bedeutet dies, dass die Modellierung eines Phasenwechsels im Verfüllbaustoff nicht sinnvoll ist, sondern nur auf das umliegende Aquifermaterial mit größeren Poren angewandt werden muss. Mit anderen Worten: Das Phänomen ist im Hinblick auf die Temperaturentbreitung um die EWS (in den Versuchen oder im Feld) vernachlässigbar. In den Versuchen (ungünstigster Fall: kein passiver Erddruck) könnten die Auswirkungen nur aus mechanischer Sicht relevant sein (Beschädigung bei asymmetrischen Geometrien wurde beobachtet).

#### 9.5.8 Versuche zur Bestimmung von Läufigkeiten durch Temperaturschrumpfungen in Sonde, Gebirge und Bohrlochwandung

Drei Versuche (Reihe 6, s. Tabelle 18) wurden für „Läufigkeit-Experimente“ zur Validierung des mechanisch-thermisch-hydraulischen Modells des AP 5b durchgeführt. Zur Ermittlung der Durchlässigkeitsänderung infolge temperaturinduzierter Schrumpfungs- und Ausdehnungsprozesse in Sonde, Gebirge und Bohrlochwandung wurden in den Experimenten der Reihe 6

Temperaturprogramme mit Abkühlungsphase bei niedriger Temperatur ( $> 0\text{ °C}$ ) und Aufwärmphase bei höheren Temperaturen ( $> 20\text{ °C}$ ) eingesetzt.

Zur Reduzierung freier Parameter wurden Verfüllmaterial VM3d und eine Rohranordnung nach Geometrie 1 (Abbildung 45) gewählt. Änderung der Durchlässigkeit wurden mittels eines Falling-Head-Permeameters gemessen.

Die drei Experimente der Reihe 6 wurden identisch aufgebaut und durch zwei unterschiedliche Thermostate anhand des Temperaturprogramms TP3 (Abbildung 65) mit vier Temperaturzyklen beaufschlagt.

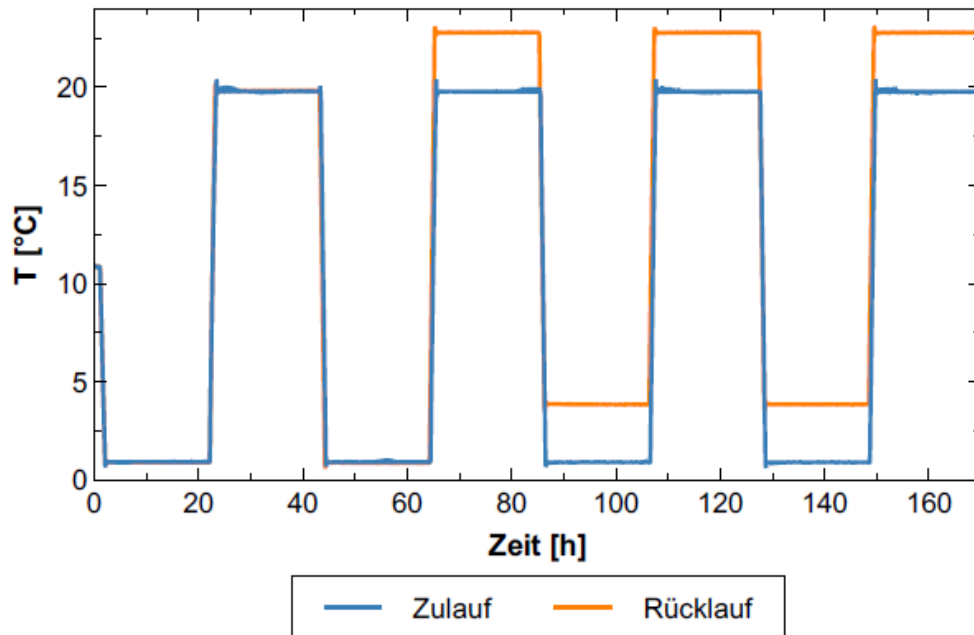


Abbildung 65: Temperaturprogramm TP3 in den Läufeigkeits-Experimente verwendet. AK: Abkühlung, AW: Aufwärmung

Frosteinflüsse sollten nicht untersucht werden, daher wurden im ersten Zyklus Zu- und Rücklauf mit derselben Temperatur ( $T_{\min} = 1\text{ °C}$  /  $T_{\max} = 20\text{ °C}$ ) betrieben, in den darauffolgenden Zyklen wurde die Komplexität erhöht und ein Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf von 3 K gewählt. Der Wechsel zwischen Temperaturextremen fand jeweils linear innerhalb einer Stunde statt, die Extremtemperaturen wurden jeweils 20 Stunden gehalten.

Bei diesen Versuchen war eine initial gute Anbindung der Sonden an das Gebirge extrem wichtig. Daher wurden die EWS wie bei Reihe 4 (Abbildung 49) beschrieben in-situ hergestellt.

Um ein festes Gebirge zu reproduzieren, dessen Eigenschaften für den Bau des Experiments geeignet waren, entschied sich das IGS für eine Rezeptur auf der Basis von Sand, Wasser und einem neuen, kommerziell erhältlichen Bindemittel, Carbofill. Da der Anteil der Zuschlagstoffe (Sand, Bindemittel, Wasser) die Wärmeleitfähigkeit des Endprodukts, die Bearbeitbarkeit während der Zubereitung und die Aushärtungszeit bestimmen, mussten zahlreiche klein- und mittelskaligen Voruntersuchungen durchgeführt werden (Abbildung 66). Insbesondere musste vorhergesagt werden zu welchem Zeitpunkt der Boden standfest genug ist die EWS-Schablone zu ziehen, dabei jedoch noch duktil genug, nicht zu brechen.



Abbildung 66: Voruntersuchungen des Härteflüssigbodens auf die Kleinskala (IGS, VEGAS)

Das endgültige Rezept für 1m<sup>3</sup> Flüssigboden bestand aus:

- 1473,7 kg Quarzsand („Sand 0-2 70 S.1211“, Hersteller: Kieswerk und Baustoffindustrie Kern GmbH & CO.),
- 184,2 kg Carbofill,
- 276,3 L Wasser.

Die im Labor des IGS in kleinem Maßstab durchgeführten Durchlässigkeitstests ergaben für den so hergestellten Flüssigboden eine hydraulische Leitfähigkeit von  $k_f = 1,2 - 1,8 \cdot 10^{-8}$  m/s. Die drei Versuche wurden parallel betrieben, wobei lediglich R5P3 (Abbildung 67 rechts) mit Temperatursonden ausgestattet war, um sicher zu gehen, dass Durchlässigkeitsänderungen auf Schrumpf-/Schwellprozesse und nicht auf präferentielle Fließwege entlang von Kabeln zurückzuführen sind. Bei R6P1 und R6P2 wurden während des Betriebs des Temperaturprogramms zu verschiedenen Zeitpunkten die vertikale hydraulische Durchlässigkeit bestimmt. Aufgrund der identischen Randbedingungen können die Daten miteinander kombiniert werden.

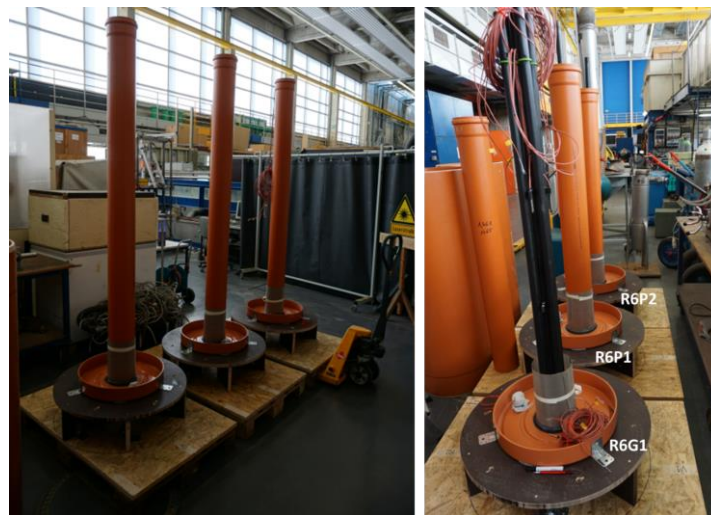


Abbildung 67: Vorbereitung der unterschiedlichen Versuchsstände: R6G1 mit Temperatursensoren und die zwei Permeameter R6P1 und R6P2.

Abbildung 68 zeigt die Schema der Versuchssäule, die als Falling-Head-Permeameter betrieben wurde. Die Geometrie des Gesamtsystems sowie die angelegten Potentiale sind in Tabelle 21 beschrieben.

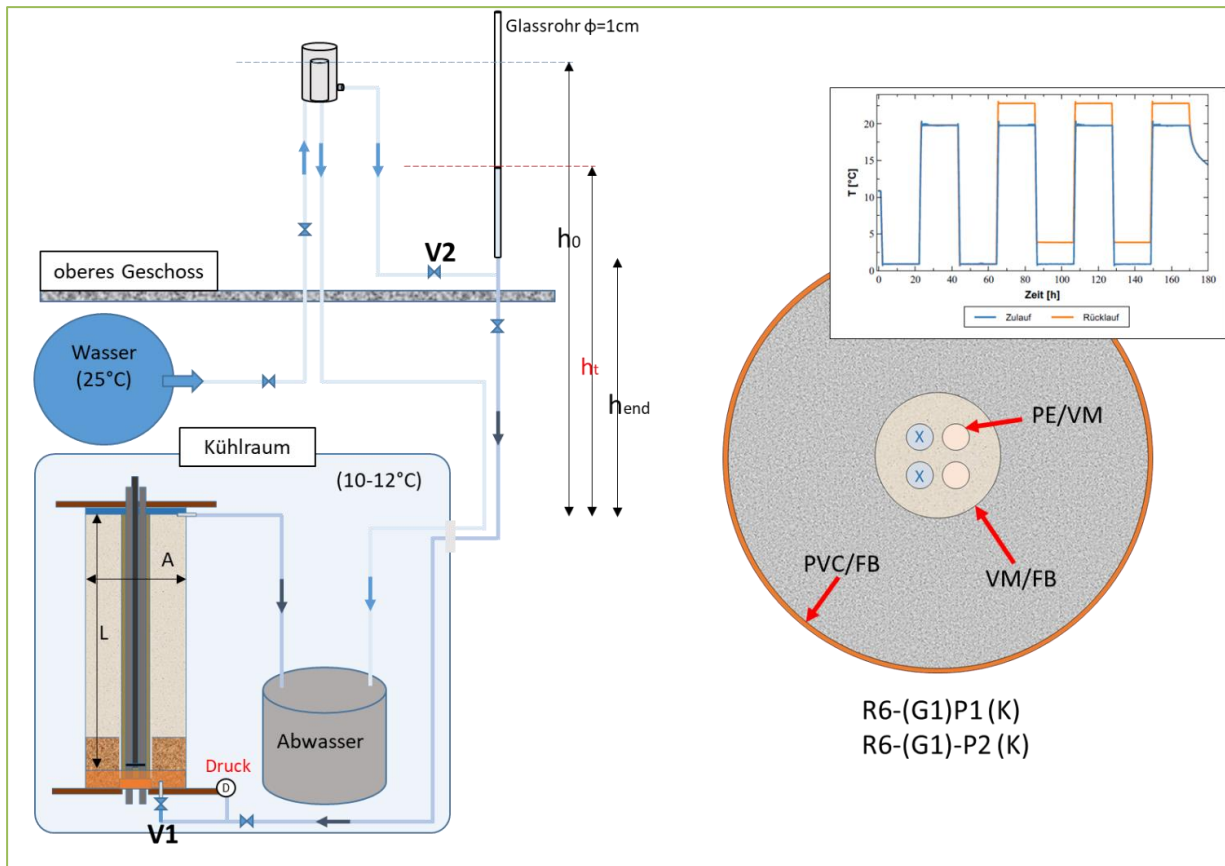


Abbildung 68: Schema des Aufbaus der Permeameter-Versuche

Da zu Beginn, bei größeren Gradienten, die Werte aufgrund der höheren Turbulenz etwas höher sind, wird ein Mittelwert der letzten Werte ( $h(t)$ : 3,3 – 3,1 m) verwendet.

Tabelle 21: Parameter in der Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit

$L_{tot}$ - Boden+ Filter	1,37	m
a Kapillarrohr ( $\varphi=1\text{cm}$ )	$7,85 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^2$
A ( $\varphi=50\text{ cm}$ )	0,196	$\text{m}^2$
A Boden	0,179	$\text{m}^2$
A EWS	$1,77 \cdot 10^{-02}$	$\text{m}^2$
$h_0$	3,9	m
$h_{end}$	3,1	m

Betrachtet man den in Abbildung 68 (rechts) dargestellten schematischen Querschnitt des gesamten Versuchs, so sind mehrere Schnittstellen zu erkennen, die zu präferentiellen Fließwegen führen könnten:

- Schnittstelle zwischen PE-Rohren und Verfüllmaterial (PE-VM)
- Schnittstelle zwischen Verfüllmaterial und Flüssigboden (VM/FB)
- Schnittstelle zwischen Boden und der PVC-Innenwand der Versuchssäule (PVC/FB)

Es war somit zu erwarten, dass der initiale  $k_f$ -Wert des Gesamtsystems größer als der Effektivwert basierend auf den einzelnen porösen Medien ist. Potentielle Veränderungen des  $k_f$ -Werts des Systems während des Versuchs werden sowohl von den gewählten Temperaturwerten [28] und deren Fluktuationen als auch von allen vorhandenen Komponenten und Übergangszonen beeinflusst.

Nach Einbau der Innenschalung wurde am Fuß der Säulen zunächst ein gesättigter Sandfilter und daran anschließend der Flüssigboden über ein Befüllrohr unter Wasser eingebaut (Abbildung 67, Abbildung 69). Nach Aushärtung wurde die Schalung gezogen und der EWS-Ringraum wie bereits beschrieben verpresst. Der Sandfilter wurde dabei durch ein Edelmetallgewebe gestützt.

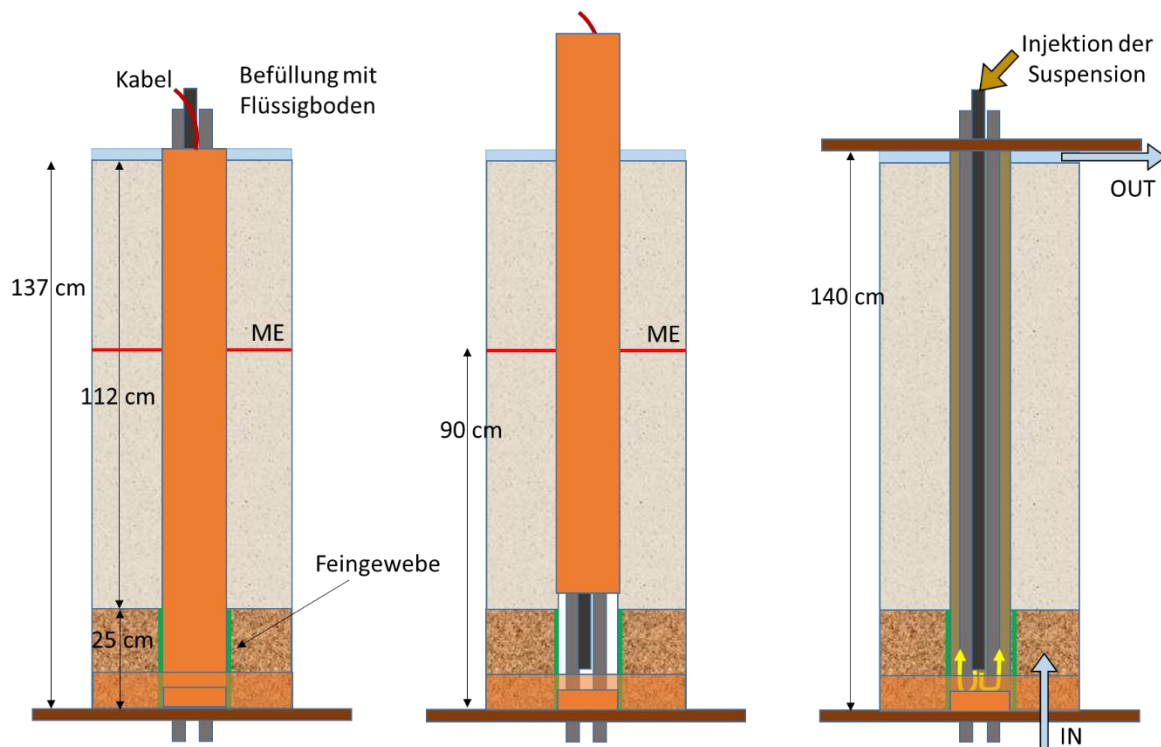


Abbildung 69: Vorbereitungsverfahren der R6-Versuchssäule

Bei dem mit Temperatursensoren ausgestatteten Versuch (R6-G1) war die Messebene, auf der die Sensoren verteilt sind, 90 m von der Basis entfernt (Abbildung 69 links, Mitte), damit die Konvektion im Inneren des gesättigten Sandfilters weniger beeinträchtigt wird. Abbildung 70 zeigt die Anordnung der Temperatursensoren, die sowohl im EWS-Ringraum (1,2,3,4) als auch im Flüssigboden (5,6,7,8) angeordnet waren. Zusätzlich wurden weitere Sensoren für die Randbedingungen vorgesehen (A, B, C an der Innenwand in unterschiedliche Richtungen in Abbildung 70), um die Unsicherheiten in den Simulationen zu verringern und damit die Validierung des thermisch-mechanisch-hydraulischen Modells genauer zu machen. Bei R6G1 waren die Temperatursensoren nahe der Rücklaufrohre angeordnet, bei R6P1 und R6P2 nahe der Zulaufrohre. Das heißt, die in R6G1 gemessene Temperaturentwicklung ist nicht direkt auf die Permeabilitätsmessungen R6Px anwendbar, die Übertragung findet, wie in Kapitel 0 beschrieben mittels des numerischen Modells statt.



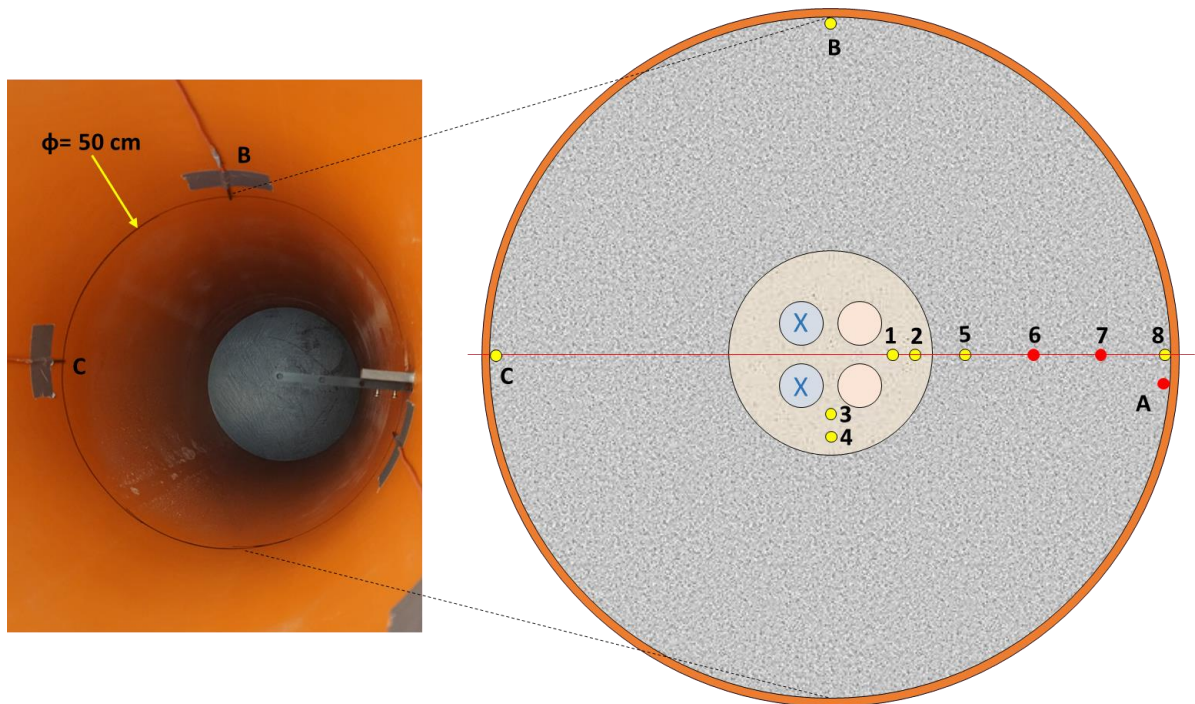


Abbildung 70: Anordnung der Sensoren auf der Messebene im Experiment R6G1.

Abbildung 71 zeigt in den beiden oberen Diagramme die während der Versuche gemessenen hydraulische Leitfähigkeiten, dabei entspricht die Zeitachse der des Temperaturprogramms TP3 (Abbildung 65). Da die Permeameter-Messungen manuell durchgeführt werden mussten, wurden die Werte in R6P1 und R6P2 nicht zeitgleich aufgenommen; es ist jedoch für jede K-Messung die Temperaturverteilung (aus R6-G1) bekannt. Die rot eingekreisten Messwerte bei R6P1 waren durch die Bildung von Luftblasen im Hydrauliksystem verfälscht. Dies konnte bei P2 durch Verbesserung des Systems verhindert werden. Das untere Diagramm zeigt die zugehörige Temperaturverteilung an einigen Messpunkten (Abbildung 70 rechts gelb markiert). Die Anfangswerte der hydraulischen Leitfähigkeit des Systems sind ca.  $6,2 \cdot 10^{-8}$  (R6P1) und ca.  $8,0 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  (R6P2), die Endwerte liegen bei ca.  $6,0 \cdot 10^{-8}$  (R6P1) bzw.  $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  (R6P1). Die R6-Versuchstände sind zum Berichtszeitpunkt noch nicht abgebaut, daher können keine Aussagen zu Schäden nach visueller Inspektion während des Abbaus gemacht werden.

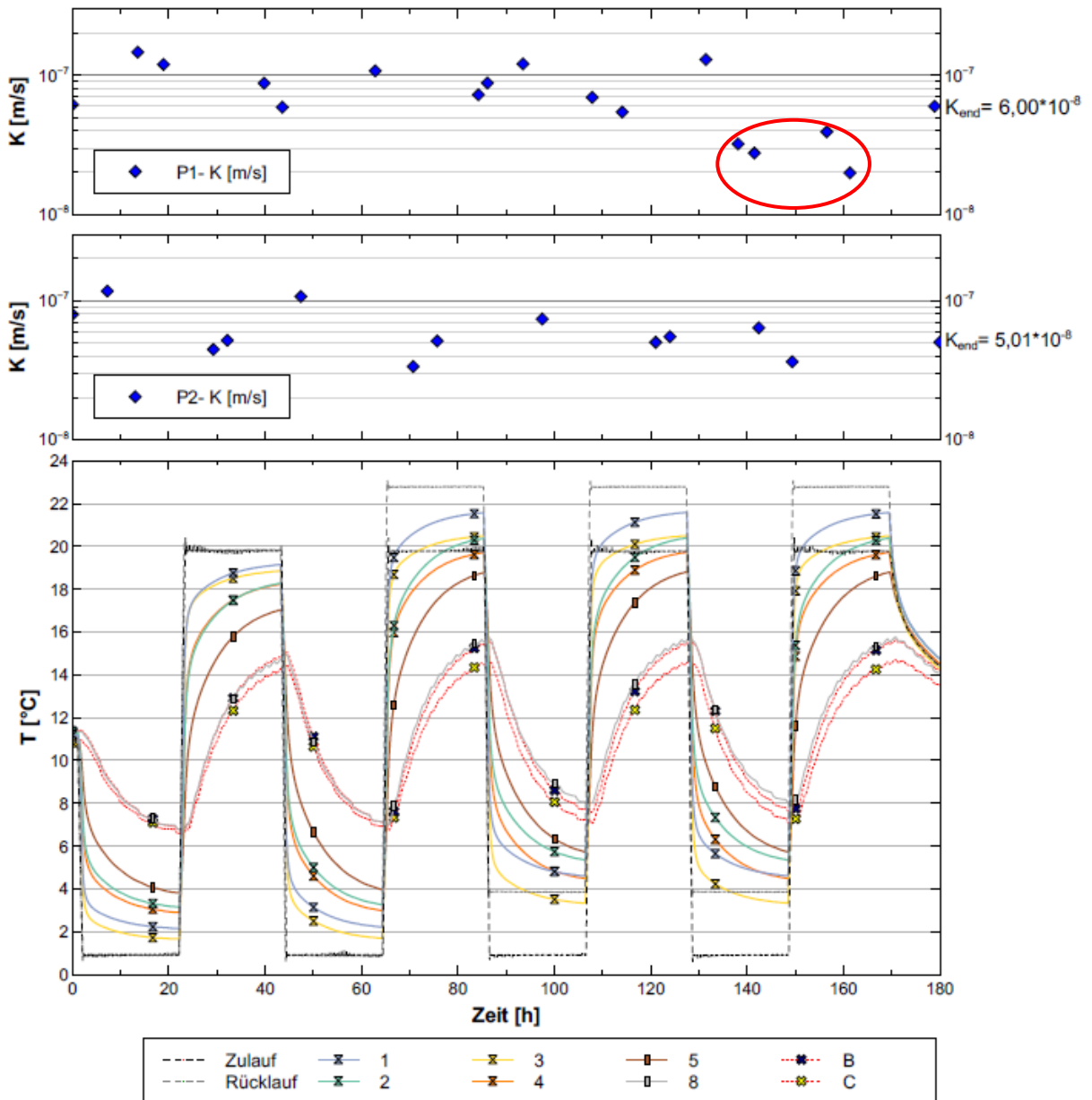


Abbildung 71: Darstellung der Temperatur- und hydraulische Leitfähigkeitsdaten der R6-Reihe im Rahmen des TP3-Programms.

## **9.6 AP 5a: Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse anhand der in AP 4 experimentell ermittelten Messdaten (Solites)**

In AP 5a erfolgte der Vergleich von numerischen Simulationen mit den mittelskaligen Frost-Experimenten des AP 4, welche zeigen soll, dass die numerischen Simulationen geeignet sind, um die gemessenen Temperaturen im Verfüllmaterial und im Untergrund mit hinreichender Genauigkeit abzubilden.

Für einige der in AP 3b ermittelten Worst-Case-Varianten wurde dazu ein Vergleich zwischen den in AP 4 für diese Varianten ermittelten experimentellen Daten und den entsprechenden numerischen Simulationen durchgeführt.

Das Eintreten einer durch Nukleation beeinflussten Frostbildung, wurde bei den Experimenten in AP 4 in der Hinterfüllung und der Bentonitformation nicht festgestellt, sondern nur an der Grenzfläche zwischen PE-Rohren und Hinterfüllung. Deshalb wurde ein Phasenwechsel in der numerischen Simulation nicht berücksichtigt.

Für einen Vergleich der Simulationsmodelle mit den experimentellen Untersuchungen war eine räumliche Beschränkung der Simulationsmodelle auf den Versuchsaufbau der Experimente (s. AP 4) erforderlich. Zudem mussten die Simulationsrandbedingungen an die Versuchsrandbedingungen angepasst werden.

Um den Vergleich durchführen zu können, wurden die Randbedingungen der durchgeführten Versuche (u.a. Zulauftemperaturen der EWS, Volumenstrom in den Sondenrohren, Wärmekapazität und effektive Wärmeleitfähigkeit des eingebauten Untergrunds, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre, Stoffwerte des verwendeten Wärmeträgermediums) in die numerischen Modelle implementiert. Neben den aus den Versuchen vorliegenden Messwerten wurden hierfür auch Literaturwerte verwendet.

### 9.6.1 Numerische Modellierung

Es wurden Modelle für drei unterschiedliche Sondengeometrien, G1, G2 und G3 (Abbildung 72), nach den durch VEGAS zu Verfügung gestellten Maßen der Experimente aus AP 4, erstellt.

In Geometrie 1 sind Vor- und Rückläufe symmetrisch um den Verpressschlauch angeordnet, welcher sich im Zentrum des Bohrlochs befindet.

Bei Geometrie 2 ist das Sondenbündel an den Bohrlochrand versetzt. Somit befinden sich die kühlen Sonden des Vorlaufs nahe an der Bohrlochwand und es verbleibt wenig Hinterfüllung zwischen Sonde und umliegender Geologie.

Bei Geometrie 3 sind Vor- und Rückläufe an die gegenüberliegenden Bohrlochränder versetzt. Der Verpressschlauch befindet sich wiederum im Zentrum des Bohrlochs. Geometrie 2 und 3 stellen daher ungünstige Fälle in Bezug auf den Temperaturverlauf im Erdreich dar.

Die Modellierung erfolgte mit dem Finite Elemente Programm FEFLOW v. 7.3 (update 3) der DHI WASY GmbH. Die zugrundeliegende Numerik kann [34] und [35] entnommen werden. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden keine eigenen Stoffgesetze entwickelt oder die Berech-

nungsmethoden von FEFLOW bearbeitet. Eine Anpassung an die Versuchsbedingungen erfolgte ausschließlich durch Variation der Eingabeparameter. Die Modelle wurden durch den in FEFLOW implementierten Algorithmus „GridBuilder“ zum Erstellen von Gitternetzen erzeugt und beinhalten gerundet je 32000 Elemente. Sie stellen einen 2D-Schnitt durch den den Modellen zugrundeliegenden Versuchsaufbau dar. Aufgrund dieser Meshingmethode und der spezifisch gewählten Elementanzahl der einzelnen Komponenten sind die Komponenten des Versuchsaufbaus wie z.B. Vor- und Rücklauf in den 2D-Modellen (vergl. Abbildung 72 und Abbildung 73) gut erkennbar.

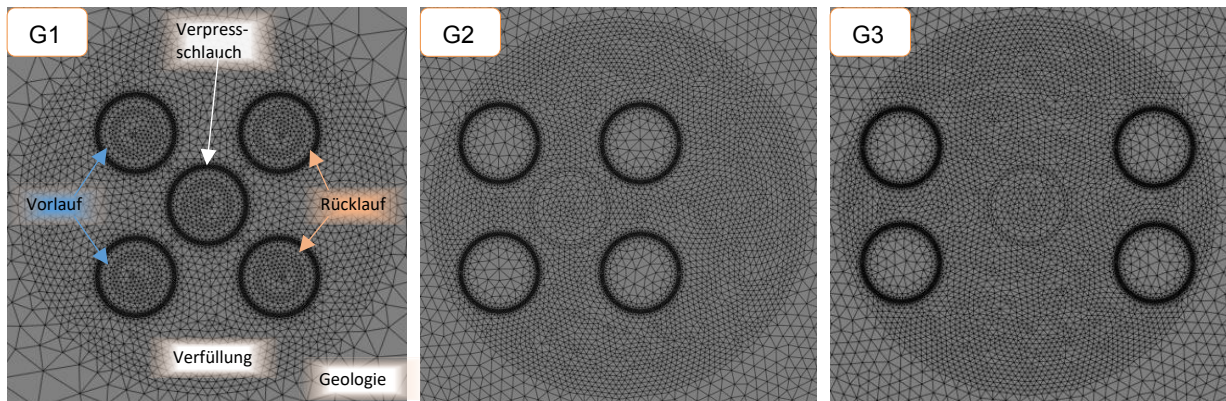


Abbildung 72: Modellerte Sondenkonfigurationen

Der Versuchsaufbau nach AP 4 bildet einen 1,4 m langen Abschnitt einer Erdwärmesonde nach, bei dem Vor- und Rücklauftemperaturen unabhängig voneinander eingestellt werden können. An der Außenseite befindet sich ein 12,3 mm starkes PVC-Rohr mit einem inneren Radius von 250 mm, welche die anschließende, künstliche und 167,3 mm starke geologische Formation einfasst. Das Bohrloch im Inneren dieser Formation hat einen Radius von 75 mm und beinhaltet die in Abbildung 72 gezeigten Sondengeometrien. Sondenrohre und Verpressschlauch bestehen aus 32 x 3,2 mm HDPE-Rohren und besitzen eine Wärmeleitfähigkeit (WLF) von 0,49 W/(mK). Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in den Sondenrohren wurden gemäß des VDI-Wärmeatlas [36] nach anerkannter Nußelt-Korrelation berechnet. Für den in den Versuchen eingestellten Volumenstrom von 1098 L/h des 20 %igen Wasser/Glykol-Gemischs ergibt sich somit eine angepasste WLF von 0,33 W/mK.

Die thermischen Randbedingungen sind durch die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Temperatursensoren an der Außen- oder Innenseite der Versuchsaußenwand gegeben.

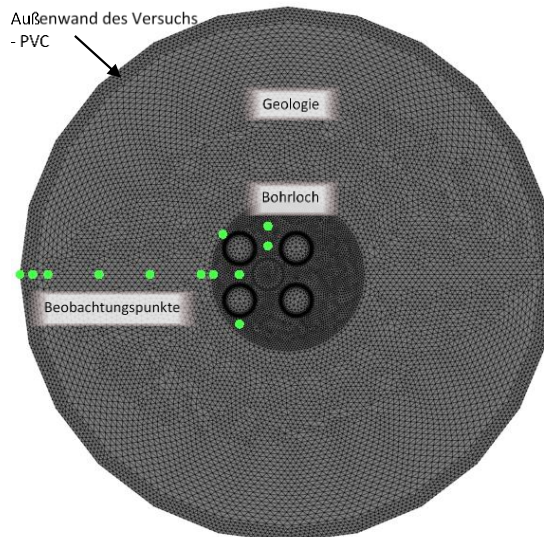


Abbildung 73: exemplarische Darstellung der gesamten Modellierung mit Beobachtungspunkten anhand von Geometrie G2

Insgesamt wurden 7 Versuchskonstellationen (Tabelle 22) mit unterschiedlichen Geometrien und Materialparametern simuliert, die denen der von VEGAS durchgeführten Experimenten entsprechen (Tabelle 18). Im Ergebnisteil werden ausgewählte Varianten der Versuchsreihe R5G2 näher beschrieben.

Tabelle 22: Betrachtete Versuchsvarianten

Variante	Parametervariation
R3G1	-
R3G2	Variation in Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre und Bentonit
R4G2	-
R4G3	-
R5G2	Variation in Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre und Bentonit und Wärmekapazität des Verfüllmaterials
R5G2 mit quasi-unendlicher Ausdehnung	Variation in Wärmekapazität des Verfüllmaterials
R5G3	Variation in Wärmekapazität des Verfüllmaterials

### Materialparameter

Die grundlegenden Materialeigenschaften können Tabelle 23 und Tabelle 24 entnommen werden. Die für die Parametervariation zusätzlich verwendeten Materialeigenschaften werden im Ergebnisteil aufgeführt.

Tabelle 23: Grundlegende Materialeigenschaften der durchgeführten Simulationen

	Wärmekapazität [MJ/m <sup>3</sup> K]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit (WLF) [W/(m·K)]	Angepasste WLF (RE=3900)
PE Sondenrohre	2.09	930	0.49	0.33
PE Verpressschlauch	2.09	930	0.49	-
PVC Außenwand	1.74	1395	0.15	-
Wärmeträgermedium	3.90	1037	0.50	-

Tabelle 24: Versuchsspezifische Materialeigenschaften

Geometrie 2	Verfüllmaterial	Wärmekapazität (Variante a)	4,8 MJ/m <sup>3</sup> K
		Wärmekapazität (Variante b)	1.536 MJ/m <sup>3</sup> K
		Thermische Leitfähigkeit	2 W/mK
		Dichte	1920 kg/m <sup>3</sup>
	Bentonit	Thermische Leitfähigkeit	1,25 W/mK
		Dichte	1401 kg/m <sup>3</sup>
Geometrie 3	Verfüllmaterial	Wärmekapazität (a)	4,8 MJ/m <sup>3</sup> K
		Wärmekapazität (b)	1.536 MJ/m <sup>3</sup> K
		Thermische Leitfähigkeit	2 W/mK
		Dichte	1920 kg/m <sup>3</sup>
	Bentonit	Thermische Leitfähigkeit	1,25 W/mK
		Dichte	1401 kg/m <sup>3</sup>

Ein wesentlicher Diskussionspunkt im Projektkonsortium war die unbekannte Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Bentonits, nachdem die Quelltonpellets zusammen mit Wasser in den Versuch eingebracht wurden. Deshalb wurden zwei von VEGAS zu Verfügung gestellte Bentonit-Proben in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) am Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) untersucht. Bei den Proben handelt es sich um einen kompaktierten Bentonit (A) und einen nicht kompaktierten Bentonit (B). Für die finalen Simulationen wurde daher der Mittelwert aus den in Tabelle 25 aufgeführten Messergebnissen von 1,25 W/mK gewählt.

Tabelle 25: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung

Probe	Wärmeleitfähigkeit [W/m <sup>2</sup> *K]	Wassergehalt [Gew. %]
Bentonit A	1,2±0,12	34,27
Bentonit B	1,3±0,13	48,42

### 9.6.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen für die Geometrien 2 und 3 sowie der Vergleich mit den experimentellen Daten wird in dem zusammenfassenden Kapitel 9.8 dargestellt und diskutiert.

Im Laufe der Projektbearbeitung von AP 5 wurde in Absprache der Projektpartner der Fokus auf die Versuchsreihen mit Geometrie 2 und 3 gelegt. Die simulierten Versuchsreihen mit Geometrie 1 stammen aus einem frühen Stadium des Projekts auf dessen Darstellung der Ergebnisse daher verzichtet wird.

#### Parametervariation 1 - Wärmekapazität

Für die Wärmekapazität des verwendeten Verfüllbaustoffs liegen keine eindeutigen und belastbaren Daten vor, Herstellerangaben und weitere Literaturwerte unterschieden sich teils deutlich. Um den Einfluss der Wärmekapazität und die Wirkung auf die thermischen Eigenschaften im Versuch und dem numerischen Modell abschätzen zu können, wurde diese Größe für die Versuchsreihe R5G2 (a, b) und R5G3 (a, b) mit Werten aus Tabelle 24 variiert. Nachfolgend wird ein Vergleich zwischen ausgewählten Beobachtungspunkten für den Versuch R5G2

dargestellt wobei die Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs bei Variante a 4,8 MJ/m<sup>3</sup>K und bei Variante b 1,5 MJ/m<sup>3</sup>K beträgt. Abbildung 74 zeigt die Sensorpositionen und Temperaturen nach 150 Stunden Simulationsdauer. Die Temperaturmessdaten des Sensors F1-5 dienen als äußere Randbedingung, die über die gesamte Innenseite der PVC-Wand angelegt wurde. Abbildung 75 bis Abbildung 80 vergleichen den Temperaturverlauf von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten jeweils bei hoher und niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs exemplarisch an drei Messpunkten. Dabei ist zu sehen, dass sich die Simulationsdaten zwischen den Varianten nicht erkennbar unterscheiden. Dieses Bild zeigte sich auch bei den übrigen Vergleichen mit Variation der Wärmekapazitäten.

Es ist festzuhalten, dass die veränderte Wärmekapazität keinen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

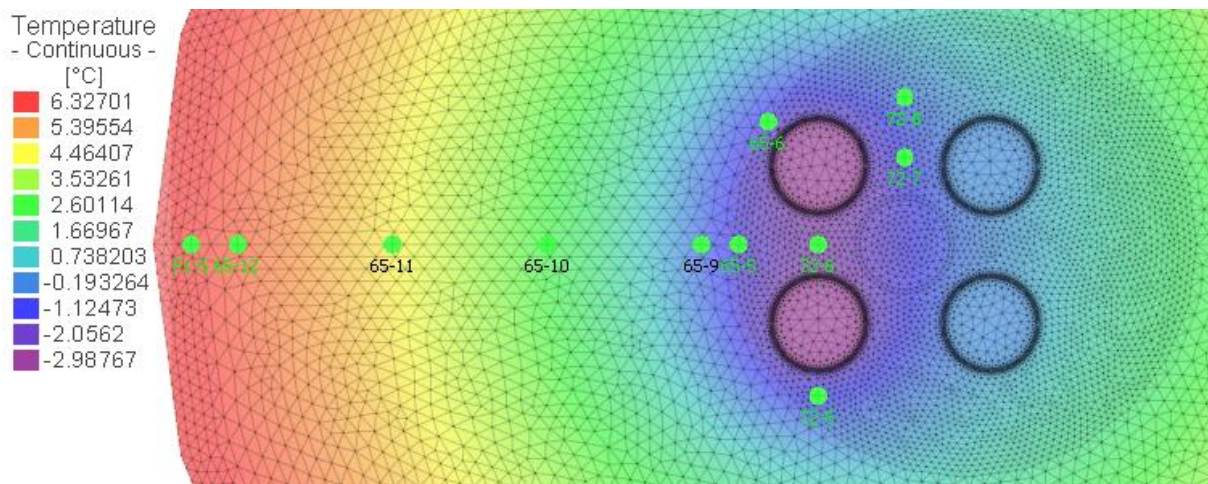


Abbildung 74: Sensorpositionen und Temperaturen nach 150 Std. R5G2 Modell a.

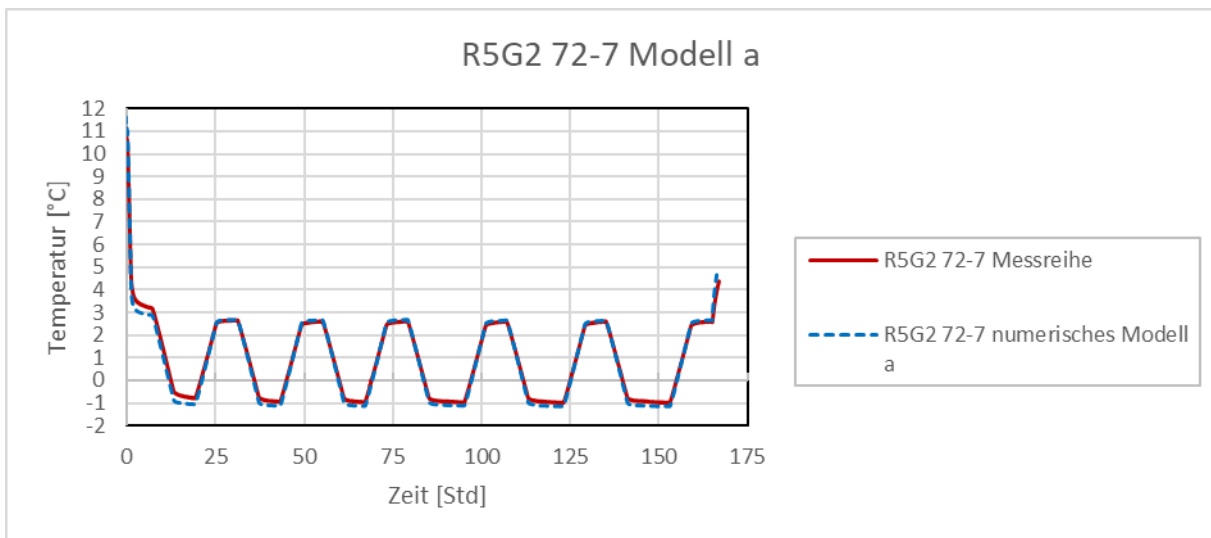


Abbildung 75: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-7 bei hoher Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (4,8 MJ/m<sup>3</sup>K).

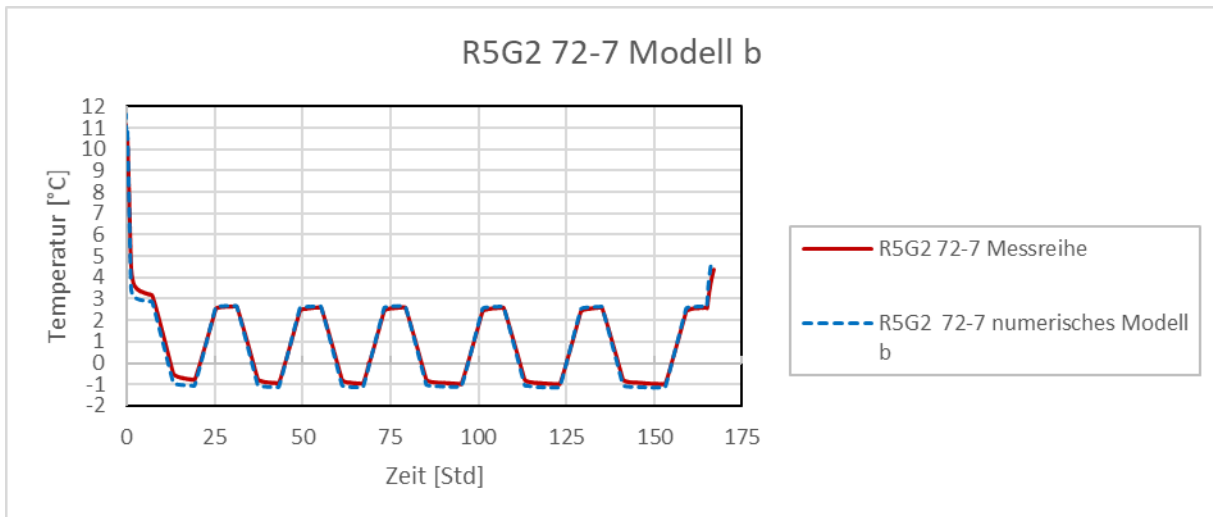


Abbildung 76: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-7 bei niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (1,5 MJ/m³K)

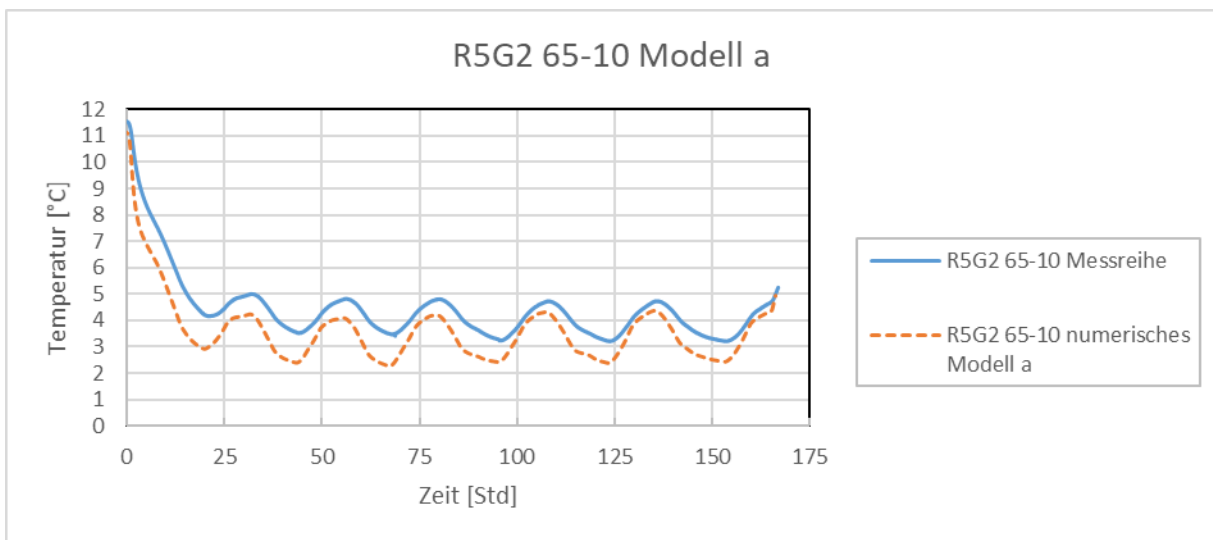


Abbildung 77: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei hoher Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (4,8 MJ/m³K)

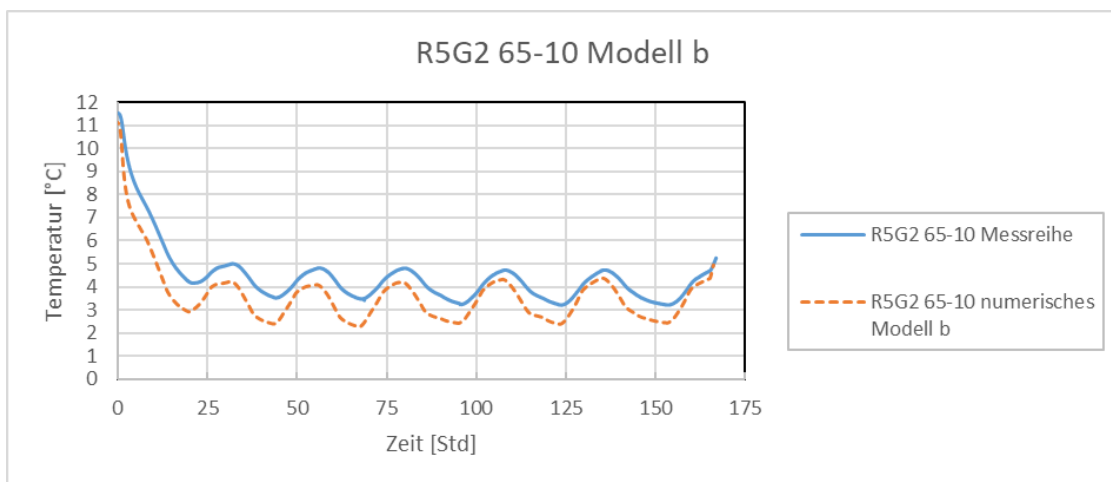


Abbildung 78: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (1,5 MJ/m³K)



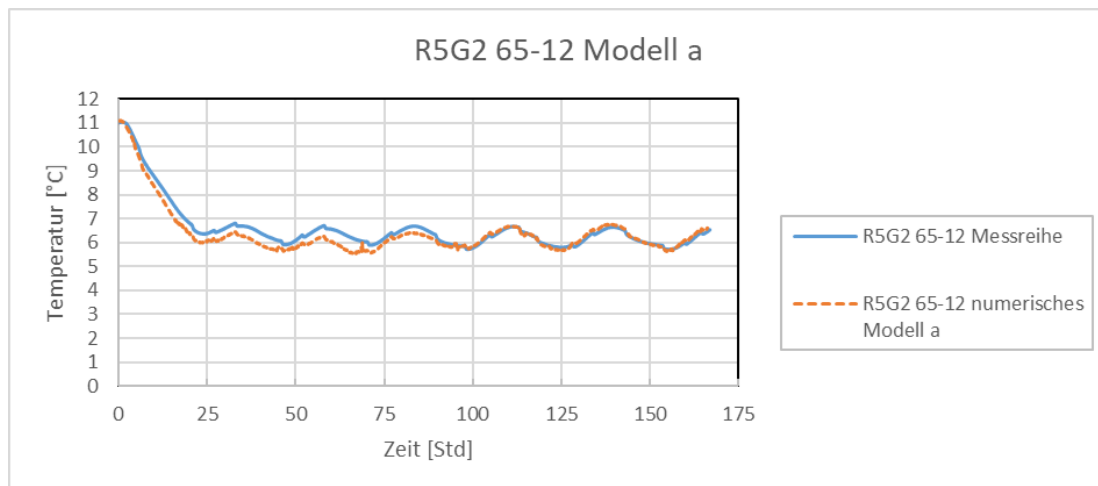


Abbildung 79: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-12 bei hoher Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (4,8 MJ/m<sup>3</sup>K)

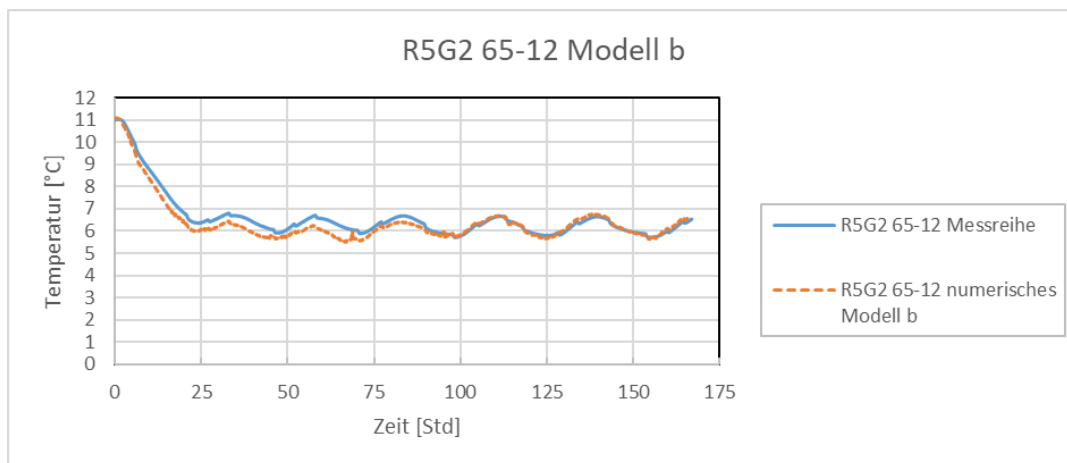


Abbildung 80: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-12 bei niedriger Wärmekapazität des Verfüllbaustoffs (1,5 MJ/m<sup>3</sup>K)

## Parametervariation 2 - Wärmeleitfähigkeit

Um die Ergebnisse der Modellierung mit den experimentell gewonnenen Daten anzugleichen, wurde für einige Versuchsreihen eine Parametervariation der Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre durchgeführt. Abbildung 81 zeigt die Sensorpositionen und Temperaturen nach 150 Stunden Simulationsdauer. Die Simulation wurde mit den Parametern in Tabelle 23 und Tabelle 24 als Variante a durchgeführt jedoch mit einer Wärmeleitfähigkeit des Bentonits von 1,2 W/mK.

Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen Abweichungen zwischen Simulationen mit normaler Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre von 0,33 W/mK, wie sie in anderen Simulationen verwendet wurde und Simulationen mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit von 0,15 W/mK und den Messwerten aus den Experimenten.

Es zeigt sich deutlich, dass die reduzierte Wärmeleitfähigkeit ein Angleichen zwischen Experiment und Simulation bewirkt. Von der Entwicklung ausgenommen ist hiervon, wie zu erwarten, der sehr dicht an der äußeren Randbedingung befindliche Sensor 65-12, da dieser sehr weit vom Einflussgebiet der inneren Randbedingung, der Vor- und Rückläufe, entfernt ist.

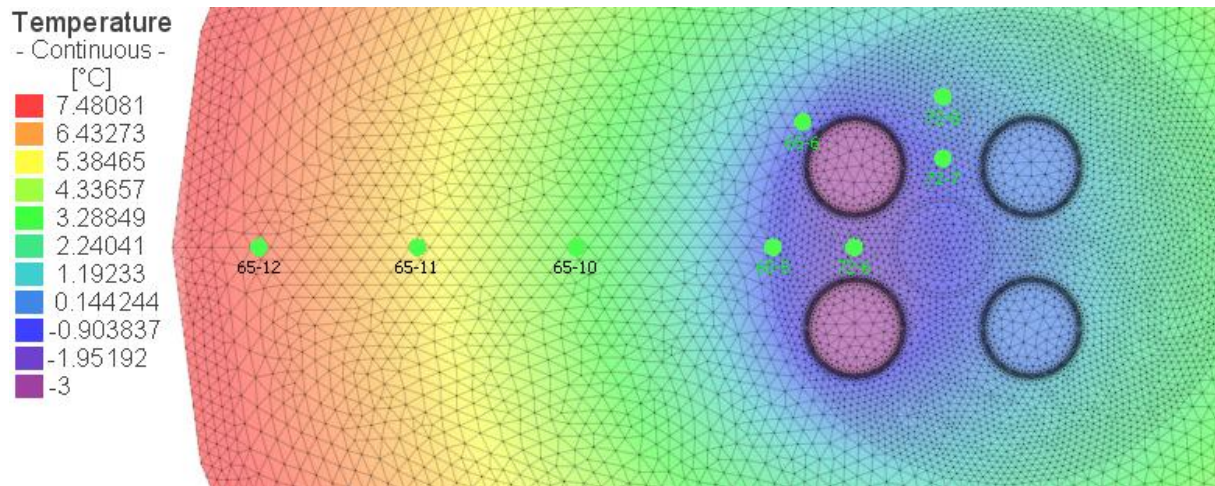


Abbildung 81: Sensorpositionen und Temperaturen nach 150 Std, R5G2 Bentonit

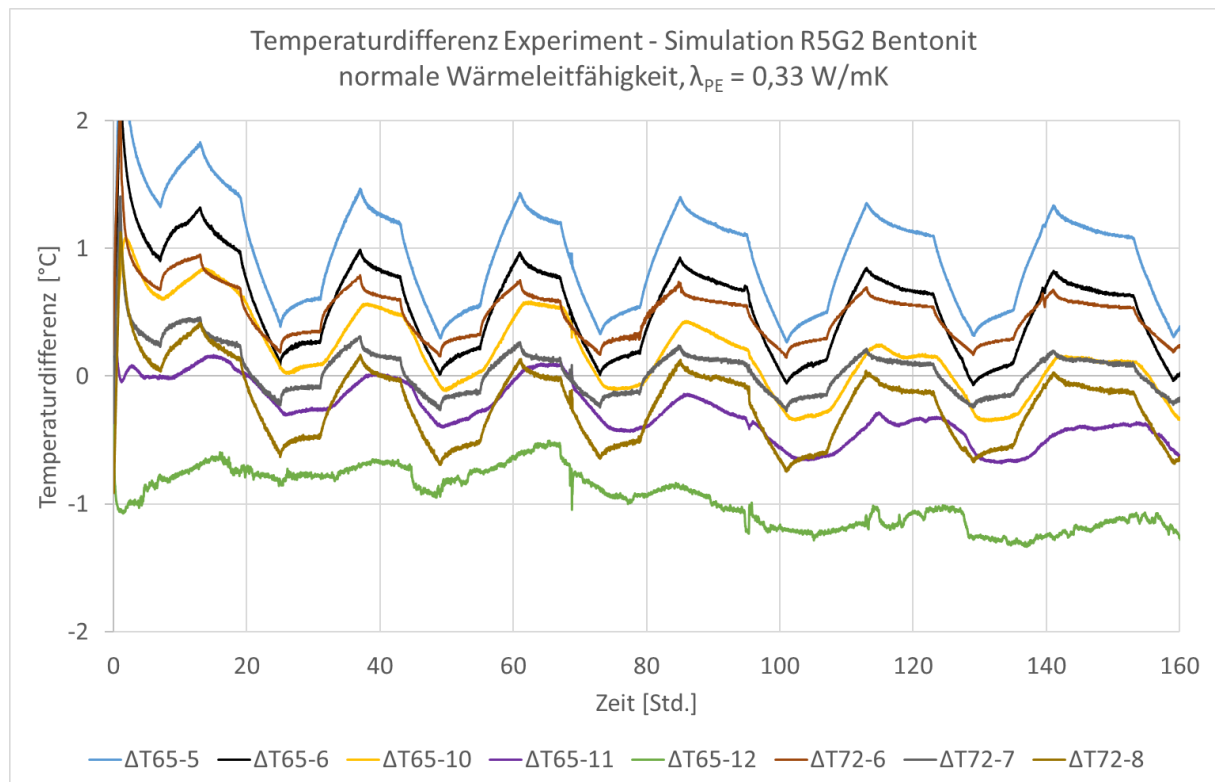


Abbildung 82: Darstellung der Temperaturabweichung zwischen Simulation und Experiment an den Messpunkten bei normaler Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre

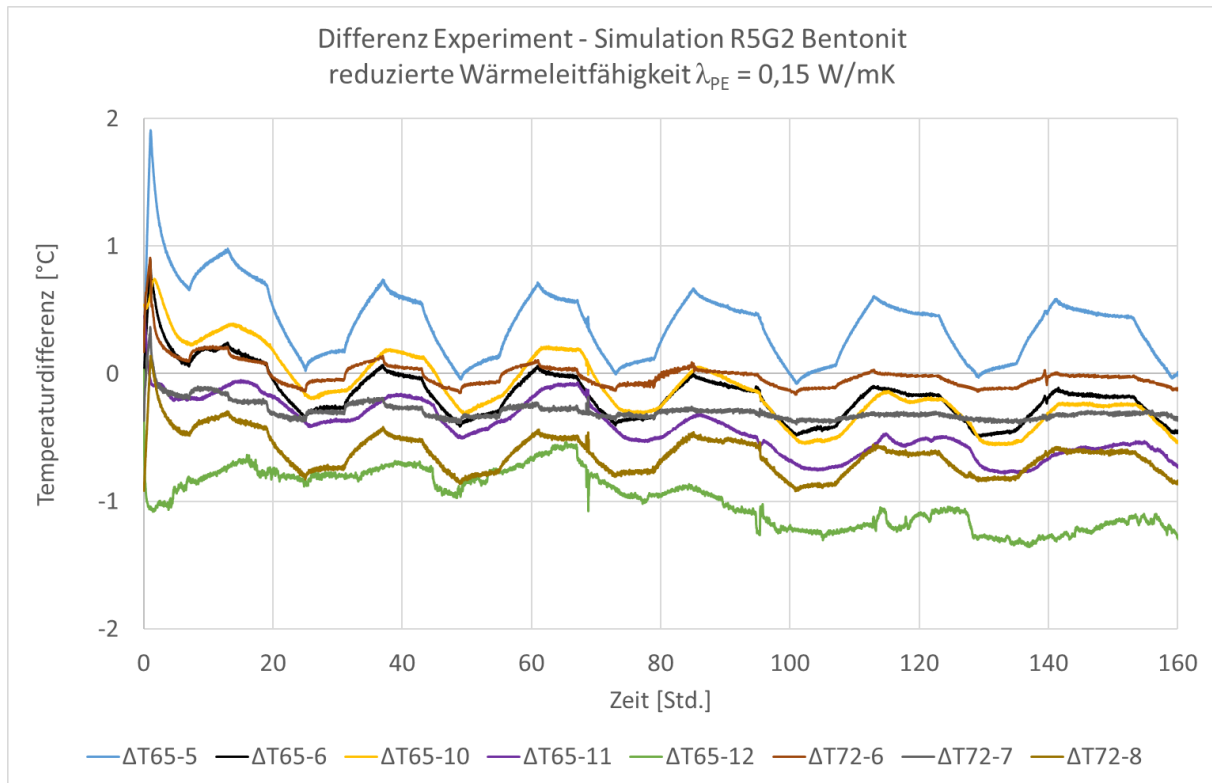


Abbildung 83: Darstellung der Temperaturabweichung zwischen Simulation und Experiment an den Messpunkten bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der Sondenrohre

Abbildung 85 bis Abbildung 92 zeigen eine Gegenüberstellung der Messdaten mit den Simulationsergebnissen der Sensoren 65-5, 65-10, 65-11 und 72-6 (vergl. Abbildung 84). Mit den verwendeten Materialparametern wurden die besten Ergebnisse erzielt, wenn eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit simuliert wurde. Bis auf einzelne Sensoren liegt hier die Abweichung zwischen 0 K und maximal 0,5 K. Für die Simulationen mit normaler Wärmeleitfähigkeit betragen die Abweichungen bis zu 1,5 K.

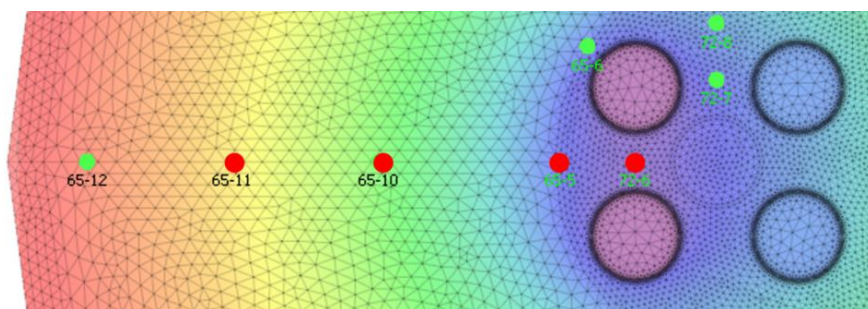


Abbildung 84: Sensorpositionen der nachfolgenden Einzelbetrachtung

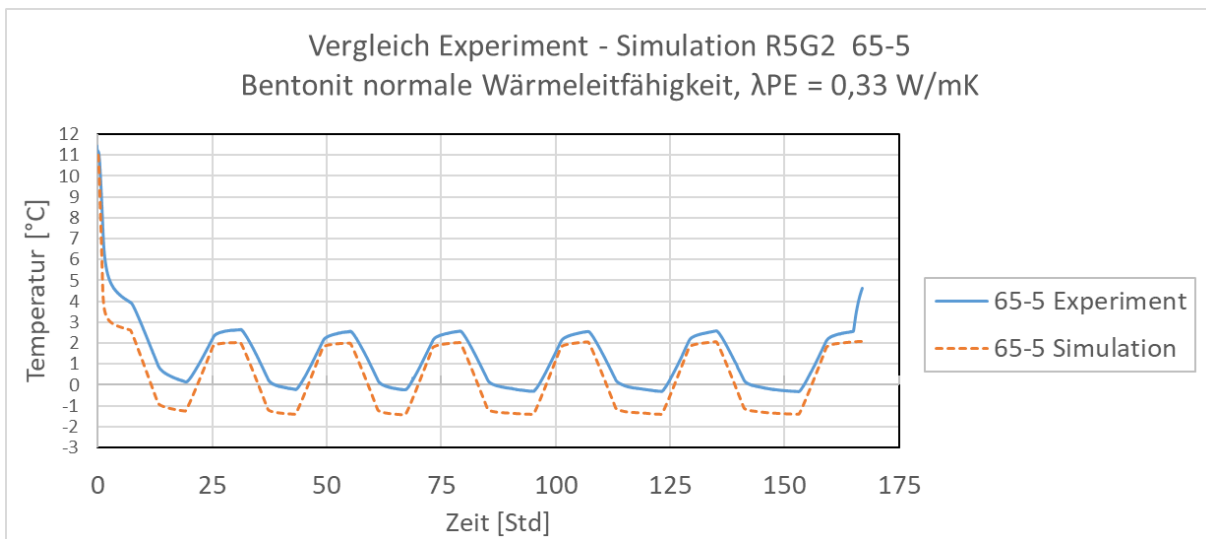


Abbildung 85: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-5 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK)

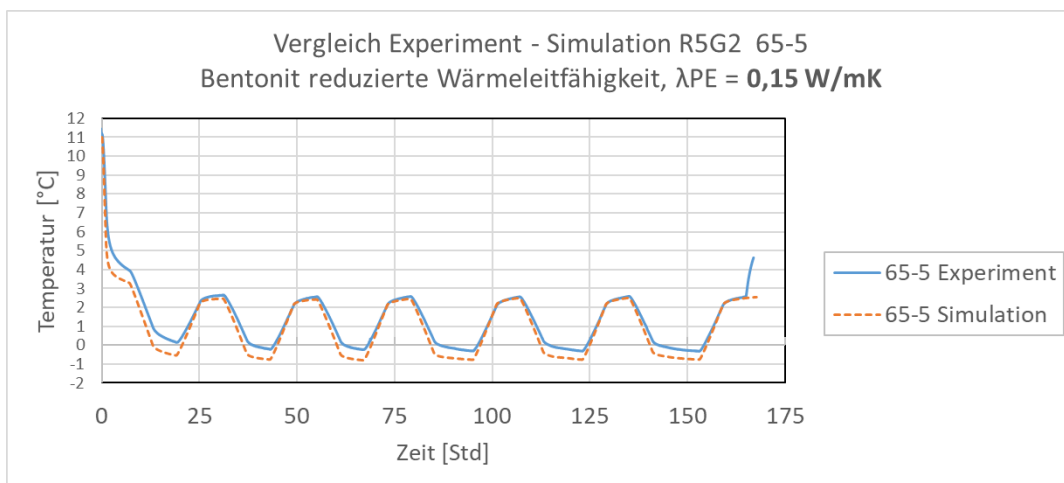


Abbildung 86: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-5 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK)

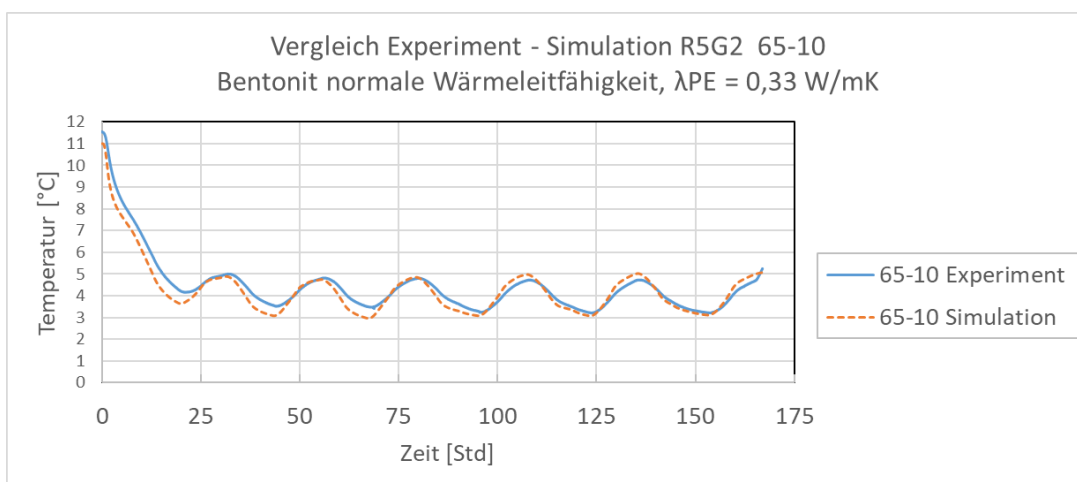


Abbildung 87: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK)

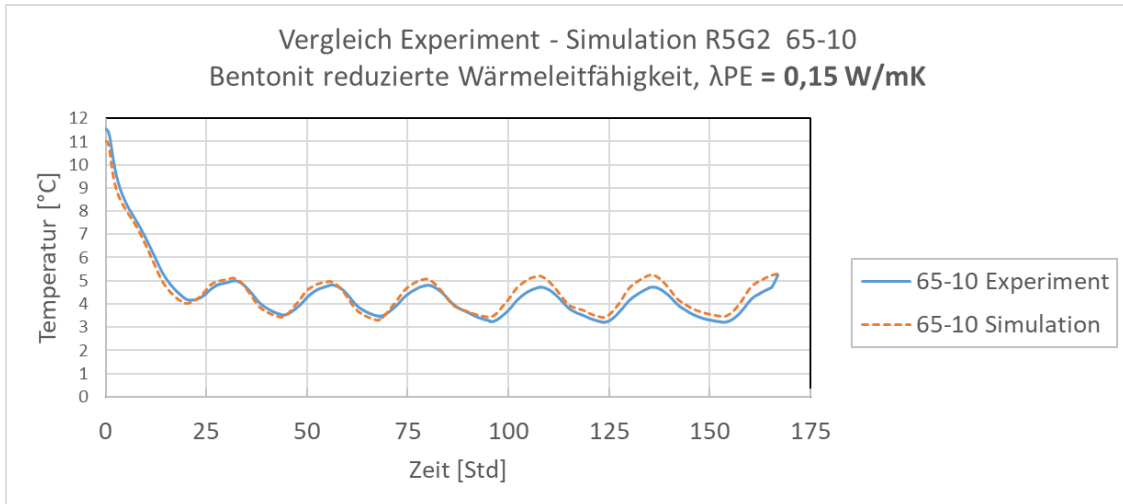


Abbildung 88: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-10 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK)

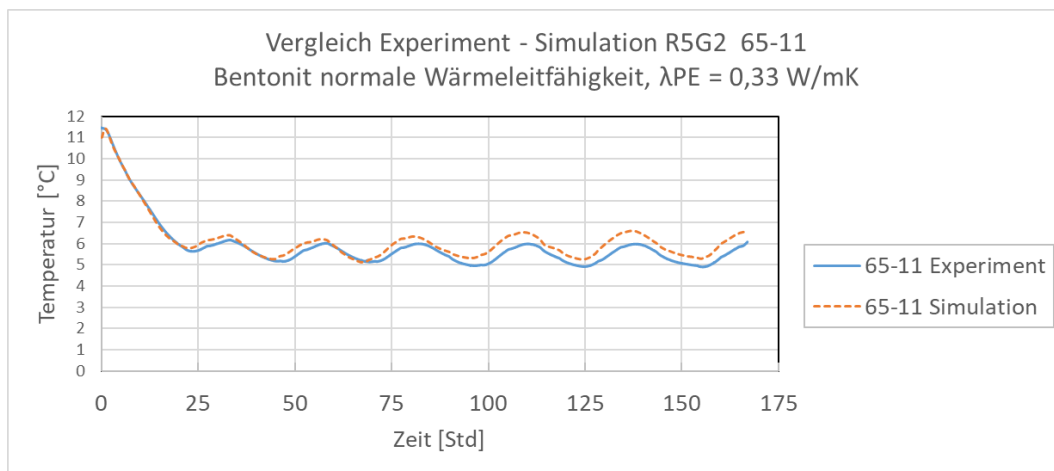


Abbildung 89: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-11 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK)

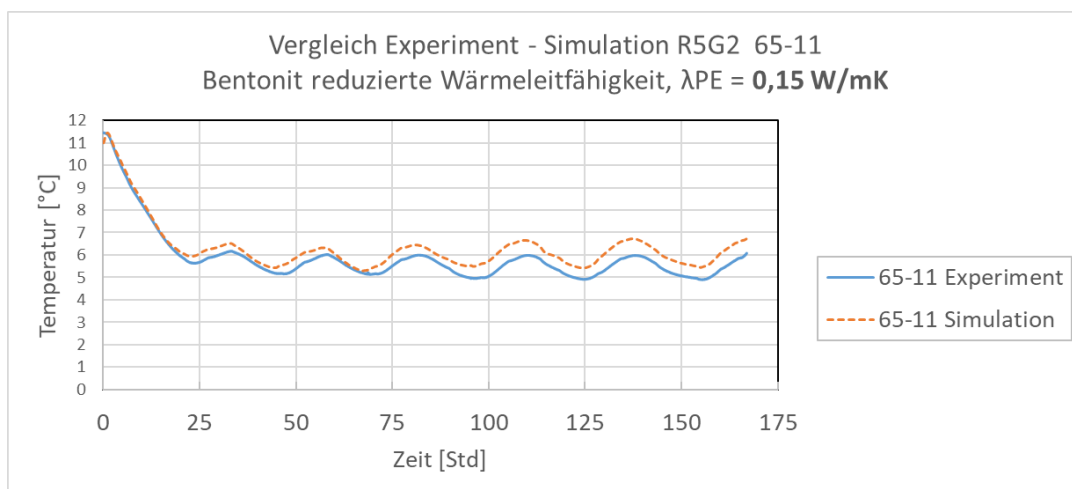


Abbildung 90: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 65-11 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK)

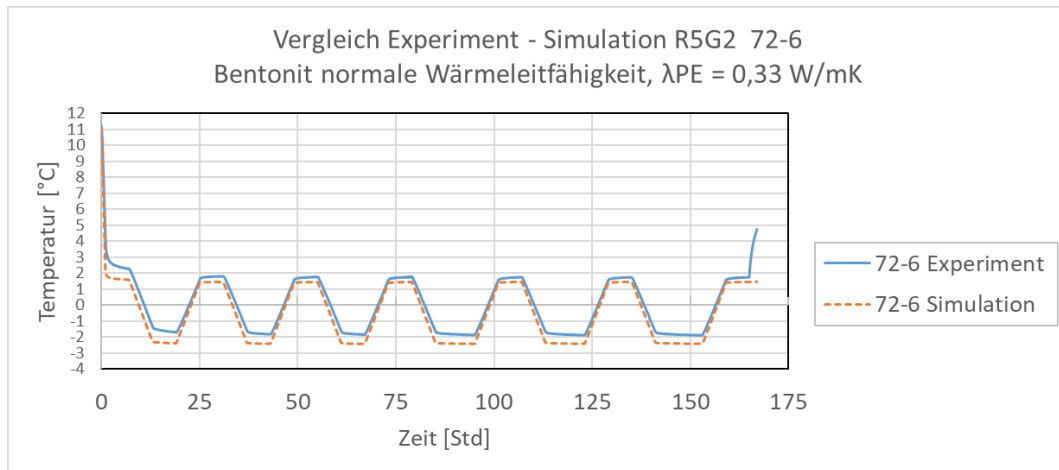


Abbildung 91: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-6 bei normaler Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,33 W/mK)

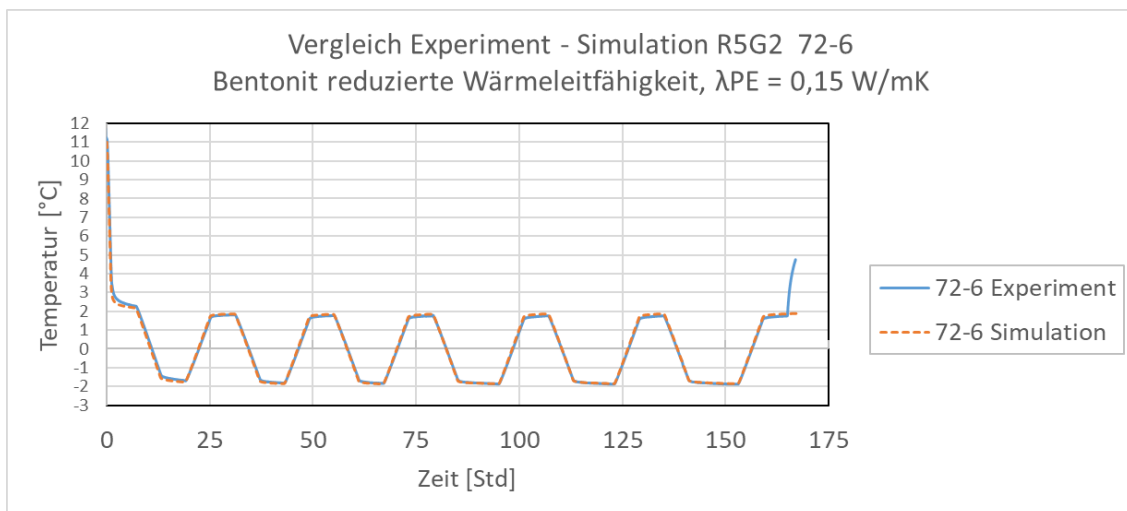


Abbildung 92: Vergleich der Temperaturen von Simulationsdaten mit den experimentell gewonnenen Daten des Versuchs R5G2 am Sensor 72-6 bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit der PE-Sondenrohre (0,15 W/mK)

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die thermischen Prozesse im Versuch nicht vollständig durch das Simulationsmodell abgebildet werden. Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass der Wärmeübergang zwischen Sondenrohr und Hinterfüllmaterial geringer ist als in den Simulationen angenommen. Die reduzierte Wärmeleitfähigkeit kann dabei stellvertretend für einen Spalt zwischen Sondenrohr und Hinterfüllung angesehen werden. Selbiges gilt für den Wärmeübergang zwischen Hinterfüllmaterial und Bentonitformation. Ein anderer Grund kann die fehlerhafte oder unvollständige Berechnung des turbulenten Wärmeübergangs von Wärmeträgermedium auf PE-Rohre sein. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die möglichst genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit der Materialien und der Wärmeübergangskoeffizienten eine hohe Bedeutung beigemessen werden muss.

## 9.7 AP 5b: 3D THM-Simulation der Modellversuche (IGS)

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Simulation der mittelskaligen Experimente aus AP 4 als thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Simulation. Hierbei wird der Versuchsaufbau in seinen wesentlichen Strukturen abgebildet sowie die maßgeblichen physikalischen Prozesse realitätsnah erfasst. Hierzu gehört, dass

- im porösen Medium Boden ggf. auftretende temperaturinduzierte Dichteströmungen,
- der Phasenwechsel im Aquifer und im Verfüllmaterial (vgl. AP 2) sowie
- die temperaturinduzierten mechanischen Beanspruchungen des Verfüllbaustoffes

berücksichtigt und mit einer physikalisch und mechanisch begründeten Modellbildung zutreffend abgebildet werden.

### 9.7.1 Numerische Rahmenbedingungen

Beim Erstellen eines numerischen Modells müssen in einem ersten Schritt alle Randbedingungen und alle erheblichen physikalischen Einflüsse, die das Ergebnis beeinflussen, richtig erfasst werden.

Dieses Arbeitspaket zielte darauf ab, die in AP 4 durchgeführten Experimente, welche aus Kühlrohren aufgebaut sind, die von Verfüllmaterial umschlossen sind, welches wiederum von Erdreich umgeben ist, zu simulieren. Die thermischen Parameter für die Materialien wurden in Laborversuchen bestimmt, aus Datenblättern von Herstellern übernommen oder stammen aus der Literatur.

Bezüglich der Randbedingungen gibt es zwei Temperaturbedingungen, die sowohl das Experiment als auch die Simulation beeinflussen. Die erste ist die Kühltemperatur der Flüssigkeit aus den Kühlrohren, welche während des Experiments über Sensoren gemessen wurde. Die zweite ist die kühlende Raumtemperatur, welche ebenso während des Experimentes aufgezeichnet wurde.

Folgende physikalische Prozesse, die für das numerische Modell notwendig sind, wurden identifiziert:

- 1- Strömung des Fluids durch die Kühlrohre,
- 2- Wärmeübertragung in Feststoffen (Rohrwand, Verfüllmaterial, PVC Rohr),
- 3- Wärmeübertragung im porösen Medium,
- 4- freie Konvektion im porösen Medium,
- 5- Phasenübergang,
- 6- thermische Ausdehnung und mechanische Deformation des Verfüllbaustoffes.

Jeder dieser physikalischen Prozesse ist mit Comsol Multiphysics auf Grundlage von folgenden Gleichungen modelliert worden:

#### **Rohrströmungsmodell**

Die Fluidströmung in den Rohren ist mit den Impuls- und Kontinuitätsgleichungen (9-1, 9-2) modelliert worden.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla P - f_D \frac{\rho}{2d_h} u|u| + F \quad (9-1)$$

und

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0 \quad (9-2)$$

wobei  $u$ : durchschnittliche Geschwindigkeit über den Querschnitt [ $m/s$ ],  $\rho$ : Dichte [ $kg/m^3$ ],  $P$ : Druck [ $Pa$ ],  $f_D$ : Darcy Reibungsfaktor [dimensionslos],  $F$ : volumenbezogene Kraft [ $N/m^3$ ] und  $d_h$ : mittlerer hydraulischer Durchmesser [ $m$ ] aus Gleichung(9-3) ist.

$$d_h = \frac{4A}{Z} \quad (9-3)$$

wobei  $A$ : Rohrquerschnitt [ $m^2$ ] und  $Z$ : benetzter Umfang [ $m$ ] ist.

Die Impulsbilanzgleichung kann wie folgt umgeformt werden:

$$e_t \cdot \left[ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u \right] = \left[ -\nabla P - f_D \frac{\rho}{2d_h} u|u| + F \right] \quad (9-4)$$

Hier kann  $e_t$ : Der tangentielle Einheitsvektor des Rohrzuflusses, mit folgender Gleichung ausgedrückt werden:

$$e_t = (e_{t,x}, e_{t,y}, e_{t,z}) \quad (9-5)$$

Annahmen für Gleichung (9-5):

- 1- Das Geschwindigkeitsprofil ist über den kompletten Querschnitt ausgebildet.
- 2- Die Querschnittsfläche ist zwischen und innerhalb von Rohrsegmenten veränderlich.
- 3- Empirische Funktionen (Reibungsdiagramme) beschreiben den Druckabfall für turbulente und laminare Strömungen unter Einfluss der Viskosität.
- 4- Die Biegung der Rohrsegmente hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Druckverluste im Vergleich zu der Wandreibung.
- 5- Erschütterungen werden vernachlässigt.
- 6- Alle Geschwindigkeitsanteile senkrecht zu der Rohrachse werden als 0 angenommen.

Der Darcy Reibungsfaktor  $f_D$ , welcher von der Reynoldszahl  $Re$  und der Rauheit geteilt durch den hydraulischen Durchmesser  $e/d_h$  abhängig ist, ist verantwortlich für den kontinuierlichen Druckabfall entlang des Rohrsegmentes aufgrund von viskosen Scherkräften.

$$f_D = f_D \left( Re, \frac{e}{d_h} \right) \quad (9-6)$$

mit

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (9-7)$$

Die Churchill Gleichung für einphasige Fluide wird zur Berechnung des Darcy Reibungsfaktors verwendet.



$$f_D = 8 \times \left[ \left( \frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12} \quad (9-8)$$

mit

$$A = \left[ -2.457 \times \ln \left( \left( \frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \times (e/d) \right) \right]^{16} \quad (9-9)$$

$$B = \left( \frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (9-10)$$

### Wärmeübertragung in Feststoffen

In Comsol Multiphysics wird für jeden Knoten die Wärmeübertragung nach der Wärme Gleichung (9-11) berechnet.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (9-11)$$

wobei  $\rho$ : Feststoffdichte,  $C_p$ : Kapazität bei konstantem Druck und  $u$ : Geschwindigkeitsfeld ist.

Die thermische Leitfähigkeit  $k$  in Gleichung (9-12) beschreibt die Beziehung zwischen dem Wärmeflussvektor  $q$  und dem Temperaturgradienten, welcher sich aus dem Fourier's Gesetz der Wärmeleitung ergibt.

$$q = -k \nabla T \quad (9-12)$$

Wobei  $q$ : Wärmefluss,  $k$ : thermische Leitfähigkeit und  $\nabla T$  der Temperaturgradient ist.

### Wärmeübertragung im porösen Medium

Die Wärmeübertragung im porösen Medium wird mit einer modifizierten Version der Wärme Gleichung (9-13) gelöst. Die modifizierten Parameter erfassen den Einfluss der Fluideigenschaften in einer Porositätsmatrix, wie in Gleichung (9-14) zu erkennen ist.

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (9-13)$$

$$q = -k_{eff} \nabla T \quad (9-14)$$

wobei:  $(\rho C_p)_{eff}$ : effektive volumetrische Wärmekapazität unter konstanten Druck und  $k_{eff}$ : effektive thermische Leitfähigkeit ist.

Diese Terme werden durch Gleichung (9-15) und (9-16) beschrieben.

$$(\rho C_p)_{eff} = \theta_p \rho_p C_p + (1 - \theta_p) \rho C_p \quad (9-15)$$

$$k_{eff} = \theta_p k_p + (1 - \theta_p) k \quad (9-16)$$

wobei  $\theta_p$  der Volumenanteil des Feststoffes der Porositätsmatrix ist.

### Freie konvektive Strömung im porösen Medium

Der freie konvektive Fluss im porösen Medium wird unter Berücksichtigung der Brinkman Gleichung simuliert. Diese Gleichung beschreibt Fluide im porösen Medium, bei denen der Impuls-transport im Fluid über die Scherspannungen geschieht. Dieses mathematische Modell erweitert das Gesetz von Darcy in der Form, dass der viskose Transport in die Impulsbilanz aufgenommen wird, dabei werden sowohl der Druck als auch der Strömungsgeschwindigkeitsvektor als unabhängige Variablen betrachtet.

Die abhängigen Variablen in der Brinkman Gleichung sind die Darcy Geschwindigkeit und der Druck. Die Strömung in dem porösen Medium zeichnet sich durch die Kombination der Kontinuitätsgleichung und der Impulsgleichung, welche zusammen die Brinkman Gleichung formen, aus:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_{br} \quad (9-17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\varepsilon_p} \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon_p} \right) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \frac{1}{\varepsilon_p} \left\{ \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} \right] - \left( \kappa^{-1} \mu + \frac{Q_{br}}{\varepsilon_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (9-18)$$

Wobei  $\mu$ : dynamische Viskosität des Fluids [kg/ms],  $\mathbf{u}$ : Geschwindigkeitsvektor [m/s],  $\rho$ : Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>],  $p$ : Druck [Pa],  $\varepsilon_p$ : Porosität und  $\kappa$ : Durchlässigkeitstensor des porösen Mediums [m<sup>2</sup>] ist.

### Thermische Ausdehnung und mechanische Deformation

Die thermische Ausdehnung in diesem numerischen Modell verfolgt den Zweck, die thermischen Dehnungen, die durch Temperaturänderungen entstehen, zu erfassen. Die thermische Dehnung wird mit Gleichung (9-19) gelöst:

$$\varepsilon_{th} = \alpha(\Delta T) \quad (9-19)$$

wobei  $\varepsilon_{th}$ : thermische Dehnung und  $\alpha$ : thermischer Ausdehnungskoeffizient ist.

Die Verschiebung in [mm] wird dann unter Berücksichtigung der thermischen Dehnung berechnet. Die hydraulische Leitfähigkeit des Materials wird über die kubische Gesetzgleichung bestimmt.

$$k = \frac{\rho g}{12\mu} d^2 \quad (9-20)$$

wobei:  $k$ : hydraulische Leitfähigkeit,  $\rho$ : Dichte,  $\mu$ : dynamische Viskosität und  $d$ : Durchmesser der Körnung ist.

#### 9.7.2 Numerische Modellierung

In diesem Arbeitspaket wurden drei verschiedene geometrische Konfigurationen modelliert. Die erste Geometrie (G1) besteht aus 4 Kühlrohren (Zwei Zu- und zwei Abflussrohre) mit identischem Abstand zum Mittelpunkt des Verfüllmaterials (Abbildung 93 links).

Bei der zweiten Geometrie sind die Rohre in eine Richtung verschoben (Abbildung 93 Mitte). Die Kühlrohre sind in diesem Fall näher an einer Seite, was einen möglichen ungünstigen Fall darstellen soll, da das Risiko von Frostbildung im Erdreich erhöht wird.

Bei der dritten Geometrie sind die Zu- und Abflussrohre so nah wie möglich am Rand und an den gegenüberliegenden Seiten angeordnet (Abbildung 93 rechts). Dies soll einen weiteren ungünstigen Fall darstellen.

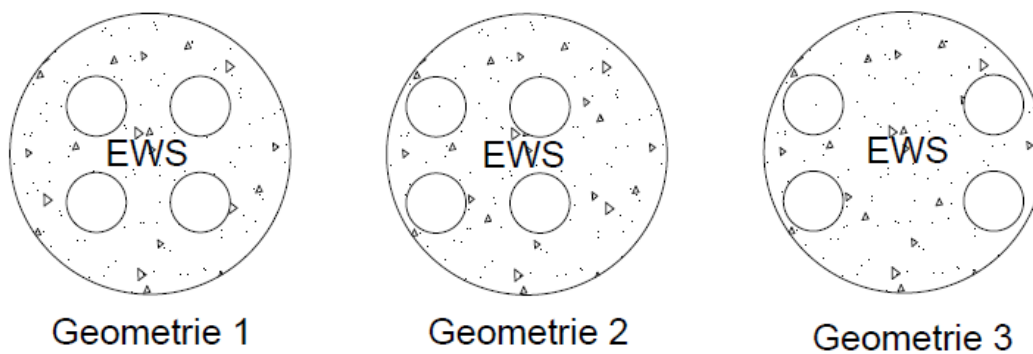


Abbildung 93: Sonden-Geometrie

Die verwendeten Materialparameter werden in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Materialparameter

G1	Verfüllmaterial	Thermische Leitfähigkeit	2 [W/mK]
		Dichte	1920 [kg/m <sup>3</sup> ]
	Sand	Thermische Leitfähigkeit	2,4 [W/mK]
		Dichte	2100 [kg/m <sup>3</sup> ]
Dämmung	Thermische Leitfähigkeit	0,04 [W/mK]	
G2	Verfüllmaterial	Thermische Leitfähigkeit	2 [W/mK]
		Dichte	1920 [kg/m <sup>3</sup> ]
	Bentonit	Thermische Leitfähigkeit	1,25 [W/mK]
		Dichte	1400 [kg/m <sup>3</sup> ]
G3	Verfüllmaterial	Thermische Leitfähigkeit	2 [W/mK]
		Dichte	1920 [kg/m <sup>3</sup> ]
	Bentonit	Thermische Leitfähigkeit	1,25 [W/mK]
		Dichte	1400 [kg/m <sup>3</sup> ]
Permeameter (G1)	Verfüllmaterial	Thermische Leitfähigkeit	2 [W/mK]
		Dichte	1920 [kg/m <sup>3</sup> ]
	Flüssigboden	Thermische Leitfähigkeit	2,6 [W/mK]
		Dichte	1934 [kg/m <sup>3</sup> ]

Die thermische Leitfähigkeit des HDPE Kühlrohres wird als 0,49 (W/m K) angenommen und die Strömung des kühlenden Fluids wurde über das Experiment gemessen und beträgt 18 l/min.

### 9.7.3 Geometrie 1

#### Zweidimensionales gekoppeltes Modell

Das IGS hat zuerst ein zweidimensionales numerisches Modell über Comsol Multiphysics entwickelt, um das erste mittelskalige Experiment (R1G1) zu simulieren. Durchgeführt wurde die Simulation von VEGAS, um alle physikalischen Hintergründe zu überprüfen und um zu ermitteln, ob das zweidimensionale Modell ausreichend ist um die Prozesse zu erfassen.

Das Modell besteht aus 4 Kreisen (Radius = 16 mm), die die Kühlrohre darstellen, die wiederum von einem weiteren Kreis (Radius = 75 mm) umgeben sind, der das Verfüllmaterial repräsentiert. Obwohl das Erdreich zweidimensional modelliert werden kann, ist es nicht möglich, die konvektive Strömung im Erdreich in horizontaler Richtung zu modellieren. Dafür wurde ein weiteres Untermodell in vertikaler Richtung entwickelt (Abbildung 94). Die Sandschicht besitzt eine Länge von 1,4 m und eine Weite von 162,7 mm, gefolgt von einer PVC Schicht und einer Lage Dämmung an der Außenseite.

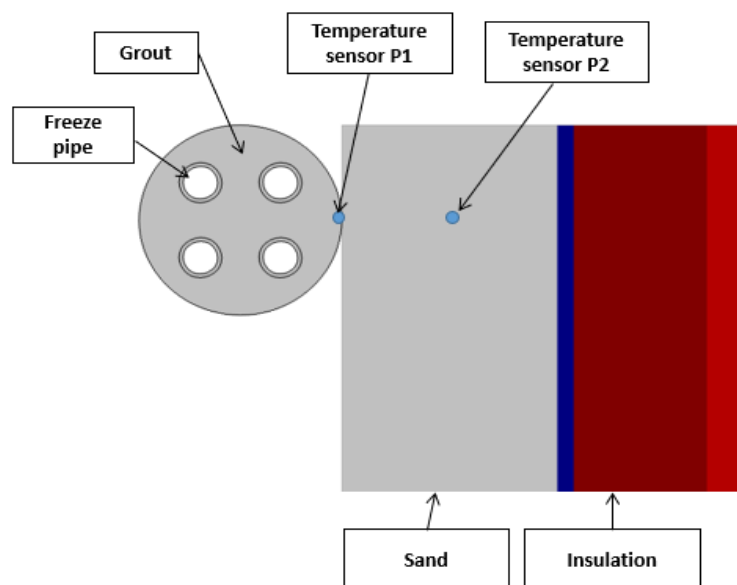


Abbildung 94: Zweidimensionales gekoppeltes Modell

Die materiellen Eigenschaften der Rohre sind von den Herstellerangaben übernommen und haben eine thermische Leitfähigkeit von  $0,49 \text{ (W/m K)}$  und eine Dichte von  $930 \text{ kg/m}^3$ . Die Eigenschaften des Verfüllmaterials stammen aus AP 1 und der im Experiment verwendete Quarzsand besitzt eine thermische Leitfähigkeit von  $2,4 \text{ (W/m K)}$  und eine Dichte von  $2100 \text{ kg/m}^3$ .

Die Dämmschicht, die im Experiment verwendet wurde, besteht aus Glaswolle und Armaflex mit einer thermischen Leitfähigkeit von  $0,04 \text{ (W/m K)}$  (nach Angaben der Hersteller).

Für das horizontale Untermodell wurde die Fluidtemperatur in den Kühlrohren als Randbedingung angesetzt. In diesem Modell wurde keine Fluidströmung simuliert, da Rohrströmungen im Zweidimensionalen nicht modelliert werden können. Beim vertikalen Untermodell wurde die von den Sensoren in AP 4 gemessene Raumtemperatur als Randbedingung angenommen. Anschließend wurden beide Untermodelle gekoppelt, dabei wird die Temperatur am äußeren

Rand des Verfüllmaterials als Randbedingung für den Sand im vertikalen Modell verwendet und die resultierende Temperatur aus dem vertikalen Untermodell wird als Randbedingung für den äußeren Rand des horizontalen Modells verwendet.

Im AP 4 wurden Sensoren in den verschiedenen Materialien platziert. Die durch das Modell erhaltenen Ergebnisse wurden mit den Daten, die man aus AP 4 erhalten hat (Abbildung 98 bis Abbildung 106), verglichen. Kleine Abweichungen sind zwischen numerischem Modell und experimentellem Versuch zu erkennen. Diese Abweichungen können auf die Zweidimensionalität zurückzuführen sein, da in diesem Fall keine Fluidströmung implementiert werden kann, was bedeutet, dass die Temperatur über die Tiefe im Verfüllmaterial nicht simuliert werden kann. Daraus folgt, dass ein dreidimensionales Modell entwickelt werden musste, um genauere Resultate zu erhalten.

### Dreidimensionales Modell

Da das zweidimensionale Modell Beschränkungen aufwies, wurde am IGS ein dreidimensionales Thermo-Hydro-Modell entwickelt. Dieses Modell besitzt die Fähigkeit genauere Ergebnisse zu erzeugen. Dabei spielt die Temperaturänderung über die Tiefe und die freie konvektive dreidimensionale Strömung im Sand eine wichtige Rolle.

Die Randbedingungen des Modells sind vergleichbar mit denen aus dem zweidimensionalen Modell. Die Geometrie besteht wieder aus 4 Kühlrohren, dem Verfüllmaterial, einer Sandumgebung und zwei Dämmschichten (Abbildung 96).

Das Modell nutzt die Zu- und Abflusstemperaturen der Rohrströmungen aus AP 4 als Randbedingungen, die auf die Kühlrohre und das Verfüllmaterial wirken. Die aus dem Experiment gemessene Raumtemperatur wirkt als Randbedingung auf die äußere Dämmschicht.

Eine Netzverfeinerungsstudie wurde durchgeführt und ist zu dem Schluss gekommen, dass ein Minimum von 392.958 Elementen benötigt wird. Abbildung 95 zeigt die Netzelemente sowie die Richtung der konvektiven Strömung.

Die Ergebnisse des Modells wurden mit den Daten der Sensoren verglichen, die in AP4 eingebaut wurden. Die Verteilung der Sensoren ist in Abbildung 97 zu sehen.

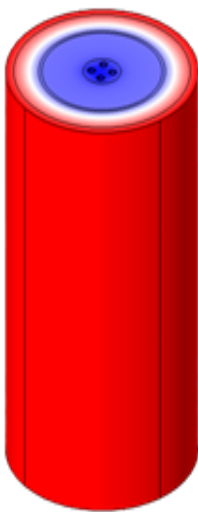


Abbildung 96: 3D Modell

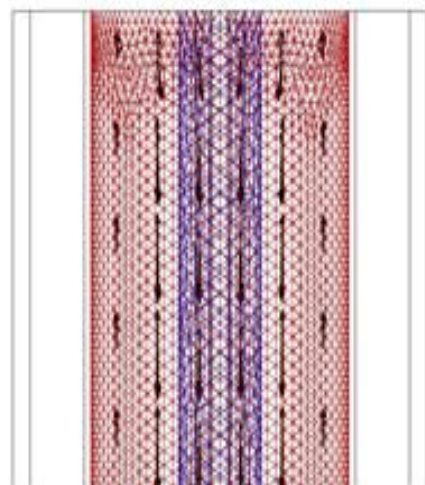


Abbildung 95: Modellgitter und freie konvektive Strömung

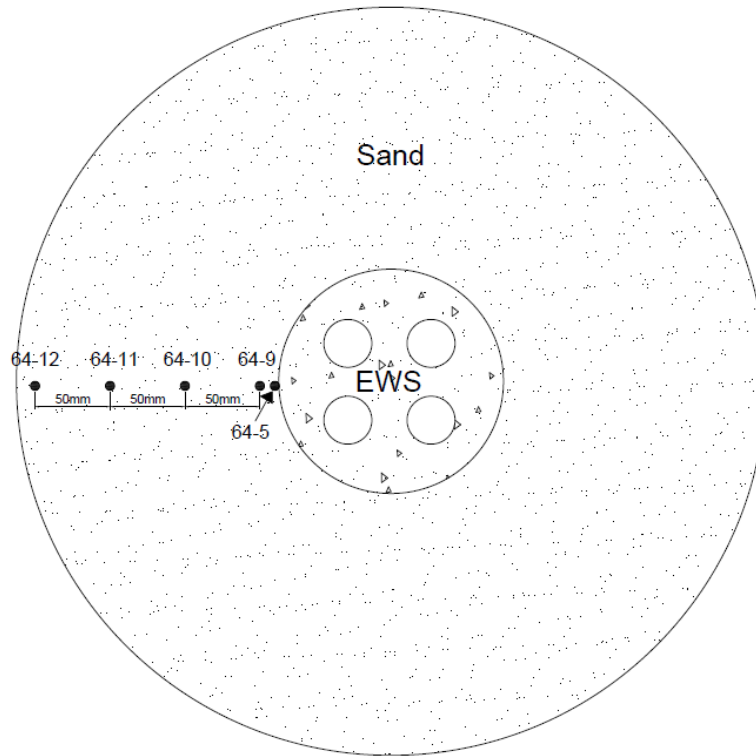


Abbildung 97: Sensorverteilung in R1G1

Abbildung 98 zeigt sowohl für das zweidimensional gekoppelte Modell wie für das dreidimensionale Modell die Ergebnisse und vergleicht sie mit den Daten aus Sensor 64-5 in der Verbindungsschicht zwischen Verfüllmaterial und Erdreich. Abbildung 99 und Abbildung 100 zeigen einen 15h und einen 24h Ausschnitt der Bereiche mit den höchsten Temperaturen aus Abbildung 98. Dabei ist die Überlegenheit des dreidimensionalen Modells über das zweidimensionale Modell eindeutig zu erkennen.

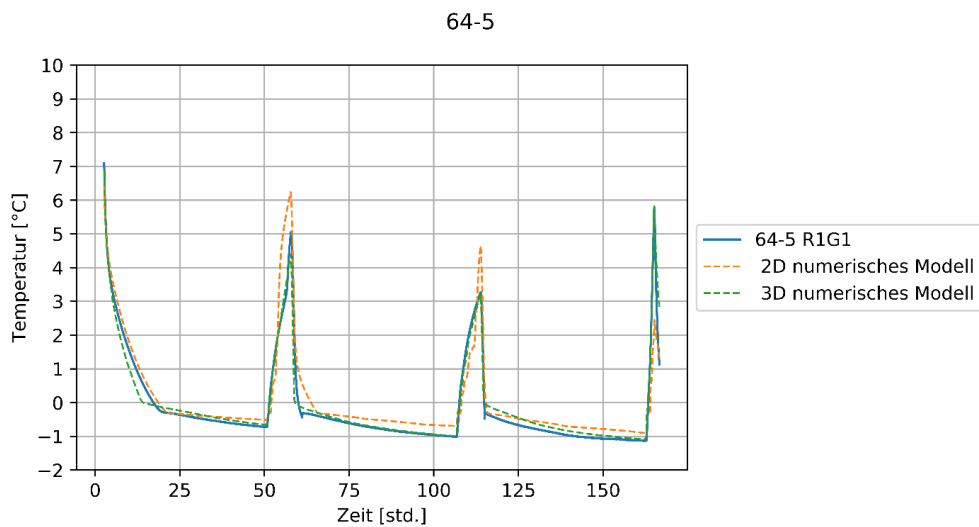


Abbildung 98: R1G1 - Sensor 64-5

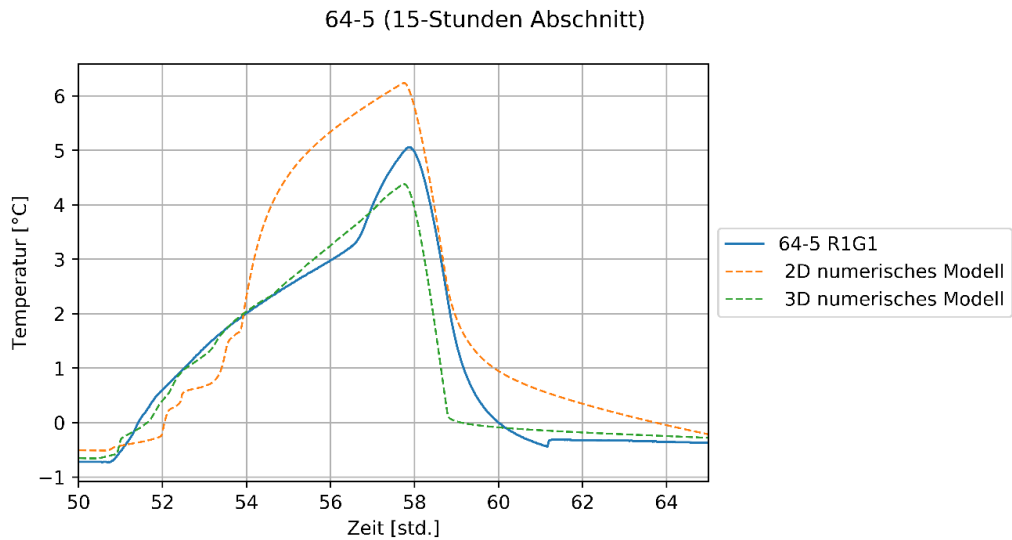


Abbildung 99: R1G1 15-Stunden Abschnitt

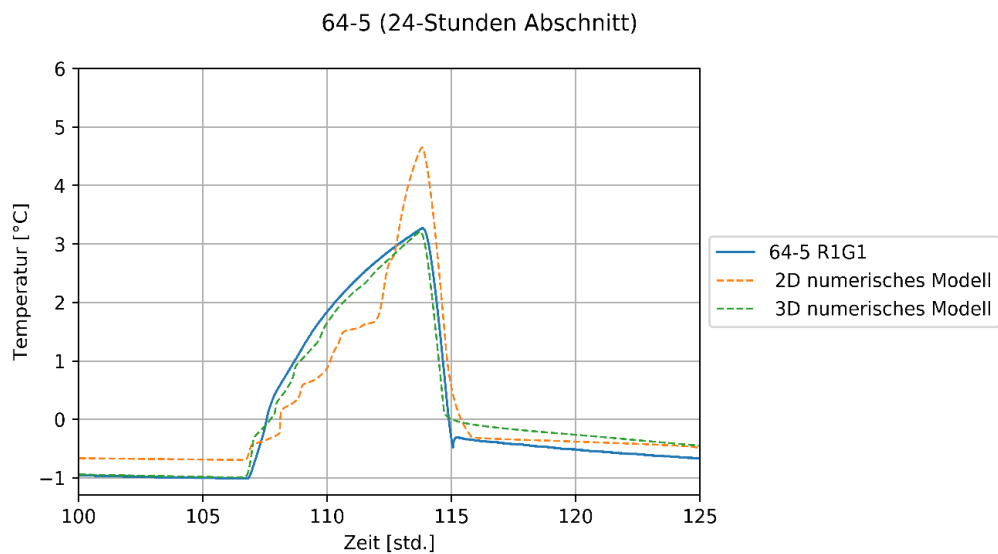


Abbildung 100: R1G1 - 24 Stunden Abschnitt

Abbildung 101 zeigt die Ergebnisse, die in größerer Entfernung zu dem Verfüllmaterial erzielt wurden (Sensoren 64-9 bis 64-12). Hier ist erkennbar, dass sowohl im zwei- als auch im drei-dimensionalen Modell bei der Berechnung der Temperaturänderung am äußersten Rand des Modells (Sensoren 64-11 und 64-12) Abweichungen zwischen Experiment und numerischer Simulation erkennbar sind. Gründe dafür sind die Körngrößenverteilung und der Verdichtungsgrad des Sandes, welche die Richtung der freien konvektiven Strömung beeinflussen können.

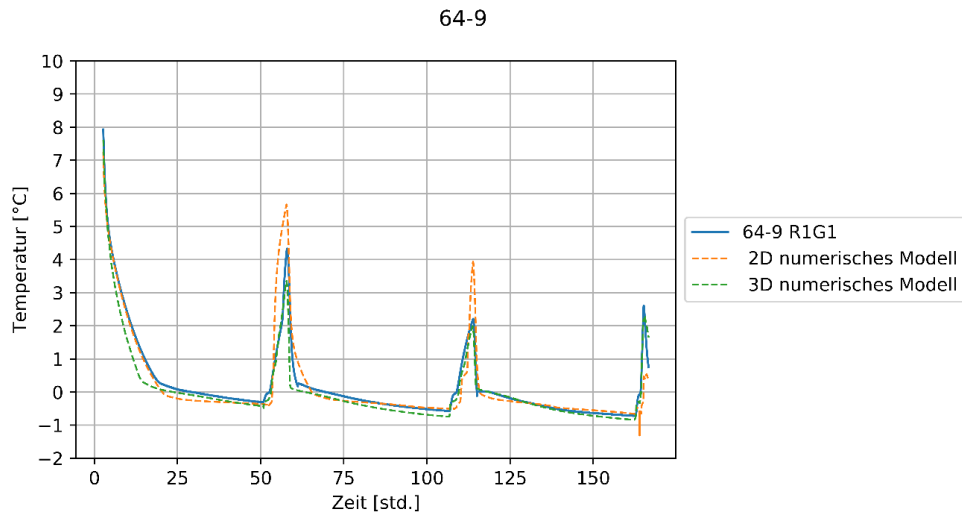


Abbildung 101: R1G1 Sensor 64-9

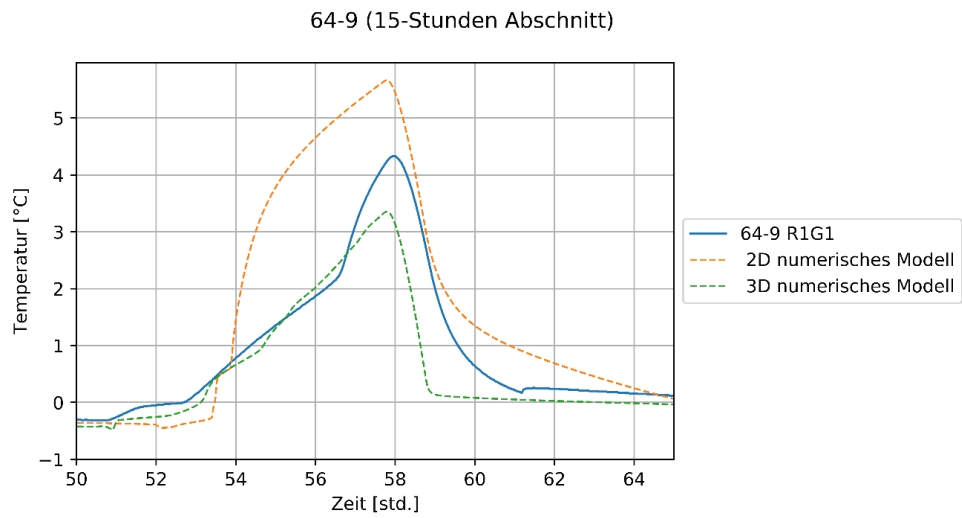


Abbildung 102: Sensor 64-9 (15-Stunden Abschnitt)

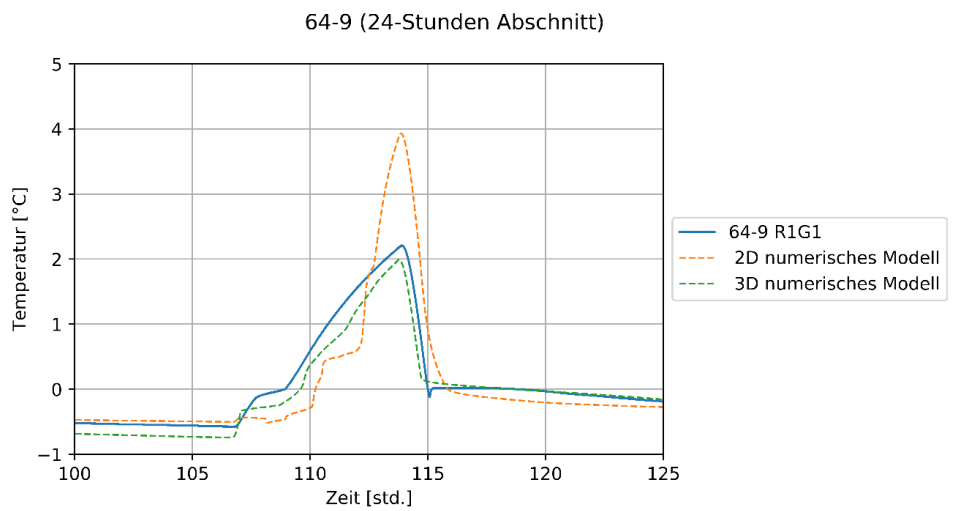


Abbildung 103: Sensor 64-9 (24-Stunden Abschnitt)



64-10

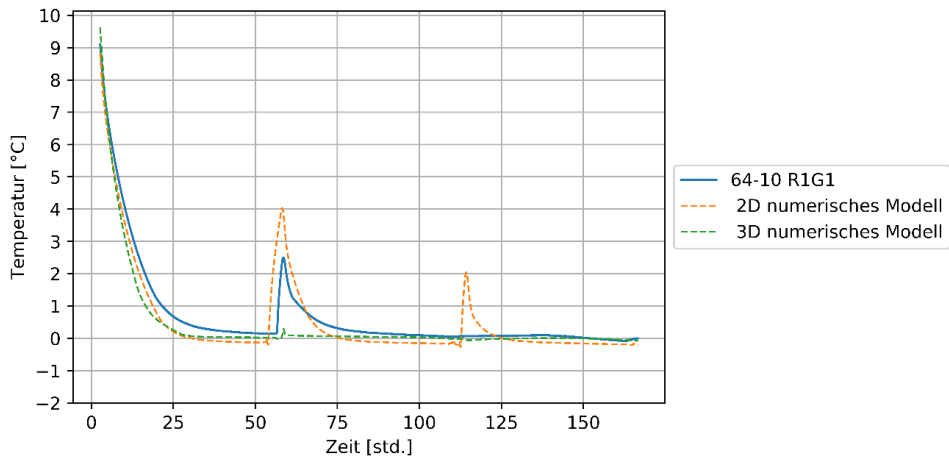


Abbildung 104: R1G1 Sensor 64-10

64-11

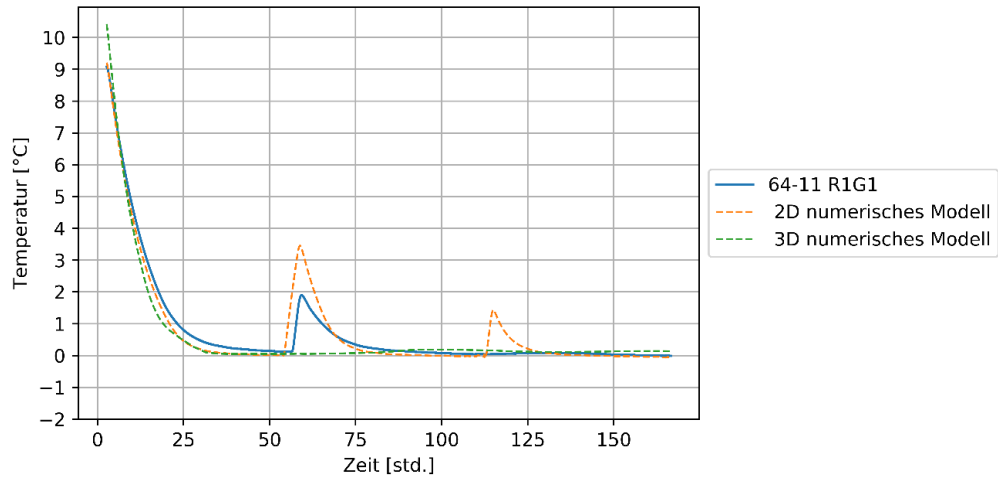


Abbildung 105: R1G1 Sensor 64-11

64-12

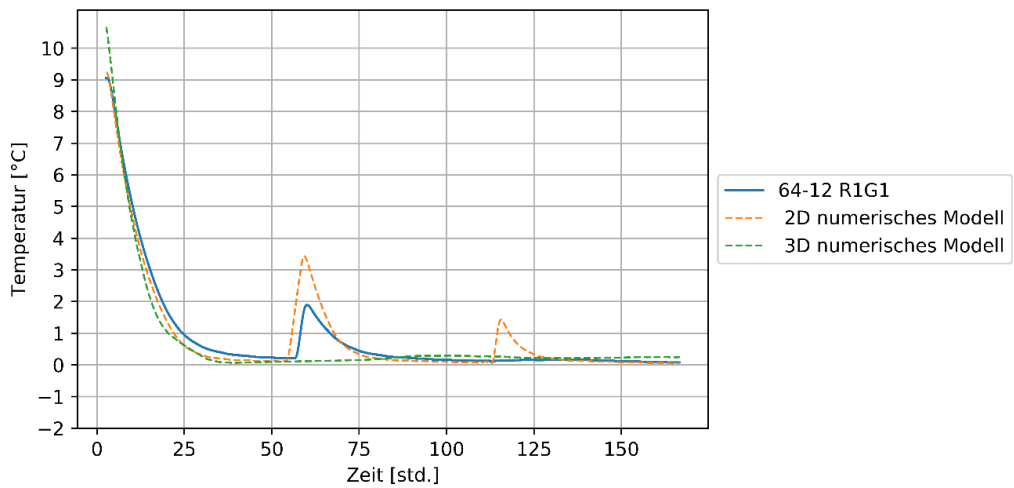


Abbildung 106: R1G1 Sensor 64-12

Am IGS wurden zwei Modelle entwickelt, um das Experiment R1G1 zu simulieren. Mit dem ersten Modell war es nicht möglich die Temperaturänderungen, die aufgrund von vielen unbekannten Größen, wie die Verdichtungsrate und die freie konvektive Strömung, hervorgerufen wurden, abzubilden. Deshalb sollten die unbekannten Größen minimiert werden.

Um die freie konvektive Strömung zu unterbinden, gibt es bei der Implementierung verschiedene Möglichkeiten. Zum einen können undurchlässige Schichten in verschiedenen Tiefen über das Erdreich verteilt werden, zum anderen kann der Sand mit einem undurchlässigen Material ausgetauscht werden. Im nächsten Experiment ersetzte VEGAS den Sand durch Bentonit.

#### 9.7.4 Geometrie 2

In diesem Modell wurde Bentonit als Erdreich darstellendes Material, welches das Verfüllmaterial umschließt, verwendet. Die freie konvektive Strömung wurde nicht simuliert, da Bentonit eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit aufweist. Das Material wurde als Feststoff modelliert.

Die thermischen Parameter des Bentonit wurden im Labor gemessen und mit der Literatur [37] verglichen und entsprechend Tabelle 27 festgelegt.

Tabelle 27: Bentonit Parameter

Dichte	1400 [kg/m <sup>3</sup> ]
Thermische Leitfähigkeit	1.25 [W/mK]
Wärmespeicherefähigkeit	1200 [J/kgK]

Abbildung 107 zeigt die Geometrie und die Anordnung der Sensoren im Experiment (R5G2), welches eine abgeänderte Konfiguration von Kühlrohren beinhaltet (wie in 9.7.1 ausgeführt). Die Rohre sind näher am Rand des Verfüllmaterials als sie in Geometrie 1 waren. Dieses Experiment beinhaltet zudem keinerlei Dämmung an der Außenseite und die Temperaturrandbedingungen, die verwendet wurden, sind die Ergebnisse der Sensoren, die sich am äußeren Rand des PVC Rohres, welches das Bentonit beinhaltet, befinden.

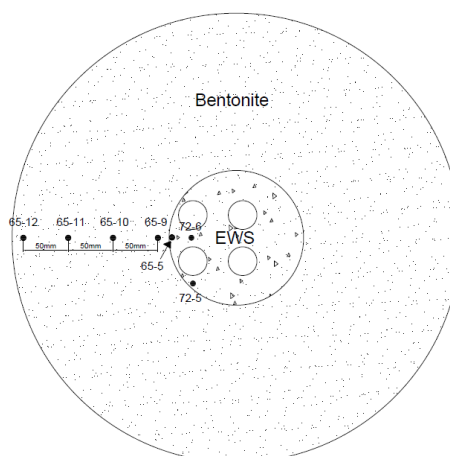


Abbildung 107: Sensorverteilung in R5G2

Abbildung 108 und Abbildung 109 zeigen die Resultate des Modells im Vergleich zu den Temperaturdaten, die während des Experimentes im Verfüllmaterial aufgezeichnet wurden.

R5G2 72-5

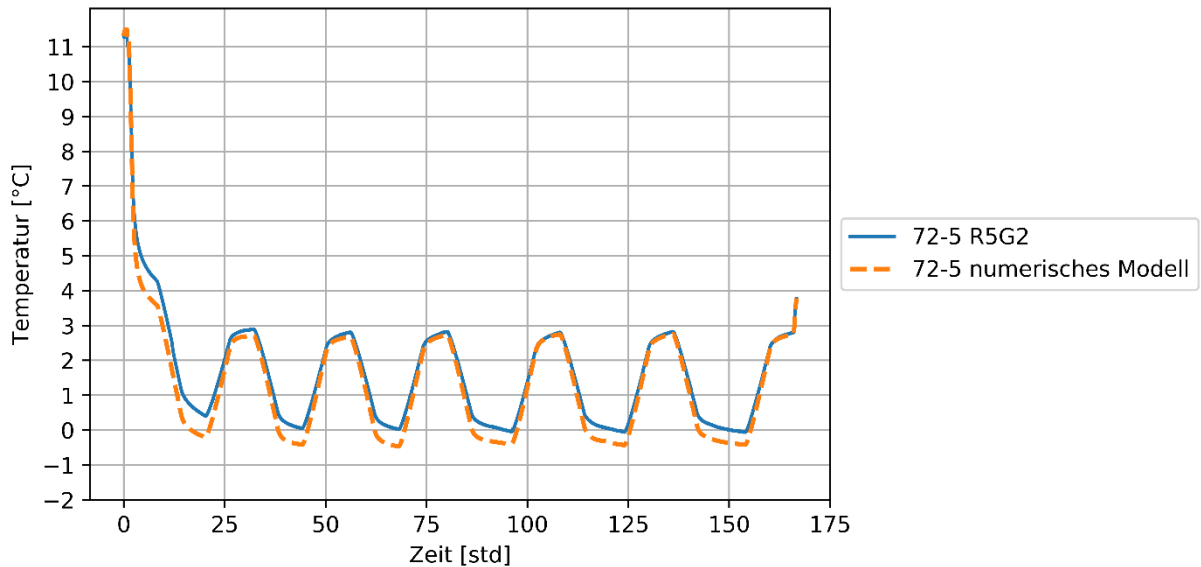


Abbildung 108: R5G2 Sensor 72-5

R5G2 72-6

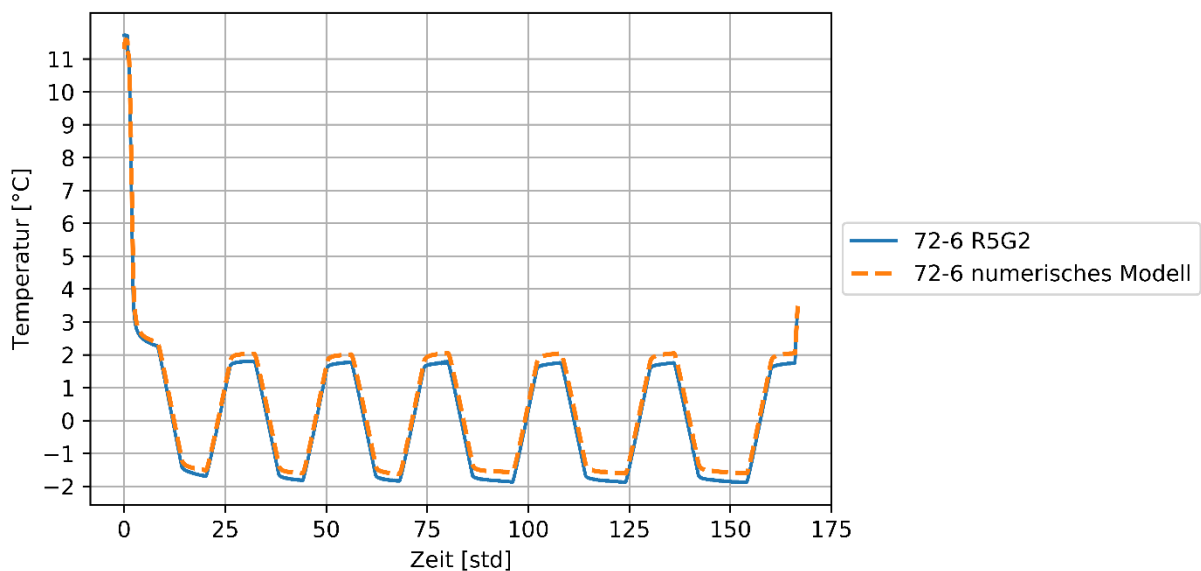


Abbildung 109: R5G2 Sensor 72-6

Die Abbildung 110, Abbildung 111 und Abbildung 112 vergleichen die Ergebnisse des Modells mit den Sensormessungen im Bentonit. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Im Bentonit wurde zwar kein Gefrieren festgestellt, es muss aber in Betracht gezogen werden, dass die Sensoren an der PVC Wand, welche als Randbedingungen verwendet wurden, möglicherweise aufgrund von fehlender Dämmung durch die Temperatur der Kühlrohre beeinflusst wurden.

R5G2 65-9

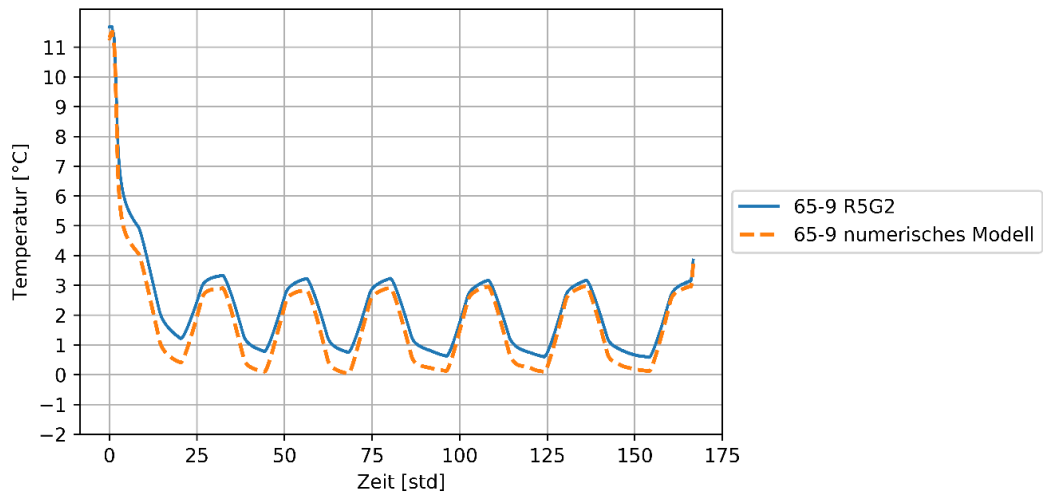


Abbildung 110: R5G2 Sensor 65-9

R5G2 65-10

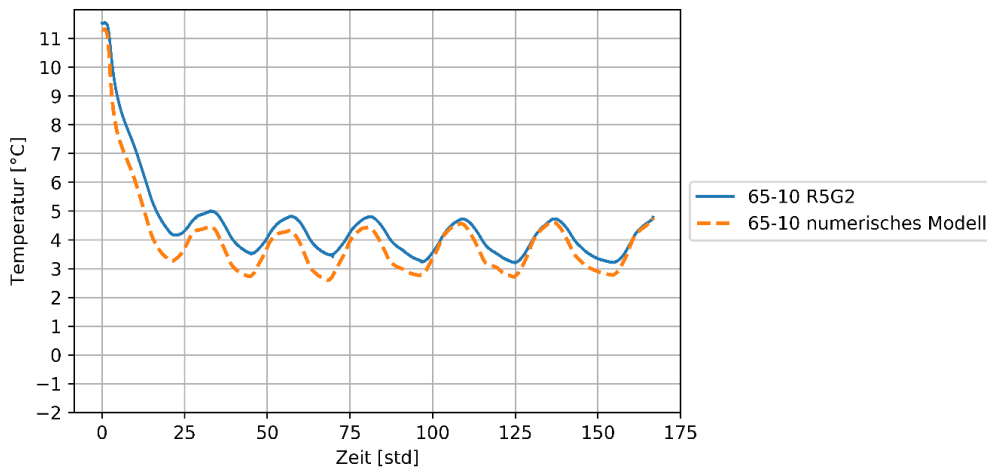


Abbildung 111: R5G2 Sensor 65-11

R5G2 65-11

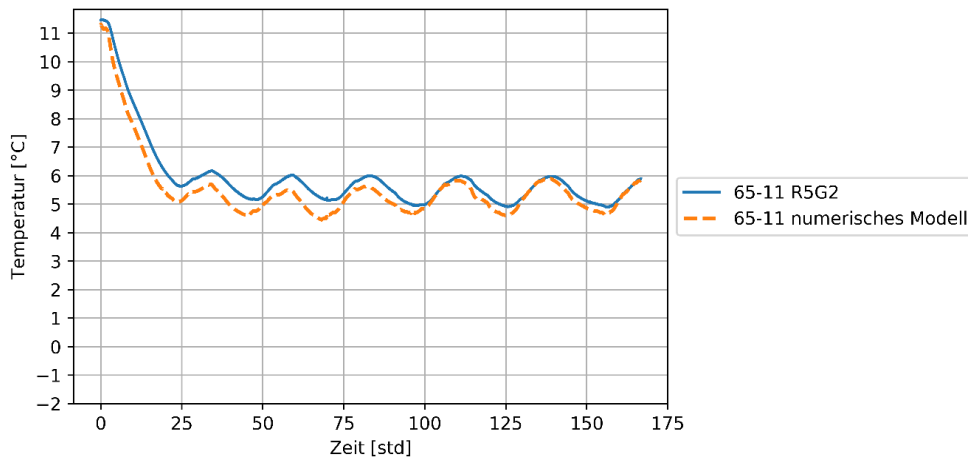


Abbildung 112: R5G2 Sensor 65-11

Da sowohl im Experiment als auch im Modell kein Gefrieren im Bentonit nachgewiesen wurde und die Möglichkeit besteht, dass die Sensoren, die als Randbedingung benutzt wurden, durch die Kühlung beeinflusst wurden, wurde ein weiteres Modell vom IGS entwickelt, welches diesen Aspekt untersucht.

Das Modell ist ähnlich zu dem vorhergehenden Modell in Abbildung 107 – allerdings mit einer um ein vielfaches größeren Bentonitschicht (10 m Durchmesser), die eine „unendliche“ Umgebung repräsentieren soll. Die Temperaturrandbedingung wird zu 11°C angenommen, was sich mit den Messungen der Raumtemperatur im Experiment deckt. Die Ergebnisse aus dem Modell wurden wieder mit den Sensormessungen aus dem Experiment verglichen (siehe Abbildung 113).

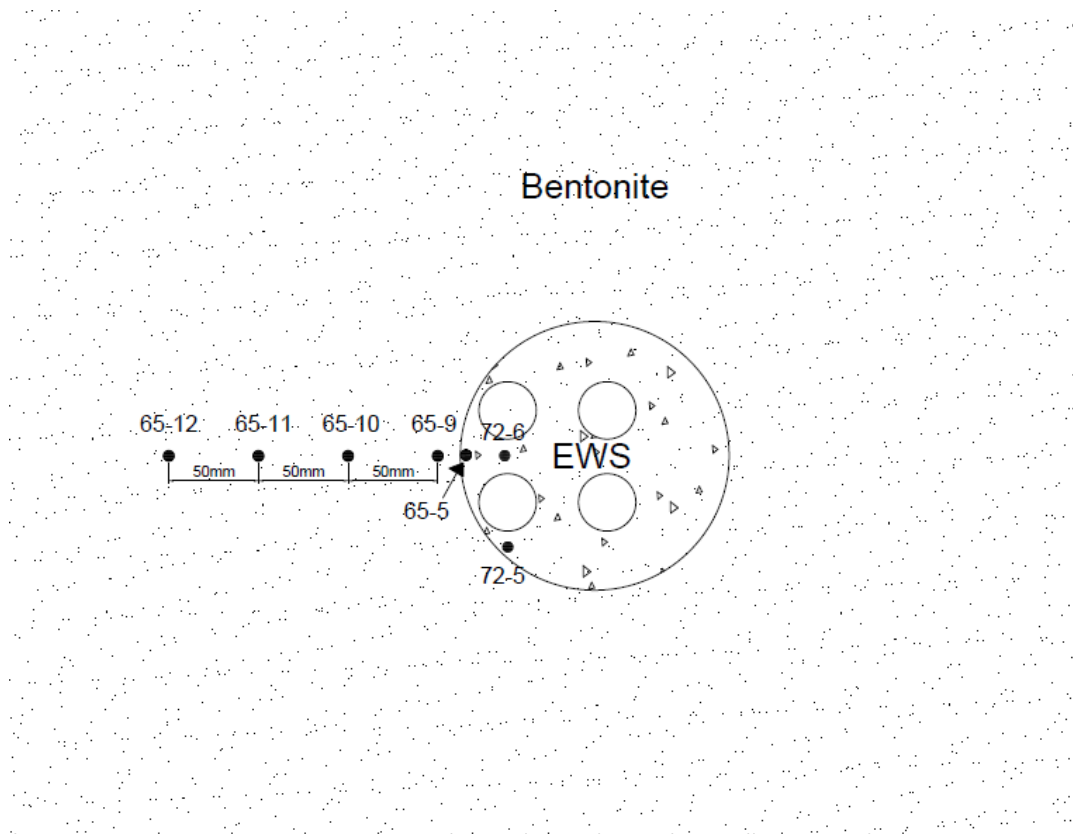


Abbildung 113: R5G2 „unendliches“ Modell

Abbildung 114 bis Abbildung 119 vergleichen die Ergebnisse des „unendlichen“ Modells mit den Daten, die während des Experimentes erfasst wurden.

R5G2 72-5 (infinite)

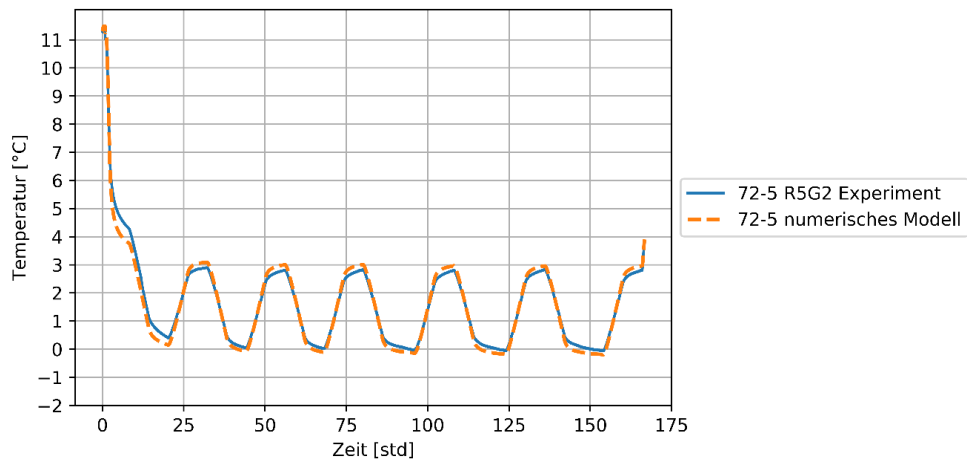


Abbildung 114: R5G2 „unendlich“ Sensor 72-5

R5G2 72-6 (infinite)

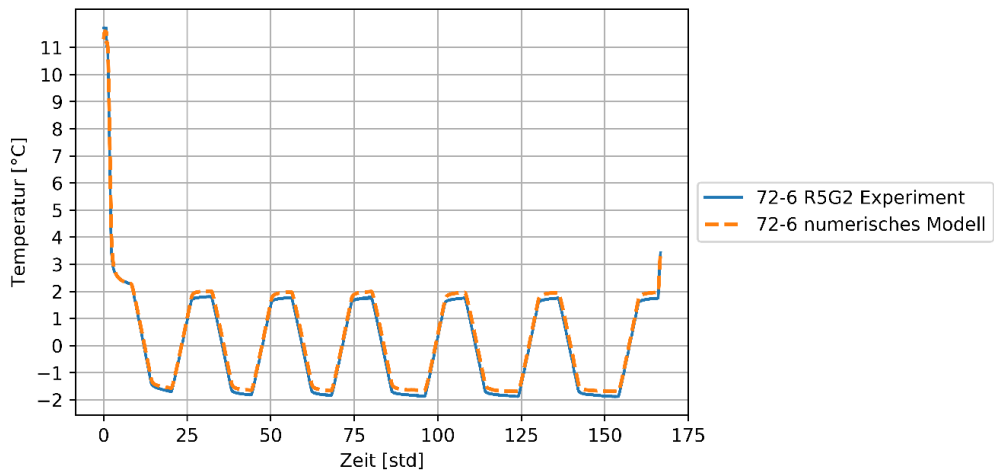


Abbildung 115: R5G2 „unendlich“ 72-6

R5G2 65-5 (infinite)

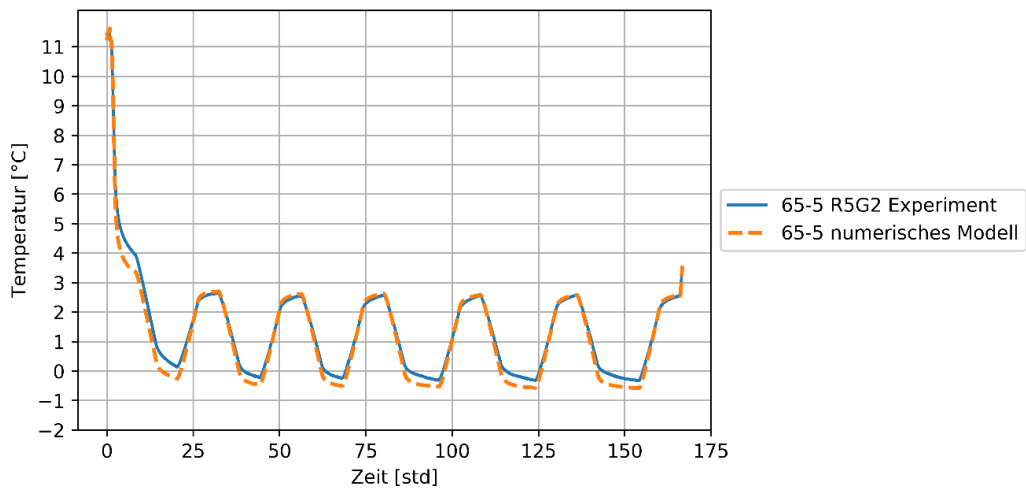


Abbildung 116: R5G2 „unendlich“ 65-5

R5G2 65-9 (infinite)

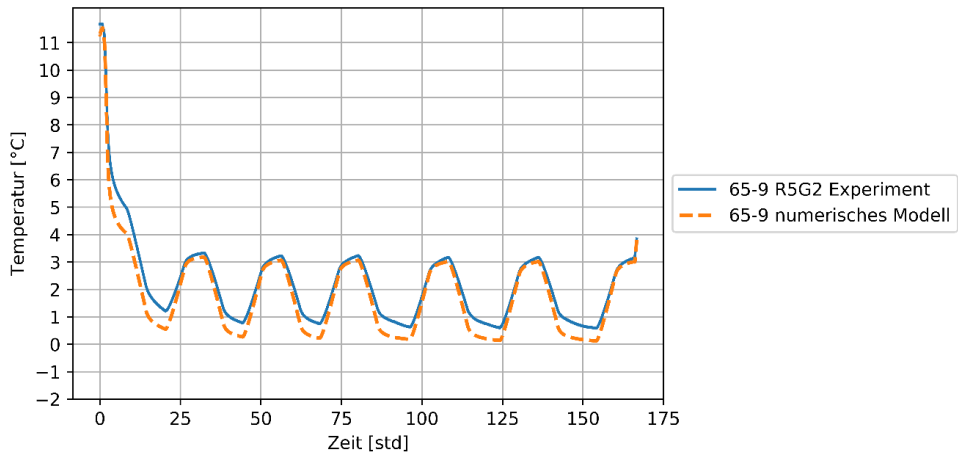


Abbildung 117: R5G2 „unendlich“ 65-9

R5G2 65-10 (infinite)

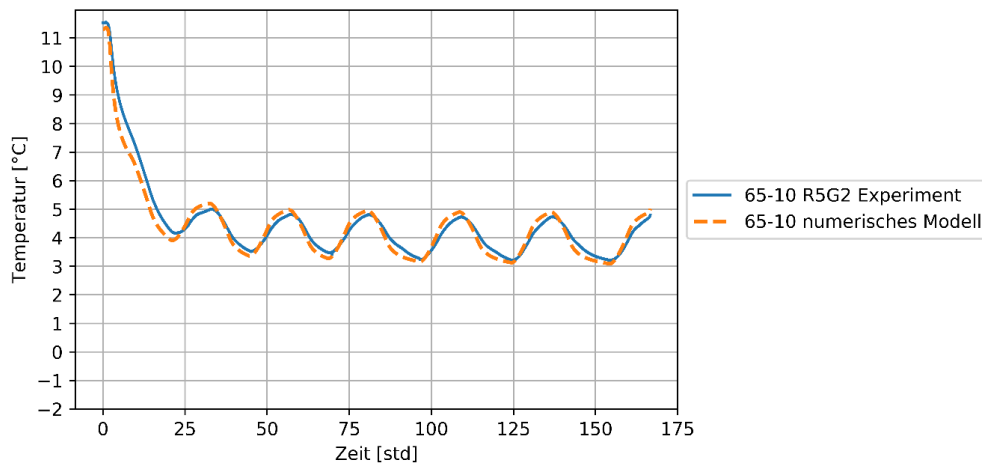


Abbildung 118: R5G2 „unendlich“ 65-10

R5G2 65-11 (infinite)

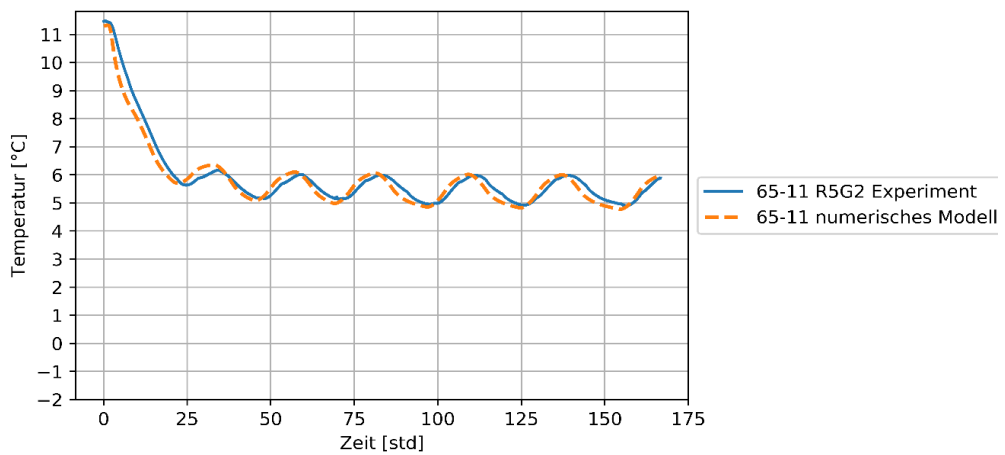


Abbildung 119: R5G2 „unendlich“ 65-11

Zusammenfassend ist festzustellen, dass kein Gefrieren in der Bentonitschicht erfasst wurde und dass die Daten aus dem neuen Modell besser zu den aus dem Experiment erzielten Ergebnisse passen als die aus dem vorhergehenden Modell. Daraus lässt sich ableiten, dass der äußere Sensor möglicherweise durch weitere Faktoren beeinflusst wurde (Kalibrierungsfehler, Sensorfehlfunktion, o.ä.).

### 9.7.5 Geometrie 3

Das IGS verwendete das Modell, welches zur Simulation von R5G2 diente, auch für das Experiment R5G3. Dieses Experiment beinhaltet eine dritte Kühlrohrkonfiguration (siehe Abbildung 120). Als Materialparameter werden die des R5G2-Modells verwendet und die Randbedingungen wurden mit den Sensordaten aus dem Experiment ermittelt.

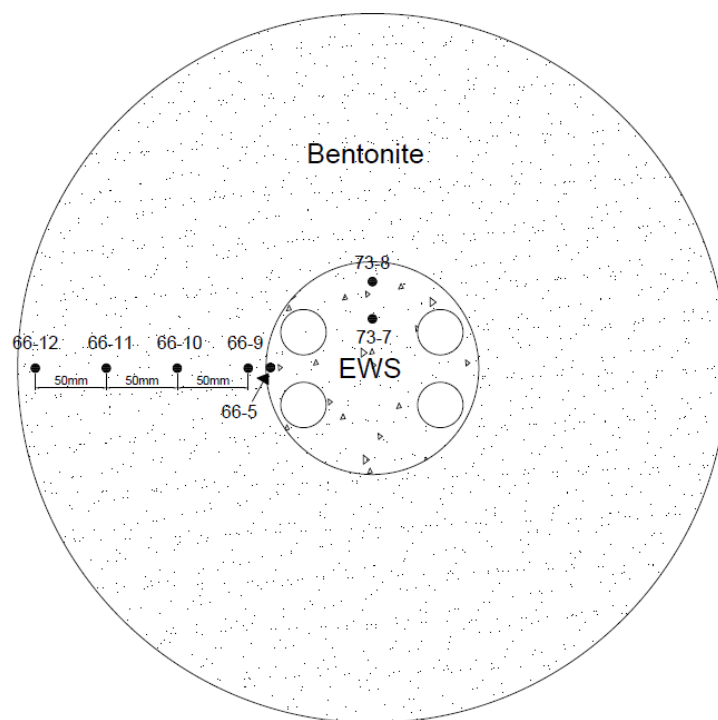


Abbildung 120: Lage der R5G3 Sensoren

Abbildung 121, Abbildung 122 und Abbildung 123 zeigen die Ergebnisse aus dem Modell in Gegenüberstellung mit den Daten, die von den Sensoren im Verfüllmaterial erzeugt wurden.



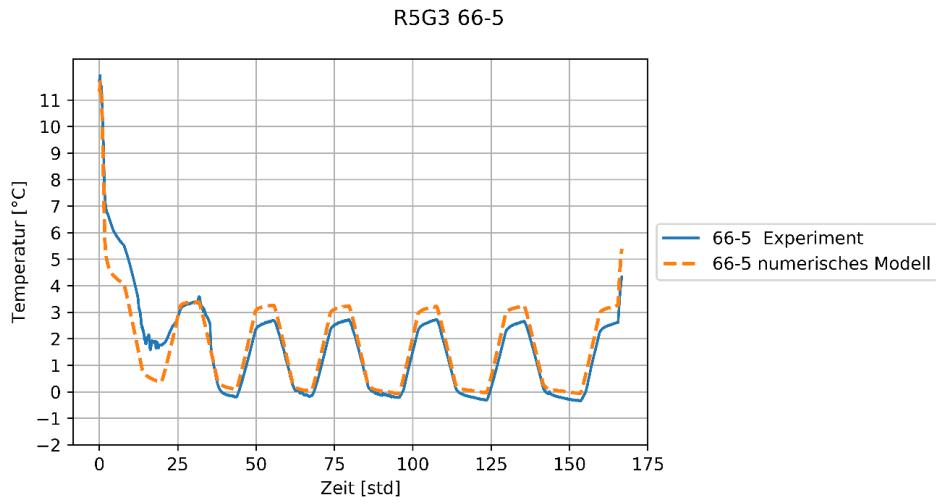


Abbildung 121: R5G3 Sensor 66-5

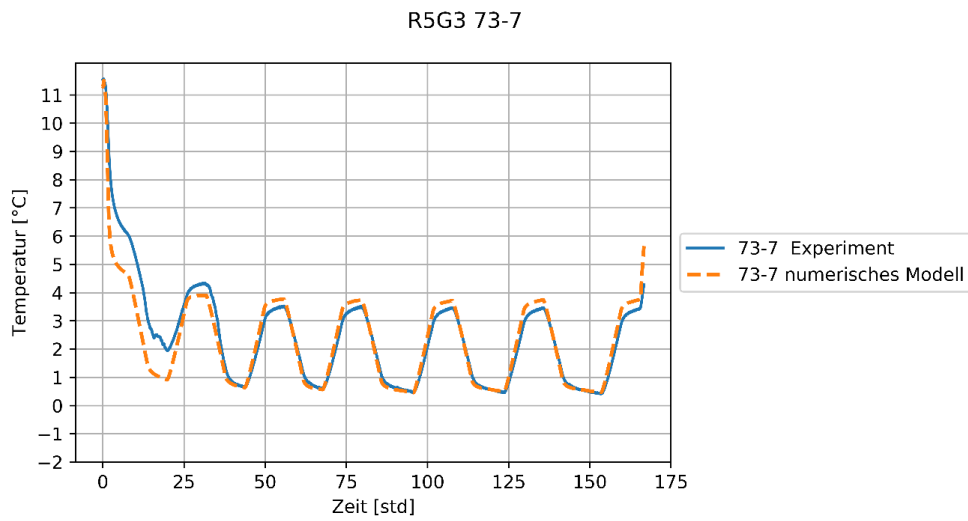


Abbildung 122: R5G3 Sensor 73-7

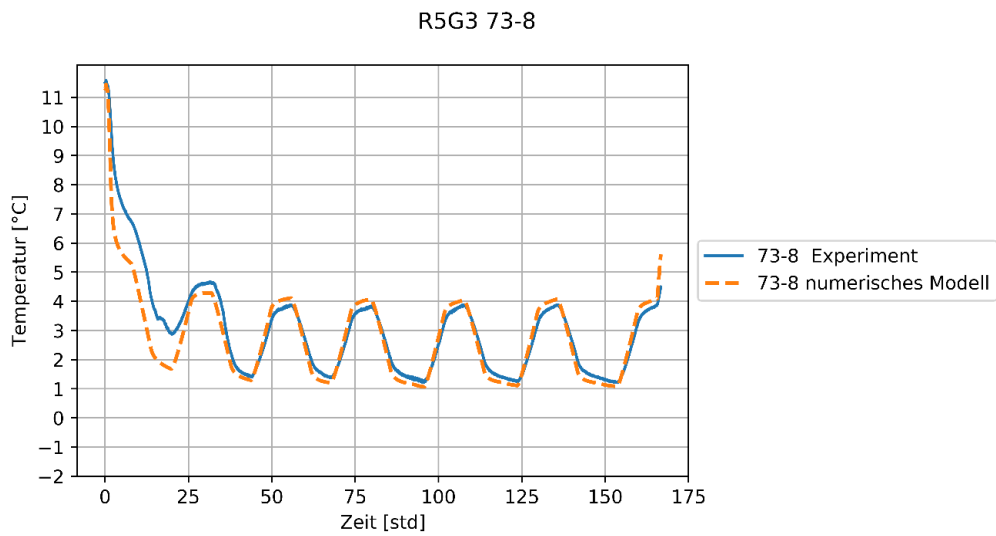
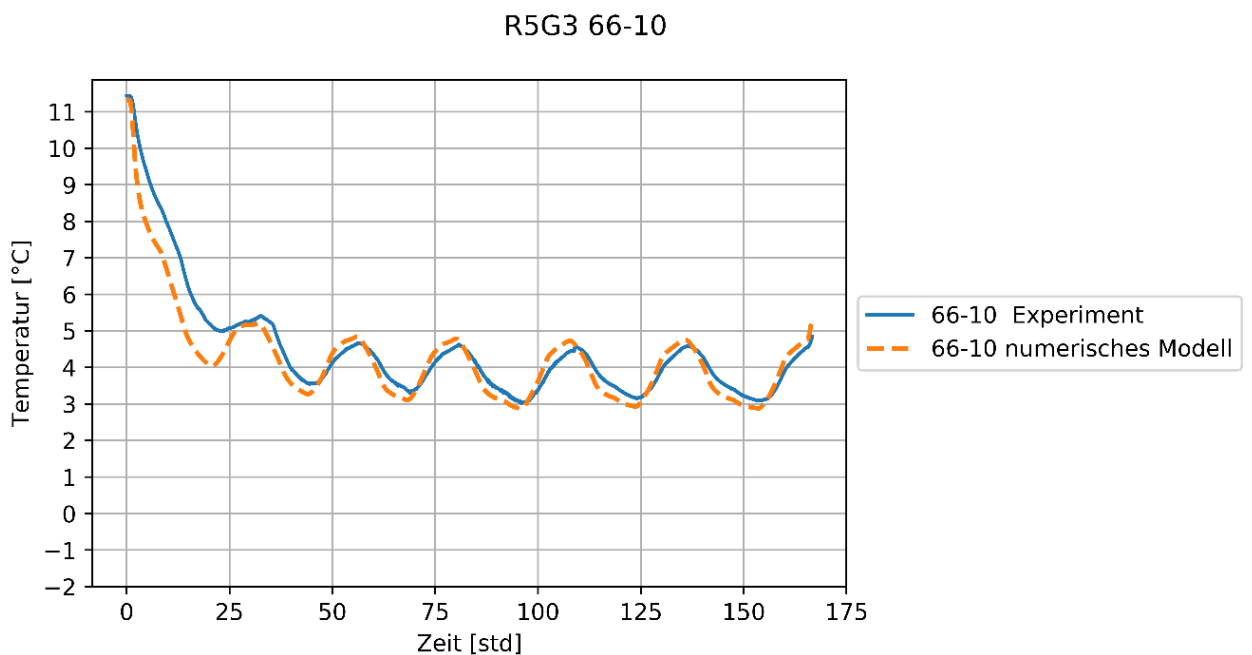
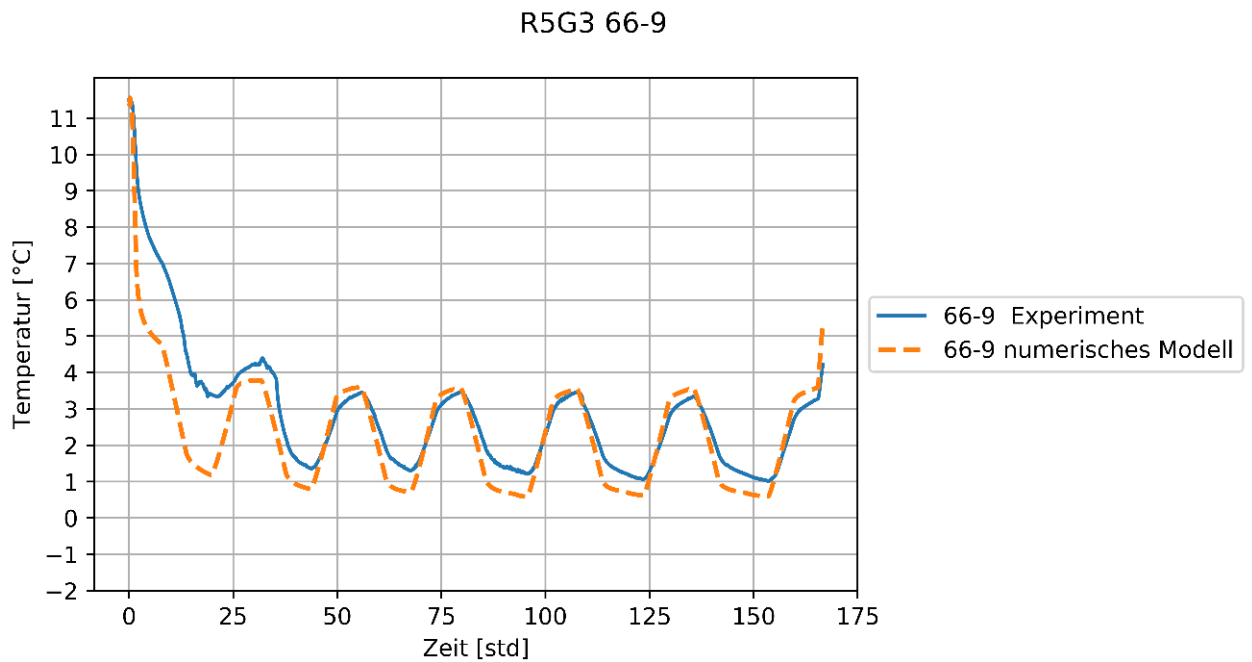


Abbildung 123: R5G3 Sensor 73-8

Die Sensoren zeigen einen Temperaturanstieg zwischen Stunde 0 und 25. Obwohl nicht sicher ist, was den Temperaturanstieg verursacht hat, so scheinen die Sensordaten und Ergebnisse aus dem Modell nach dem ersten Zyklus zu konvergieren.

Abbildung 124 bis Abbildung 127 zeigen die Ergebnisse aus dem Modell im Vergleich mit den Daten, die von den Sensoren im Bentonit erzeugt wurden.



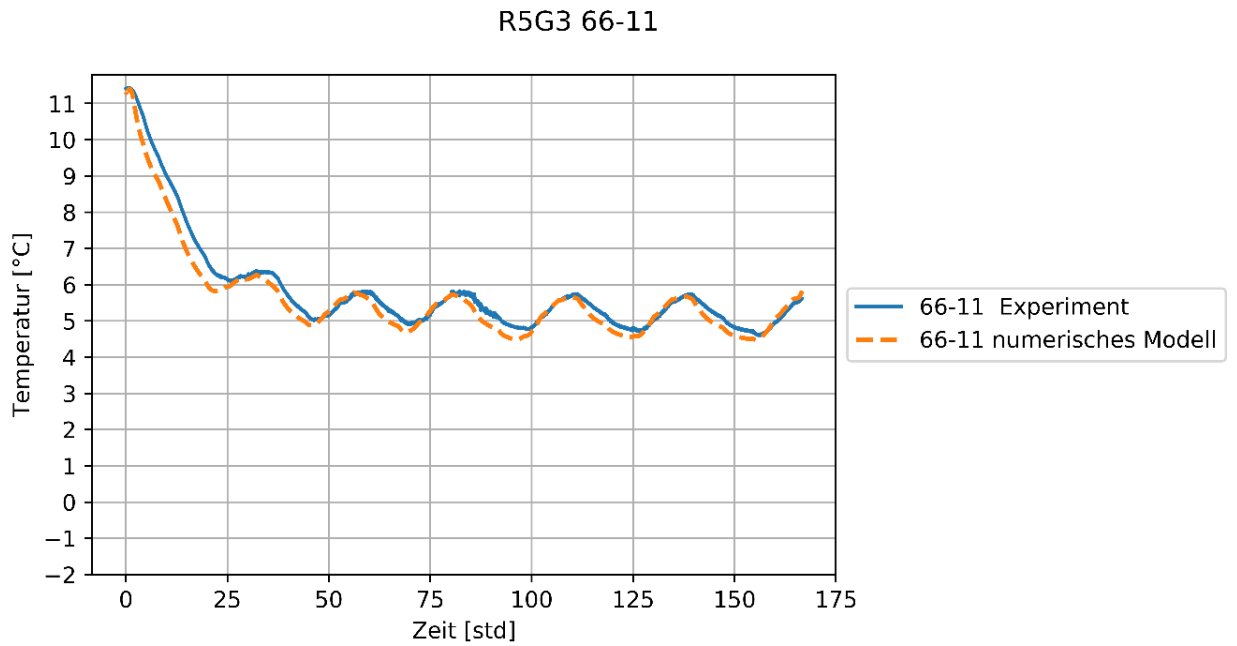


Abbildung 126: R5G3 Sensor 66-11

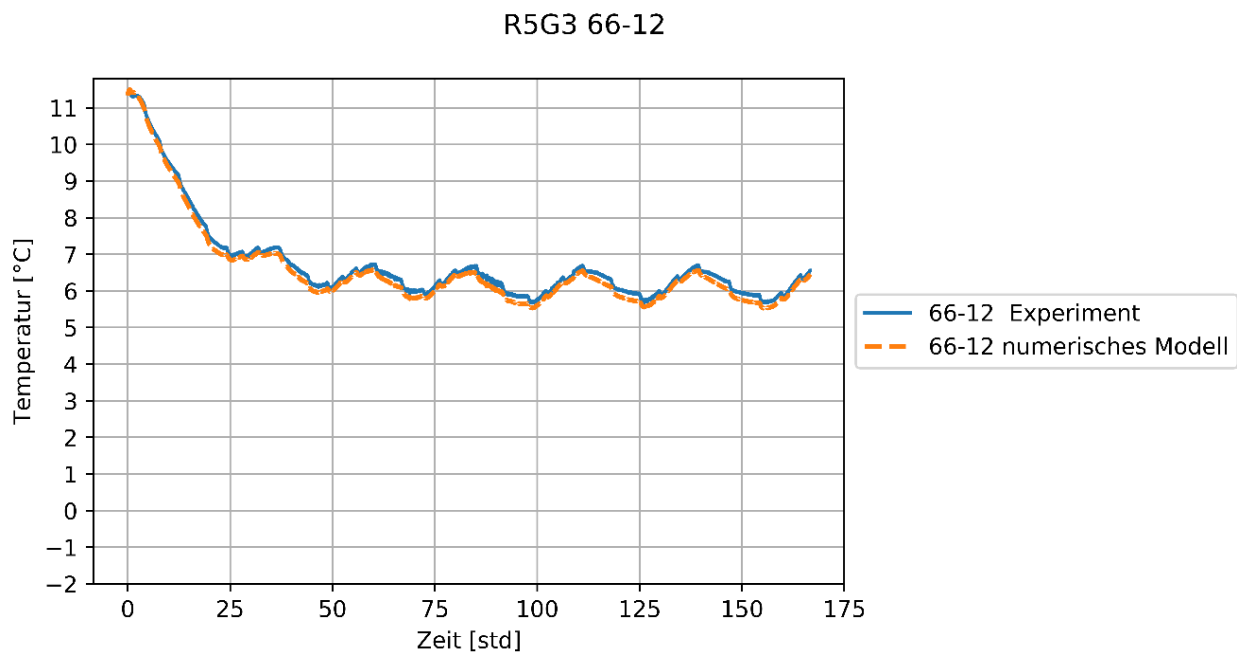


Abbildung 127: R5G3 Sensor 66-12

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Geometrie 3 kein Frost in der Bentonit-schicht auftritt. Ein Temperaturanstieg wurde ausgemacht, der aber im Modell nicht nachgewiesen werden konnte. Dennoch konvergieren die Daten wieder nach dem ersten Zyklus.

### 9.7.6 Permeameterexperiment

Das Ziel dieses Experimentes ist die Untersuchung einer Spaltbildung zwischen dem Verfüllmaterial und dem Erdreich bei einer Erdwärmebohrung. Die Ausbildung eines solchen Spaltes kann negative Auswirkungen haben. Dazu zählt die Vergrößerung der hydraulischen Leitfähigkeit im Erdreich, was einen Grundwasserverlust oder eine Kontaminierung des Grundwasserspeichers hervorrufen kann.

Das IGS entwickelte ein numerisches Modell, um das Experiment, das von VEGAS durchgeführt wurde, zu simulieren. Dabei wurde die hydraulische Leitfähigkeit der Bohrung bevor, während und nach der Kühlphase gemessen.

Das numerische Modell koppelt die Wärmeleitung mit dem thermischen Ausdehnungs- und Deformationsmodell. Es berechnet die Verschiebungen auf Grundlage des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials, wobei in diesem Fall der thermische Ausdehnungskoeffizient des Flüssigbodens als  $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  angenommen wurde (ähnlich Zement und Beton). Die Verschiebung wurde zur Berechnung der thermischen Leitfähigkeit verwendet (siehe Kapitel 9.7.1).

Um die hydraulische Leitfähigkeit der Erdwärmebohrung zu testen, wird ein halbfestes Material benötigt (sehr geringe thermische Leitfähigkeit). Hier wurde Flüssigboden als die das Verfüllmaterial umgebende Schicht verwendet. Die hydraulische Leitfähigkeit des Flüssigbodens wurde durch das IGS mit  $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  bestimmt.

Das Experiment verwendet die Rohrkonfiguration aus Geometrie 1 (siehe Abbildung 128). Die Kühlrohre sind in identischem Abstand zum Mittelpunkt des Verfüllmaterials angeordnet und ein Fallkopftestapparat wurde mehrmals über den Verlauf des Experimentes durchgeführt um die hydraulische Leitfähigkeit zu bestimmen.

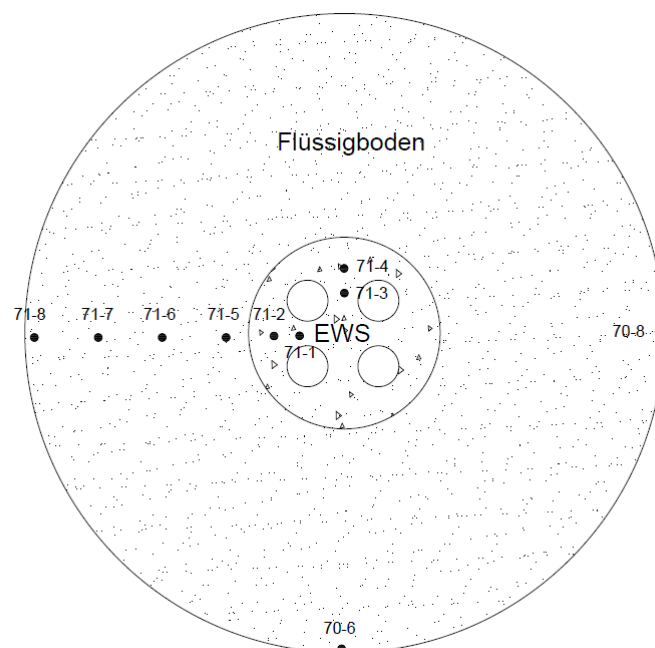


Abbildung 128: Permeameterexperiment (R6G1) Sensorverteilung

In die Erdwärmebohrung konnten keine Sensoren eingebaut werden, da die dafür benötigten Kabel die hydraulische Leitfähigkeit während des Experimentes hätten beeinflussen können. Dafür wurde eine weitere Erdwärmebohrung mit Temperatursensoren eingebaut, die das gleiche Temperaturprogramm besitzt und als Referenz verwendet wird.

Abbildung 129 bis Abbildung 132 zeigen die Ergebnisse des Modells im Vergleich zu den Temperaturen, die im Verfüllmaterial während des Experimentes gemessen wurden:

R6G1 71-1

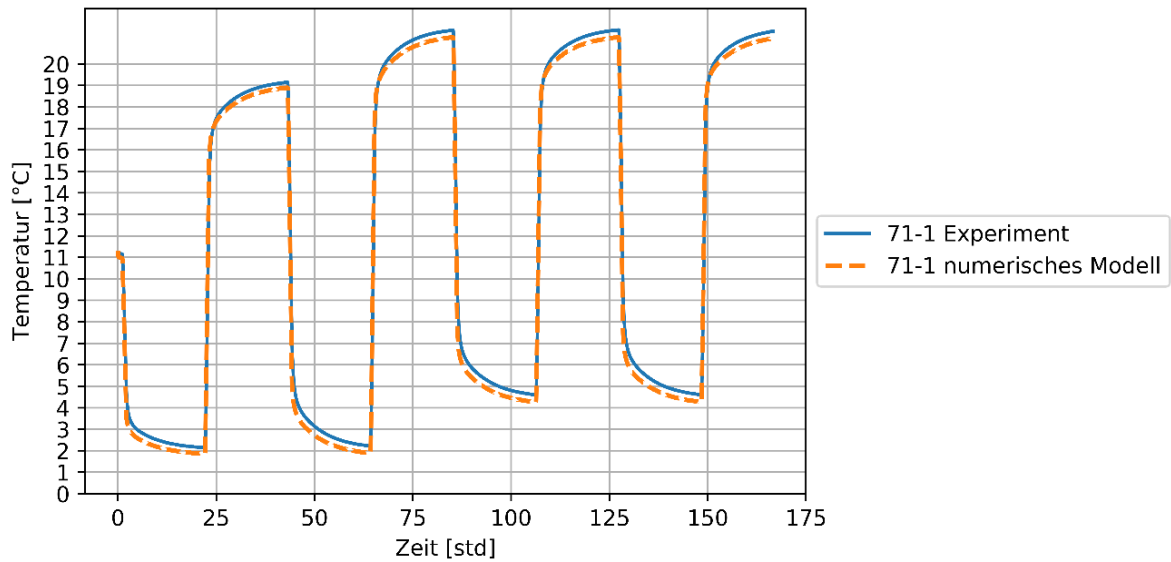


Abbildung 129: Permeametersensor 71-1

R6G1 71-2

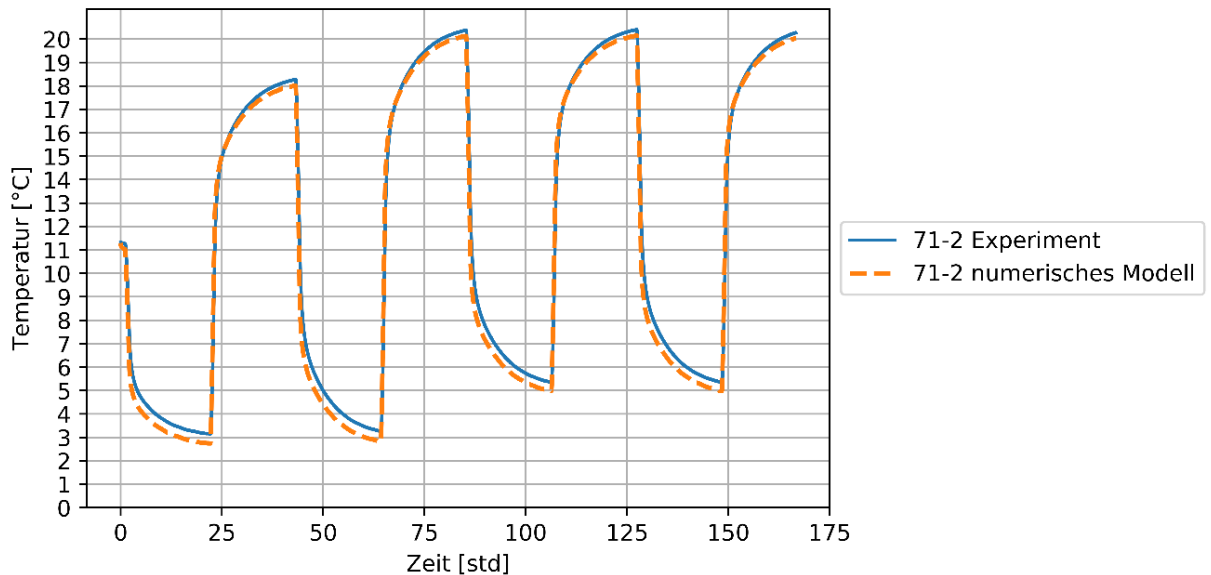


Abbildung 130: Permeametersensor 71-2

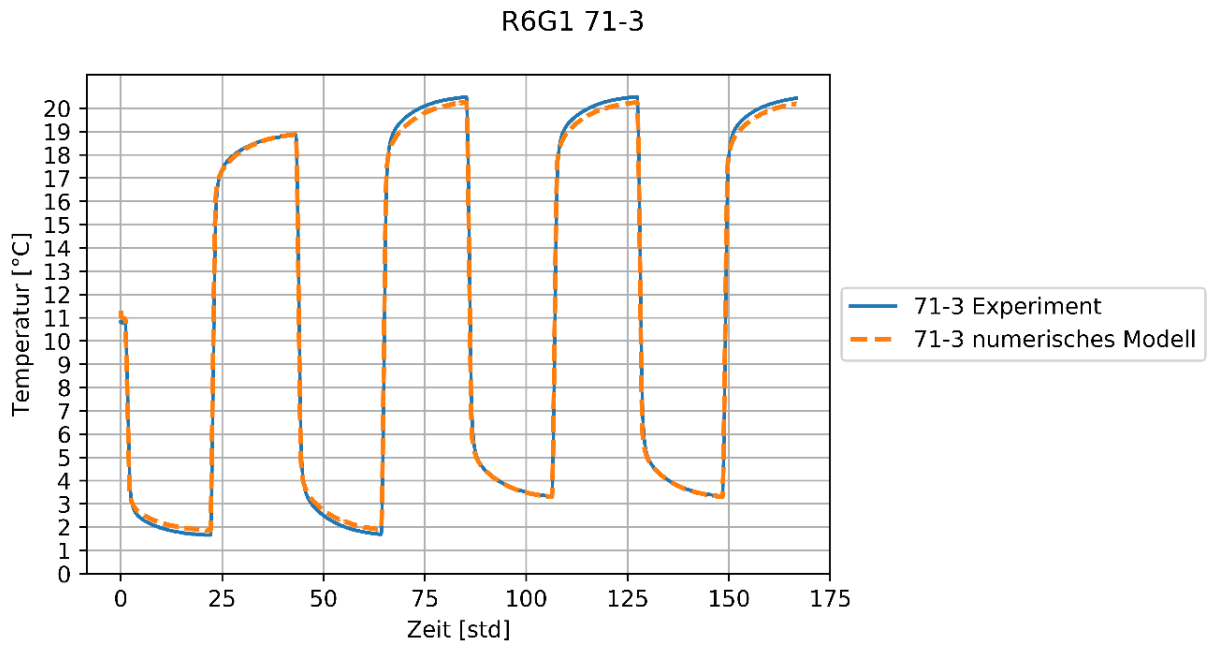


Abbildung 131: Permeametersensor 71-3

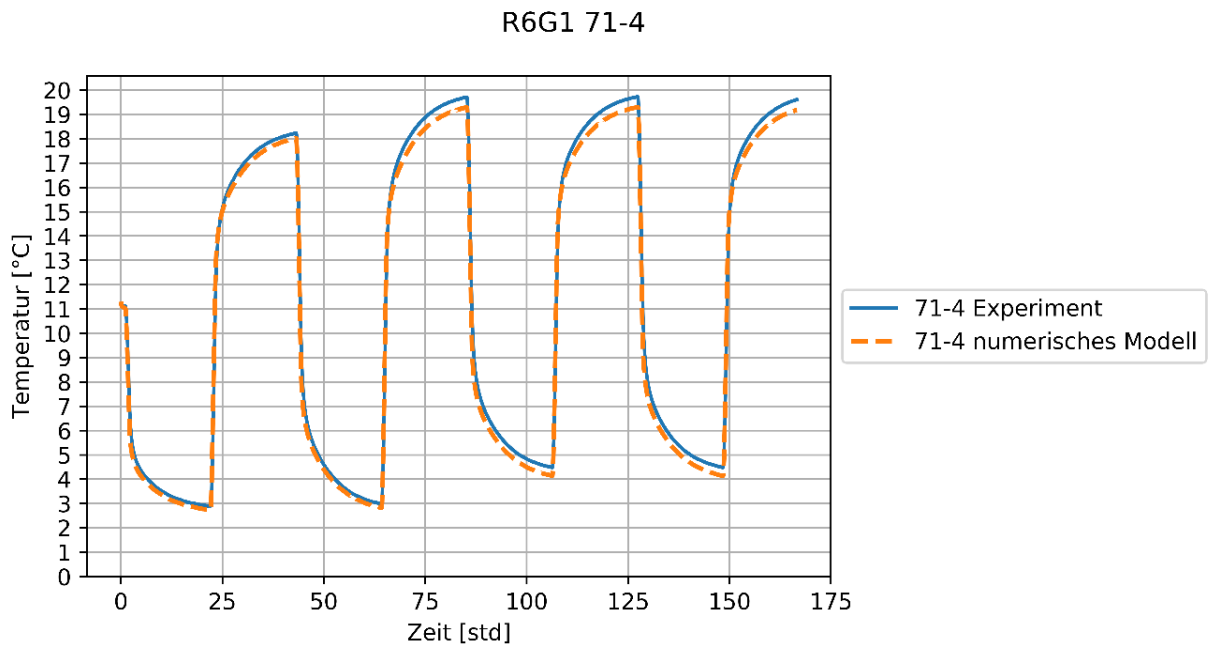


Abbildung 132: Permeametersensor 71-4

Abbildung 133 bis Abbildung 136 zeigen die Ergebnisse des Modells angefangen mit den Sensoren, die sich am nächsten zum Verfüllmaterial befinden.

R6G1 71-5

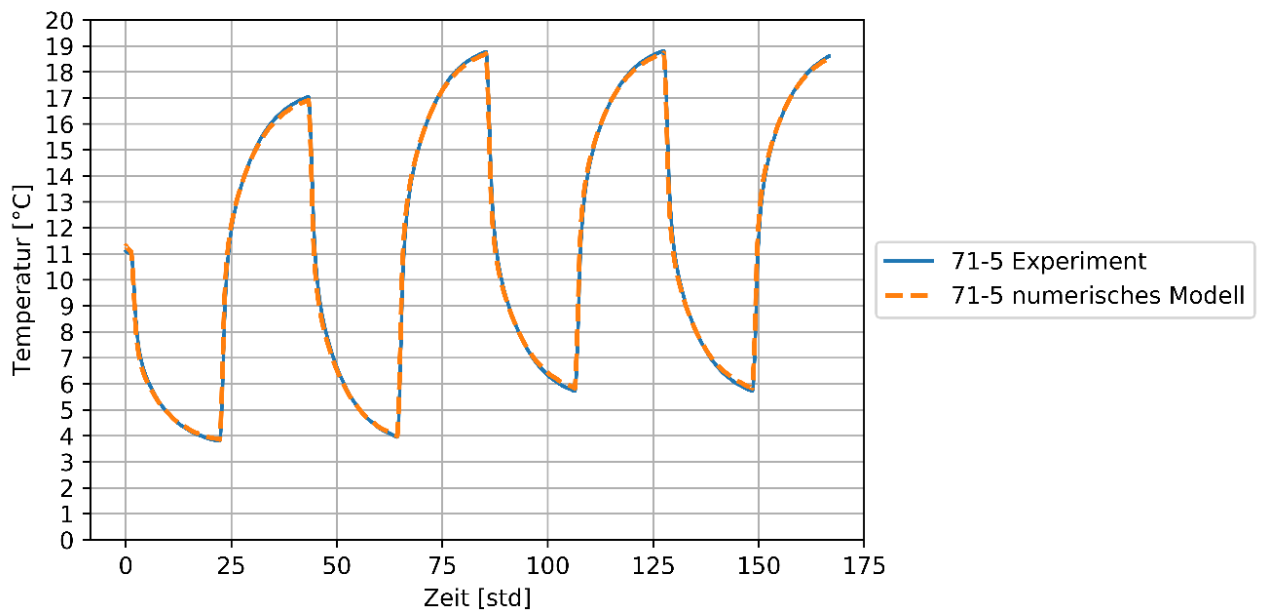


Abbildung 133: Permeametersensor 71-5

R6G1 71-6

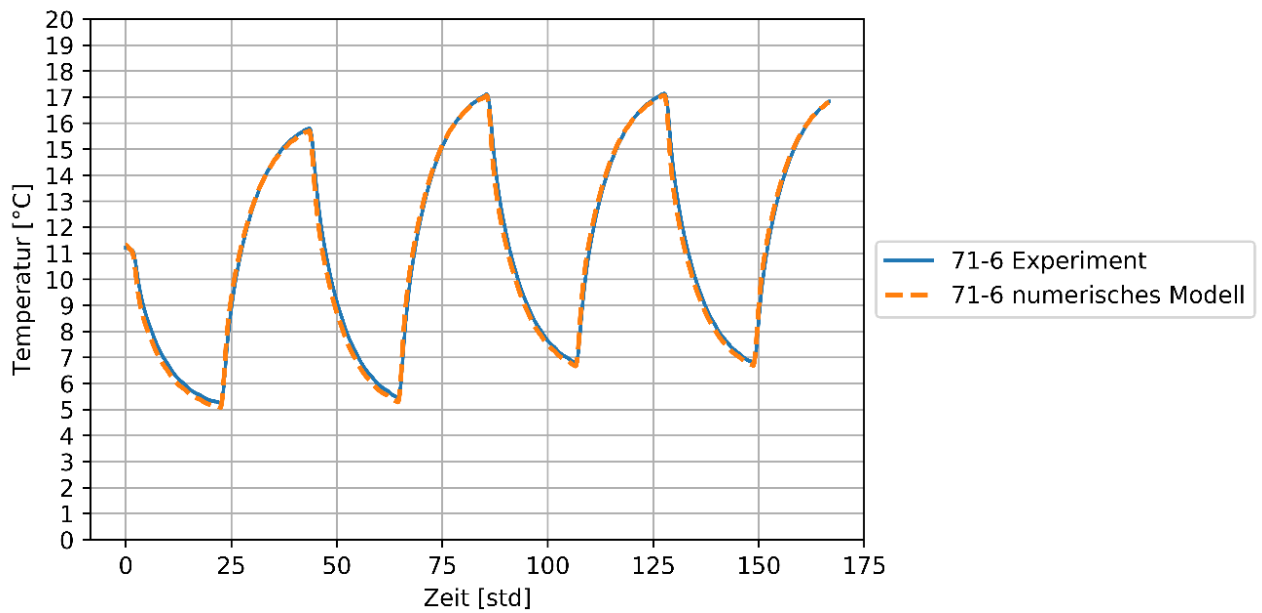


Abbildung 134: Permeametersensor 71-6

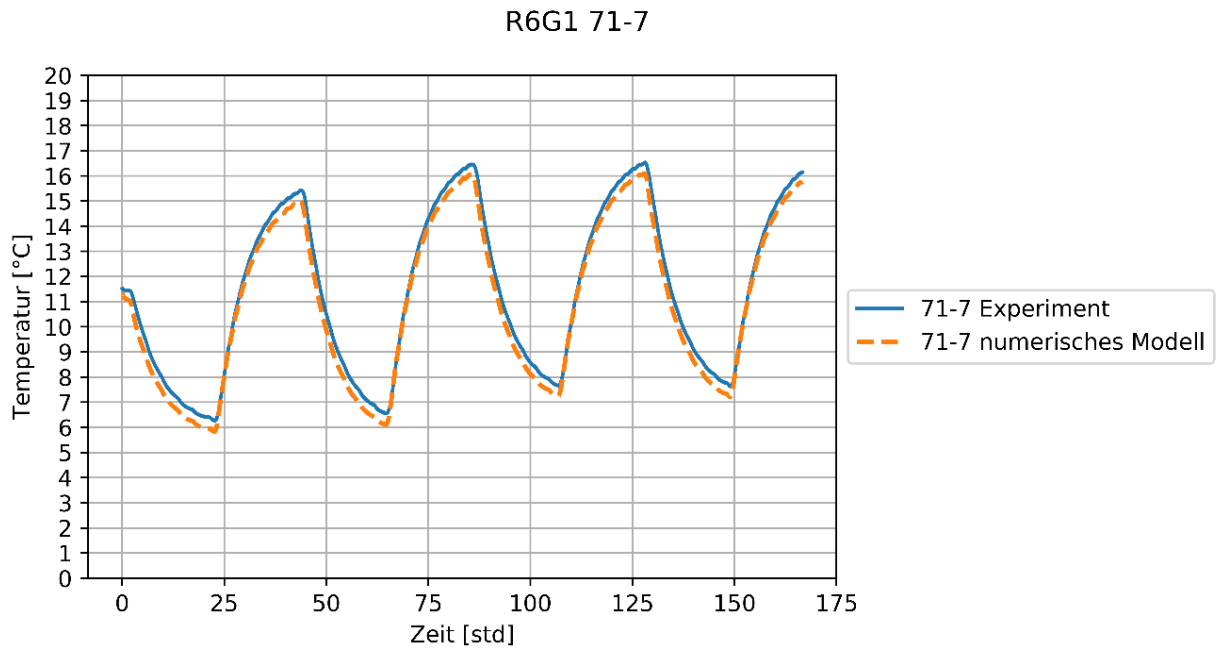


Abbildung 135: Permeametersensor 71-7

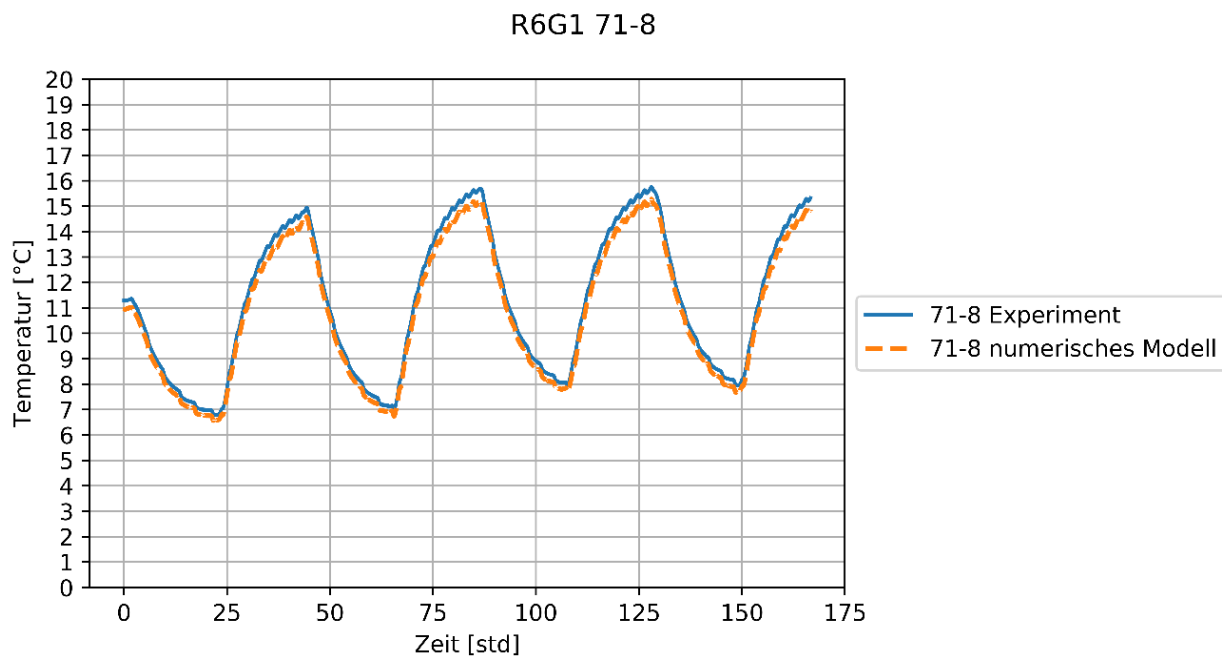


Abbildung 136: Permeametersensor 71-8

Das numerische Modell hat die Temperaturänderungen exakt abgebildet. Die thermische Dehnung und die Verschiebung wurden auf Basis der durchschnittlichen Verschiebung des Flüssigbodens berechnet (wie in Kapitel 9.7.1 beschrieben). Die Ergebnisse aus dem Modell werden mit der hydraulischen Leitfähigkeit, die in dem Experiment erfasst wurde und in Abbildung 137 dargestellt ist, verglichen.



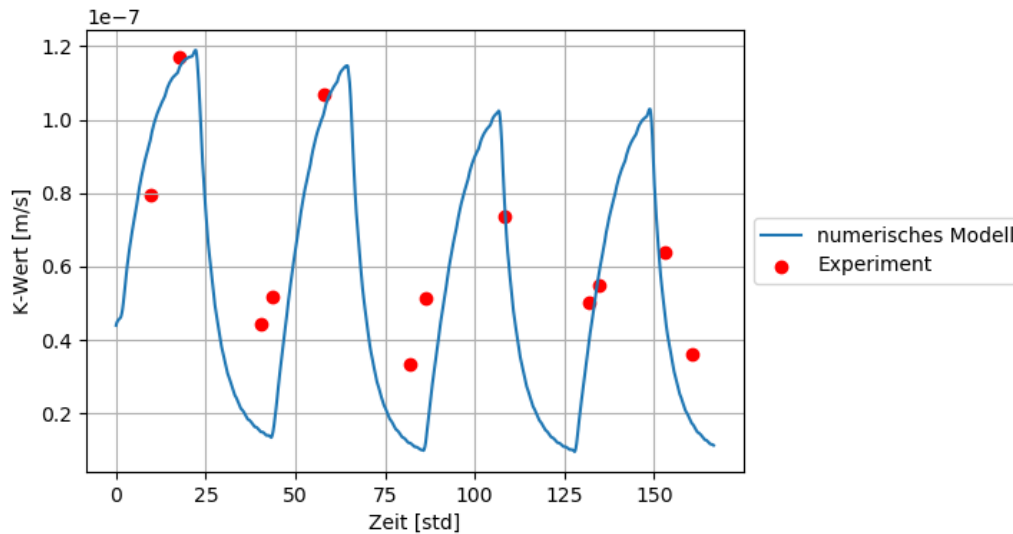


Abbildung 137: Vergleich von hydraulischer Leitfähigkeit

Während es mit dem numerischen Modell möglich war, die Temperaturänderungen des Experimentes zu simulieren, konnten die Änderungen in der hydraulischen Leitfähigkeit nicht exakt abgebildet werden. Der Verlauf der hydraulischen Leitfähigkeit konnte zwar approximiert werden, aber es scheint in den Extremwertbereichen zu Abweichungen von den gemessenen Werten zu kommen, insbesondere in Bereichen mit geringerer hydraulischer Leitfähigkeit, was auf mehrere Gründe zurückzuführen ist:

1. Die Verschiebung durch thermische Ausdehnung breitet sich nicht gleichmäßig über den Durchmesser des Erdreichquerschnittes aus; da jedoch das kubische Gesetz vorzugsweise für Gesteinsbrüche verwendet wird, benötigt es den Durchmesser des Ringspalt. Dafür wurde die durchschnittliche Verschiebung als Durchmesser des Ringspalt verwendet, was im Ergebnis Ungenauigkeiten zur Folge haben kann.
2. Basierend auf Gleichung (9-20) kann angemerkt werden, dass die Verschiebung, die dafür verwendet wird um die hydraulische Leitfähigkeit zu messen, sehr sensitiv auf geringste Änderungen bei dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten reagiert. Während der aus der Literatur [38] verwendete Wert als  $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  angenommen wurde, kann der tatsächliche Wert auf Grund der verwendeten Mischung leicht abweichen. Um diesen exakt zu ermitteln, wird spezialisiertes Equipment benötigt.
3. Menschliche und materielle Abweichungen (Beispiel: Im Apparat eingeschlossene Luft) können zu weiteren Divergenzen bei den Ergebnissen führen.

## 9.8 Zusammenfassung AP 4, AP 5 a, AP 5b

FEFLOW und COMSOL sind zwei der beliebtesten und am weitesten verbreiteten kommerziell erhältlichen Softwarepakete im Bereich des unterirdischen Wärmetransports. Ein gemeinsames Ziel der AP 5a und AP 5b war es die unterschiedlich erstellten thermischen Modelle für die verschiedenen Geometrien auf der Basis der experimentellen Daten aus AP 4 zu validieren. Dies könnte dann zu einem späteren Zeitpunkt helfen weitere Herausforderungen einer praktischen Anwendung zu lösen (unbegrenzte „Domain“, Aquifer, Wärmepumpenlastszenario).

AP 1, AP 2 und AP 4 haben gezeigt, dass:

- das Gefrieren an der PE-VM-Grenzfläche entsteht.
- bei den betrachteten Temperaturen die Gefrierfront an der Grenzfläche nicht in das Verfüllmaterial eindringen kann.
- das Gefrieren an der Grenzfläche nach der Nukleationstheorie erfolgt und dass die Temperatur bei der es auftritt, von vielen Faktoren auf mikroskopischer Ebene beeinflusst wird. Somit kann es in den Modellen nicht direkt abgebildet werden.

Diese Erkenntnisse sind von folgender Bedeutung für die Simulationen im Rahmen des AP 5:

- Da der Phasenwechsel nur diese kleine Übergangszone betrifft, ist er aus Sicht der Temperaturentwicklung im Versuch / Feld vernachlässigbar.
- In den Versuchen (ungünstigster Fall: kein seitlicher / passiver Erddruck) sind die Auswirkungen nur aus mechanischer Sicht relevant.
- Damit ist es zunächst wichtig zu zeigen, dass die Modelle in der Lage sind die Experimente zu reproduzieren, d.h. dass die Physik dahinter stimmt, um dann
- im nächsten Schritt die Domäne von den im Experiment simulierten 25 cm Radius auf größere Radien (Dimensionen) zu erweitern.

Maßgeblich für eine erfolgreiche Modellierung ist die Bereitstellung relevanter Eingangsparameter und stabiler Anfangs- und Randbedingungen. Besonders kritisch waren:

- Thermische Parameter, insbesondere Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme:
  - Quarzsand, QS: Die verwendete Wärmeleitfähigkeit eines gesättigten Quarzsandes (Tabelle 3) wurde der Literatur [11] entnommen. Die konvektiven Strömungen des Porenwassers im Sand spielt eine wichtige Rolle für die Temperaturverteilung. Dieser Mechanismus ist im 2D-FEFLOW-Modell nicht berücksichtigt, sondern nur im 3D-COMSOL-Modell.
  - Bentonit, BT: Nachdem die Literaturwerte für die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit eine sehr große Spanne zeigen, wurde die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Proben am KIT bestimmt. Es wurden Werte zwischen 1,22 und 1,26 W/(m\*K) gefunden.
  - Verfüllbaustoffe, VM: Die Wärmeleitfähigkeitswerte der Verfüllmaterialien (Tabelle 2) sind den Produktdatenblättern der Hersteller entnommen. Für VM2 ist z. B. lediglich bekannt, dass dieser Wert größer als 2 W/(mK) ist. Der einzige Stoff, für den ein Wert bekannt ist, weil er im Rahmen des „EWS-Frost“-Projekts [33] gemessen wurde, ist VM3d ( $\approx 2$  W/(mK)).
- Stabilität der Temperatursensoren:

Obwohl die Sensoren vor der Einbringung immer sorgfältig kalibriert und überprüft wurden, konnte es vorkommen, dass diese nach dem Verpressen / Befüllen der Versuchsstände Abweichungen zeigten. Durch sorgfältige Aufnahme der Initialbedingungen konnten fehlerhafte Sensoren detektiert und deren Abweichungen quantifiziert werden.
- Temperaturrendbedingungen:

Abbildung 139 zeigt die Temperatursensoren, die für die Bestimmung von Temperaturrendbedingungen zur Verfügung standen (Tabelle 18). Zusätzlich befanden sich im Kühlraum

zwei fest installierte Sensoren, die die Temperatur der Luft im oberen Bereich maßen, einer in der Nähe des Kompressors (70-4) und einer weiter entfernt (41-7).

- Im 3D-COMSOL-Modell wurde versucht, die „heat-flux“-Randbedingung zu verwenden um von der Lufttemperatur, unter Berücksichtigung von Konvektionsströmungen, die Temperatur am Rand des Experiments abzuleiten. Dies war mit der geringen Anzahl von Sensoren auf Grund der Betriebsweise der Kühlung (Schwankungsbreite 9 bis 12 °C) erfolglos. Zusätzlich waren die bei 70-4 gemessenen Temperaturen kälter als bei 41-7 (Abbildung 138) und die Luft bewegte sich konvektiv.
- In der Reihe 1 waren weitere Temperatursensoren (Abbildung 139) an der Außenwand der Versuchssäule (AW), zwischen Säule und Isolierung, installiert. Diese Sensoren waren kaum durch Schwankungen im Raum beeinflusst.
- Ab R2 (ohne Isolierung) wurde die Sensorposition zwar beibehalten, die Sensoren zeigten sich jedoch sehr anfällig für „zufällige“ Temperaturschwankungen z.B. durch den Kompressorbetrieb.
- Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Sensoren bei der Reihe 5 an die Innenwand der Versuchssäule zu verlegen. Die Verwendung dieser Sensoren als Referenz für die konstante Temperaturrandbedingung führte zu den besten Ergebnissen.



Abbildung 138: Temperatursensoren im Kühlraum

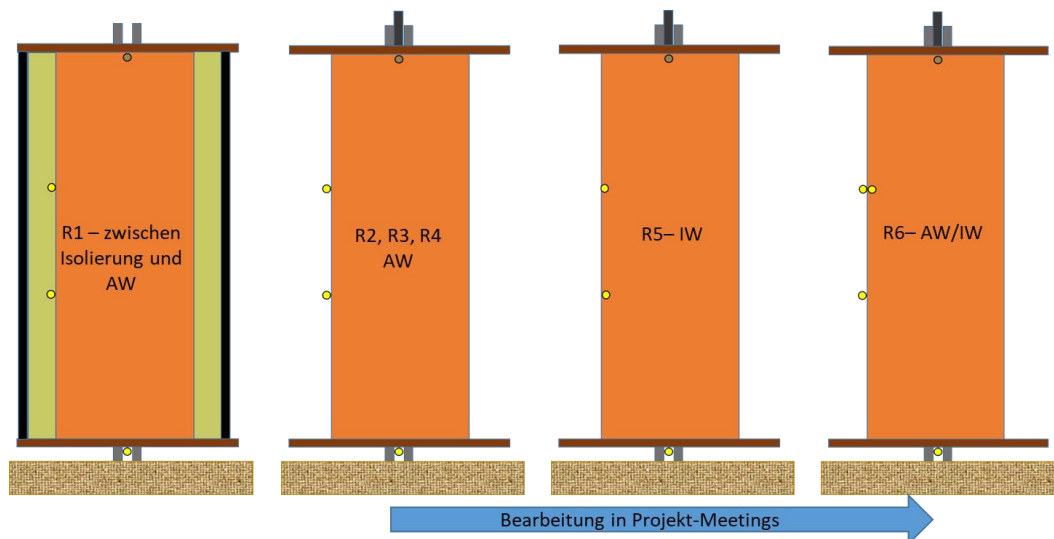


Abbildung 139: Temperatursensoren zur Bestimmung der Randbedingungen an den Experimenten

Nachfolgend werden die Ergebnisse von Simulationen einiger Konfigurationen (R5G2 (Geometrie 2, VM3d, BT) und R5G3 (Geometrie 3, VM3d, BT), die sowohl mit dem thermischen 2D-Modell in FEFLOW (AP 5a, Kap. 9.6) als auch mit dem hydraulisch-thermischen 3D-Modell in COMSOL (AP 5b, Kap. 9.7) durchgeführt wurden, vorgestellt.

Abbildung 140 und Abbildung 141 zeigen den Vergleich zwischen den mit beiden Modellen simulierten Daten (3D-Comsol Modell links, 2D-FEFLOW Modell rechts) und den experimentellen Daten für die Konfigurationen R5G2 bzw. R5G3. Die Positionen aller Sensoren im Querschnitt des Versuchsstands sind in Abbildung 142 dargestellt.

- Die beiden Modelle zeigen den gleichen Grad der Übereinstimmung bezüglich der Sensoren 10, 11, 12 im Bentonit (Abbildung 140 und Abbildung 141, je erste Reihe). Tatsächlich hängt die Temperaturentwicklung an diesen Punkten stark von der Randbedingung (BC) ab. Die initiale BC-Temperatur beträgt ca. 11 °C. In den ersten 30 Stunden des Temperaturprogramms TP3 sinkt die BC-Temperatur und erreicht die Werte, die in allen Diagrammen zu sehen sind (30-80 Stunden). Die Beeinflussung der BC-Temperatur durch den Kühlraumbetrieb (Abbildung 143) wird von den Modellen nicht abgebildet, was den leichten Unterschied zwischen den realen und den simulierten Daten erklärt.
- Betrachtet man die Diagramme in der zweiten Reihe, so zeigt sich, dass das 3D-Modell COMSOL im Bereich der Bohrlochwand wesentlich besser abschneidet als das 2D-Modell FEFLOW.
- Auch im EWS-Ringraum zeigt das 3D-Modell COMSOL eine sehr gute Übereinstimmung. Die Simulation des Außensensors 4 zwischen einem Rück- und einem Zulaufrohr ist immer am ungenauesten, was darauf zurückzuführen ist, dass als Temperaturrandbedingung am Umfang der gesamten Säule die Randbedingungstemperatur (BC) angenommen wurde, die auf der Achse zwischen den zwei kälteren Zulaufrohren liegt.
- Das 2D-Modell FEFLOW schneidet im Ringraum weniger gut ab, vor allem an den Positionen, die stark vom Wärmetauscher beeinflusst werden zeigt es viel niedrigere Temperaturwerte.

- Der Unterschied bei den Ergebnissen ist in der Modellvereinfachung begründet, die im 2D-Modell FEFLOW für die Simulation der Soletemperatur, der Strömung im Wärmetauscher sowie für die Wärmeübertragung durch die PE-Rohre eingeführt wurde (Kapitel 9.6 und 9.7).

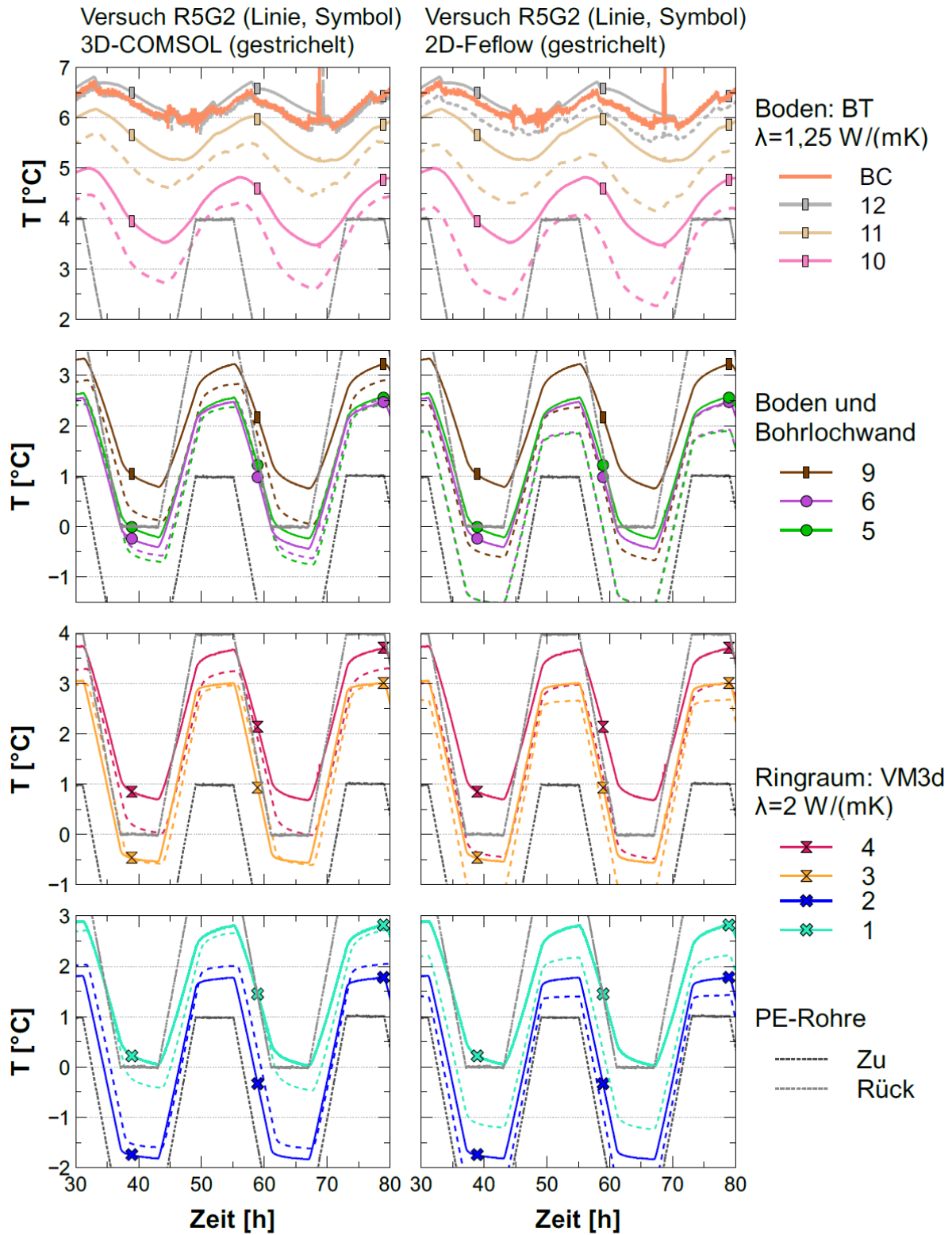


Abbildung 140: Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Temperaturdaten (links 3D-COMSOL, rechts 2D FEFLOW) für die Konfiguration R5G2

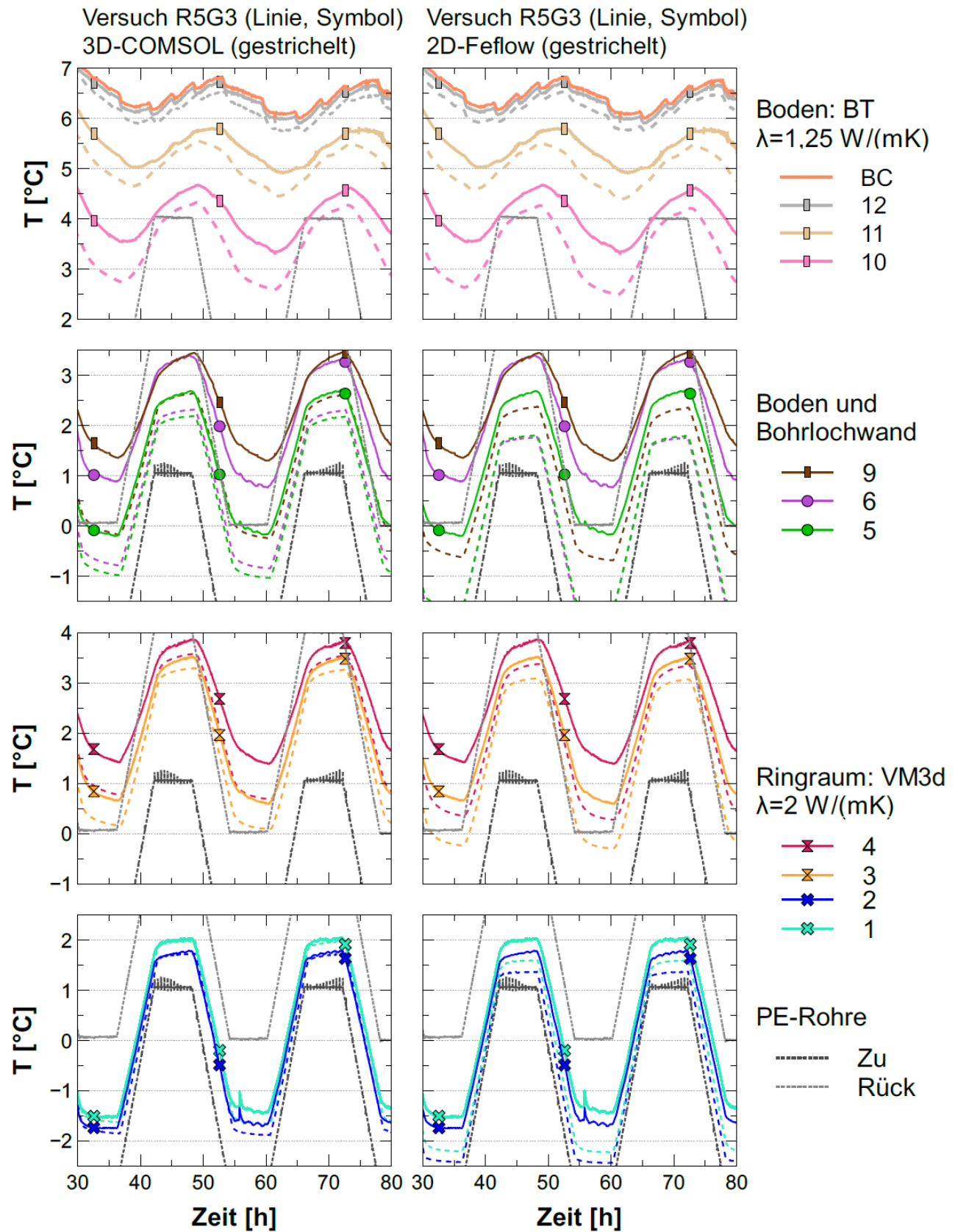


Abbildung 141: Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Temperaturdaten (links 3D-COMSOL, rechts 2D FEFLOW) für die Konfiguration R5G3

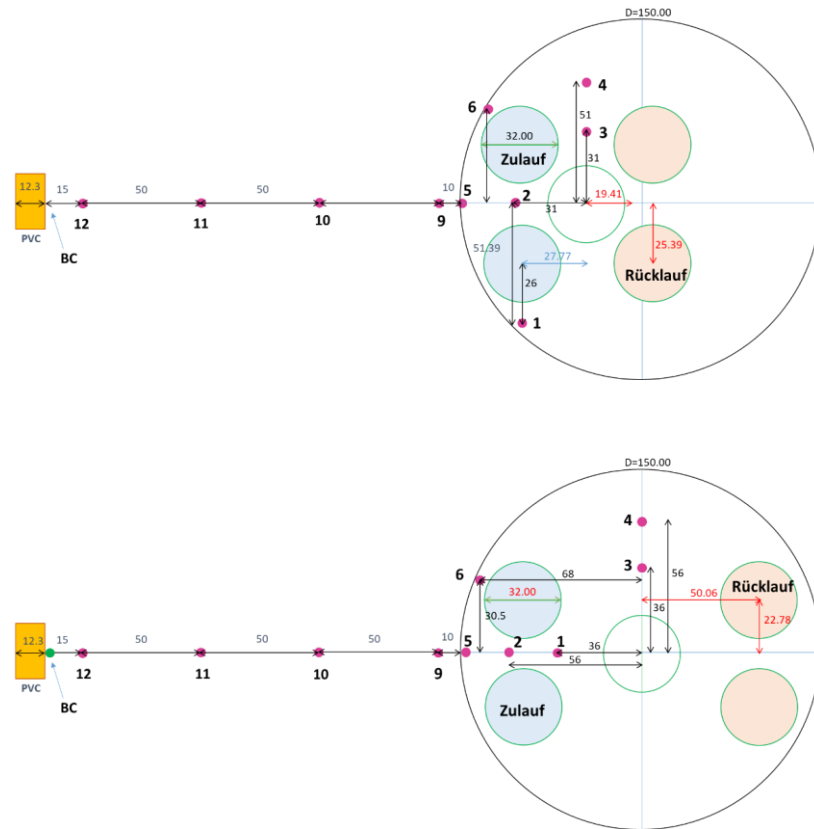


Abbildung 142: Positionen der Temperatursensoren im Versuchstand für die Geometrien 2 (oben) und 3 (unten)

Nachdem beide Modelle eine gute Übereinstimmung zeigten, wurden sie (2D-FEFLOW mit entsprechenden Anpassungen (s. Kapitel 9.6)) anschließend zur Abbildung komplexerer Fragestellungen verwendet (GW-Strömung, Wärmepumpenlastszenario).

Während im Feld der Betrieb einer EWS zu Temperaturveränderungen auch in größeren Abständen führt, waren die hier durchgeführten Experimente auf einen Radius von 25 cm begrenzt und die anliegende Temperaturrandbedingung (Abbildung 143) musste ebenso wie das an die PE-Rohre angelegte Temperaturprogramm berücksichtigt werden.

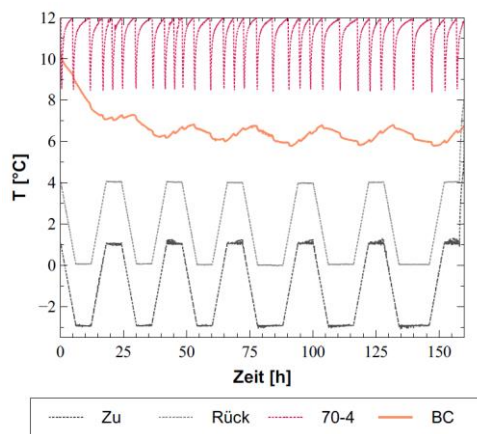


Abbildung 143: Einfluss des Betriebs des Kühlraums (70-4) und des Wärmetauschers (Zu und Rücklaufrohre) auf die Temperaturrandbedingung am Rand der Säule (BC). Beispiel aus R5G3-Versuch.

Im nächsten Schritt wurden daher die experimentellen Daten mit den Daten eines simulierten Falls verglichen, der eine viel größere Domain mit konstanter Randtemperatur ( $R = 20 \text{ m}$ ,  $T_R = 11 \text{ °C}$ ) aufweist. Für diese Simulation wurden die Parameter R5G2 gewählt. Diese Simulationen werden in AP 5a und AP 5b als "Infinite Domain" bezeichnet. Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde das 3D-COMSOL-Modell durch ein 2D-COMSOL-Modell ersetzt; das 2D-FEFLOW-Modell blieb unverändert.

Abbildung 144 zeigt den Vergleich zwischen den experimentellen Daten und den simulierten Ergebnissen analog den oben diskutierten Abbildungen. Die simulierten Daten für den erweiterten Bereich sind viel niedriger als die experimentellen Daten. Dies könnte zu der Annahme führen, dass der Umfang des Experiments und die Randbedingungen in Bezug auf das Feld stark verzerrt sind und dass im Feld niedrigere Temperaturen erreicht werden.

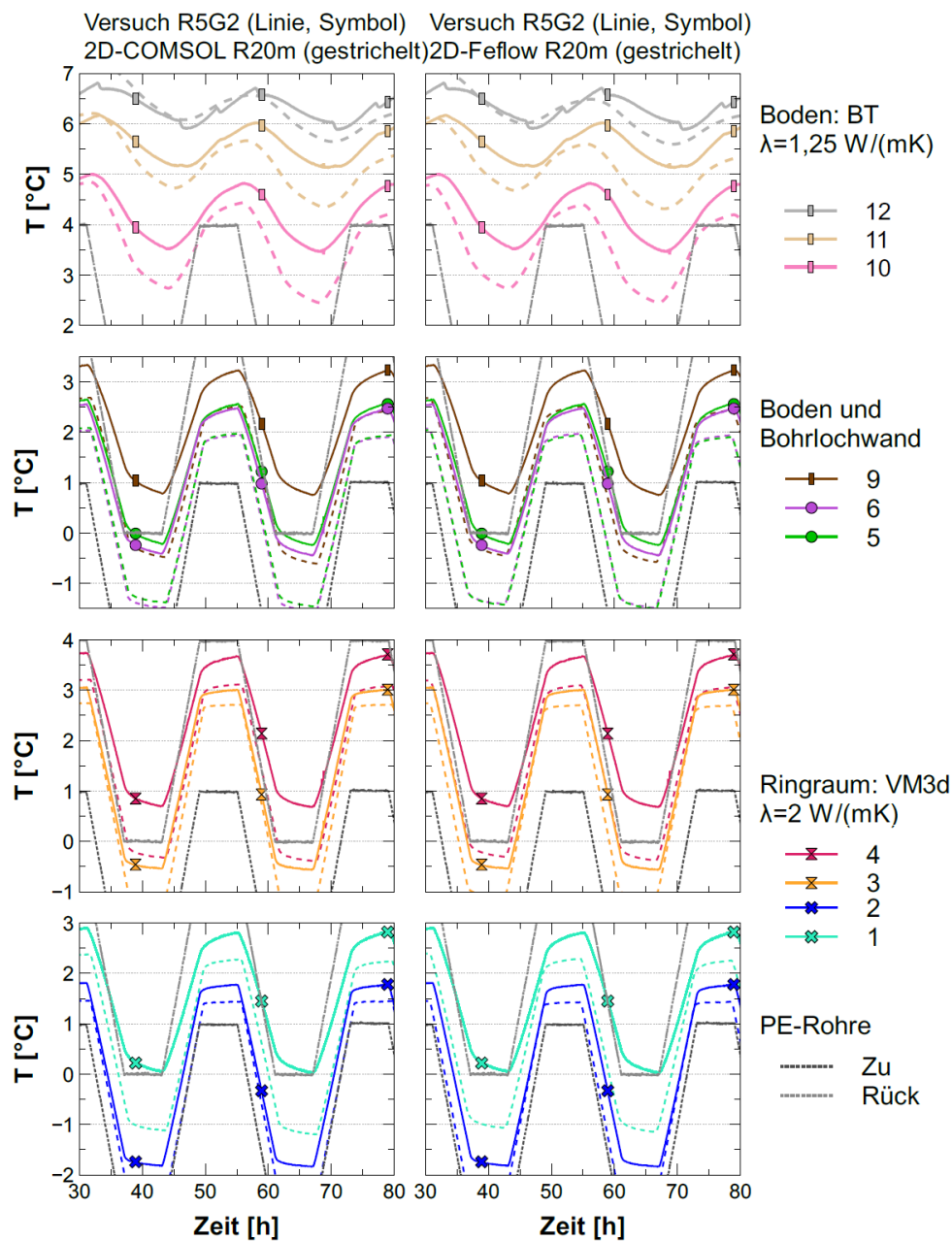


Abbildung 144: Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Temperaturdaten mit „Infinite Domain“ (links 2D-COMSOL, rechts 2D FEFLOW) für die Konfiguration R5G2



Um dieser Fragestellung nachzugehen wurden die simulierten Daten aus dem R5G2-Experiment (d.h. mit den Setup-Randbedingungen) mit den durch Änderung der Domänen- und Temperaturrandbedingungen simulierten Daten verglichen. In Abbildung 145 zeigt die linke Spalte den Vergleich zwischen der Simulation des R5G2-Experiments mit dem 3D-COMSOL-Modell und der zugehörigen R=20 m Domain mit dem 2D-COMSOL-Modell. Die rechte Spalte zeigt den Vergleich zwischen der Simulation des R5G2-Experiments und der Simulation der erweiterten Domain (R=20 m) mit dem gleichen 2D-FEFLOW-Modell. Die Simulationen mit einem erweiterten Radius sind gestrichelt dargestellt.

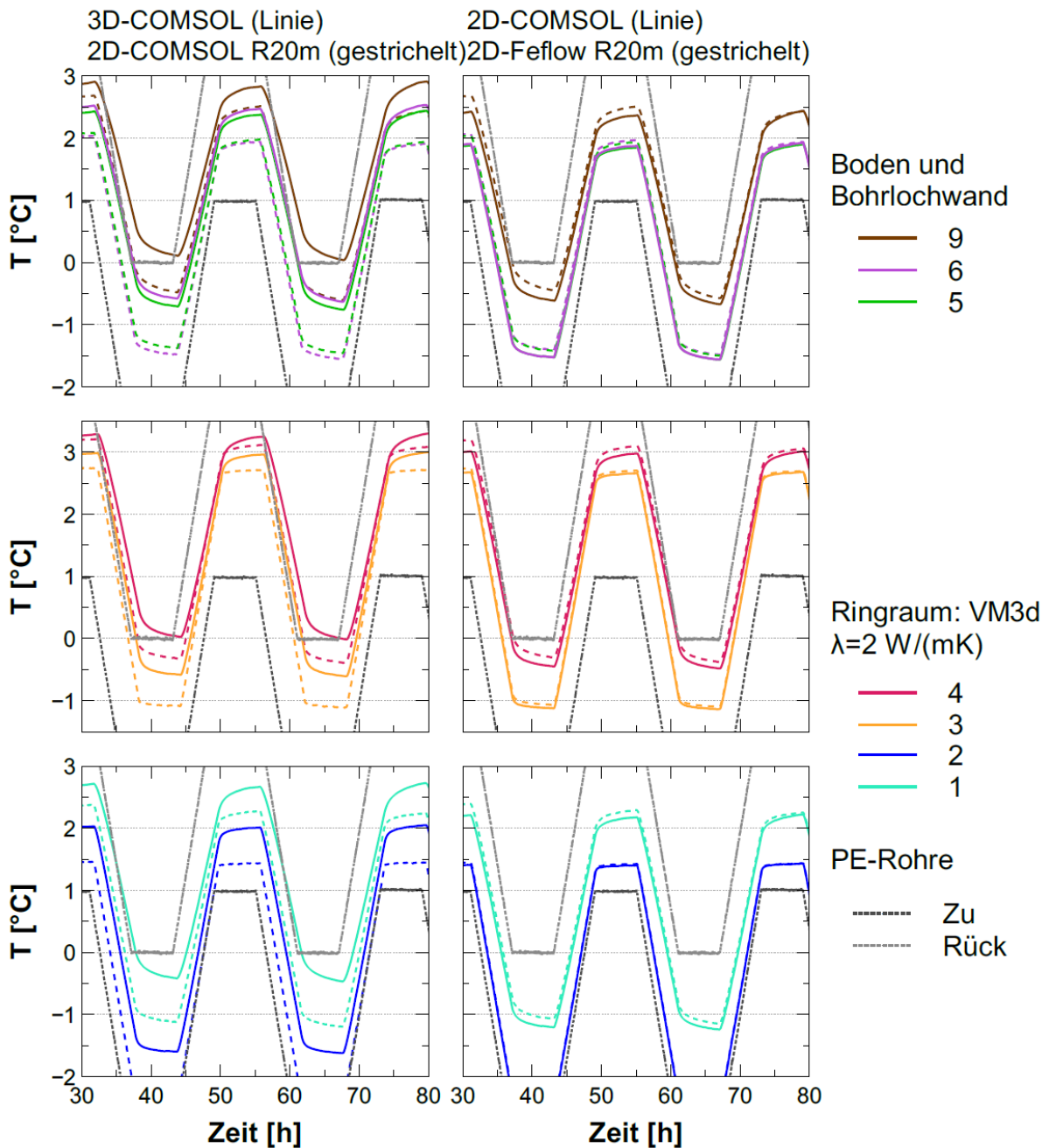


Abbildung 145: Vergleich zwischen simulierten Daten des Versuchstands und simulierten Temperaturdaten mit „Infinite Domain“ (links 2D-COMSOL, rechts 2D-FEFLOW) für die Konfiguration R5G2

Es ist deutlich erkennbar (Abbildung 145, rechts), dass für das (unveränderte) 2D-FEFLOW-Modell der erweiterte Bereich keine großen Unterschiede zum simulierten Experiment für die EWS-Ringraumtemperaturen aufweist (diese sind am kritischsten, weil sie der Keimbildung unterliegen).

Abbildung 145 (links) zeigt hingegen, dass dieser Unterschied zwischen den beiden Simulationen bei COMSOL sehr groß ist. Somit wird ersichtlich, dass die in Abbildung 144 diskutierten Unterschiede nicht auf die Größe der Domain (Übertragung Labor – Feld) zurückzuführen sind, sondern auf vereinfachende Annahmen für die Anwendung des 2D-COMSOL (Vereinfachung der Strömung im Wärmetauscher).

Dieser Vergleich zeigt, dass das 2D-Modell, wenn es nicht angepasst wird, immer ein Worst-Case-Szenario darstellt.

## **9.9 AP 5c: Versuche zum Wärmeübergang Verfüllbaustoff / Baugrund**

Das IGS verfügt über einen Versuchstand, bei dem der Wärmeübergang zwischen einem umströmten Bauteil und einem Aquifer quantitativ untersucht werden kann. Für den Fall, dass die Sondenrohre einseitig an der Bohrlochwandung anliegen, kann es auch im Baugrund zu einem Phasenwechsel flüssig-fest kommen. Durch die Eisbildung in einem durchströmten Aquifer ändern sich die Strömungswege und damit der Wärmeübergang, was letztendlich direkte Auswirkungen auf die abgeführte Wärme / Kälte und damit die Temperaturen im Nahfeld der Erdwärmesonde hat. Um den Effekt der sich verändernden Strömung am Übergang der Erdwärmesonde zum porösen Medium Boden messbar zu machen, wurde der am IGS existierende Versuchstand um die Möglichkeit des Wärmeentzugs ergänzt und ein Indexversuch zum veränderten Wärmeübergang infolge der veränderter Randströmung durchgeführt. Hierzu wurde mit einem Kühlreaktor das durch den Reaktor strömende Fluid soweit abgekühlt, dass ein Phasenwechsel flüssig-fest (gefroren) im Übergangsbereich von der Reaktorwand zum porösen Medium entsteht. Durch die Messung der Oberflächentemperaturen an den Reaktorwänden und die Kenntnis über den aufgeprägten Wärmeentzug ist eine direkte Beschreibung des Wärmeüberganges in einer solchen Situation möglich.

### 9.9.1 Design des Konzepts

In diesem Arbeitspaket setzte das IGS ein Experiment auf, das die Strömung um einen Erdwärmetauscher, der sich in einem Grundwasseraquifer befindet, testet. In diesem Fall wird angenommen, dass die Kühlrohre sich direkt am Rand des Erdwärmetauschers befinden, d.h. die Temperatur dort entspricht der Temperatur in den Kühlrohren.

Das Experiment besteht aus einem Rohr in U-Form (J-Form) auf dem sich an der kurzen Seite ein Reaktor befindet. Das andere Ende ist über ein Rohr mit einem 1000 Liter Tank, der sich oberhalb des Reaktors befindet und den Zufluss zum Experiment regelt, verbunden (Abbildung 146). Das Wasser strömt von dem Tank in das Rohr, der Gravitation folgend. Das überströmte Ende sorgt für eine konstante Potentialdifferenz, die eine konstante Strömungsgeschwindigkeit zur Folge hat.

Überlaufendes Wasser wird in dem sich darunter befindlichen Becken aufgefangen. Aus diesem Becken wird das Wasser mit einer Tauchpumpe in einen Puffertank befördert, welcher das Wasser wiederum in den Zufluss steuernden Tank befördert.

Das Wasser, das den Reaktor durchströmt hat, tritt an der Oberseite wieder aus, wird aufgefangen und über Schläuche einem Durchflussmessgerät zugeführt. Von dort wird es in das Becken abgelassen und wieder in die Tanks gepumpt.

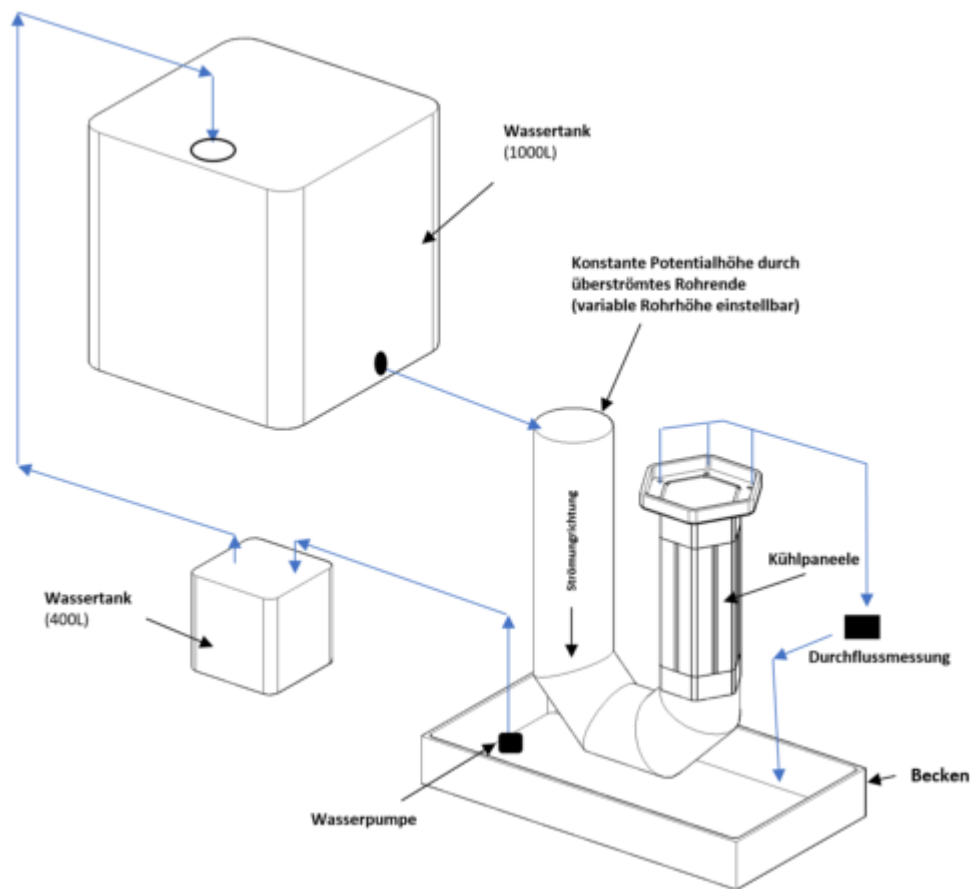


Abbildung 146: Konzept

Der Reaktor besteht aus 12 Kühlpanelen, die alle durch einen Verteiler mit einem Unichiller, der den Zufluss und Abfluss für jedes Panel in separate Rohre aufteilt, verbunden sind. Beim numerischen Test des Paneldesigns wurde eine Strömung von 2 Liter pro Minute bei  $-3\text{ °C}$  für die Kühlflüssigkeit angesetzt und die Randbedingung an der Innenseite des Reaktors wurde mit  $30\text{ °C}$  als Worst-Case-Szenario angenommen. Das Ergebnis war ein Temperaturunterschied zwischen Zufluss und Abfluss von  $0,14\text{ °C}$ , was vernachlässigbar klein ist (Abbildung 147).

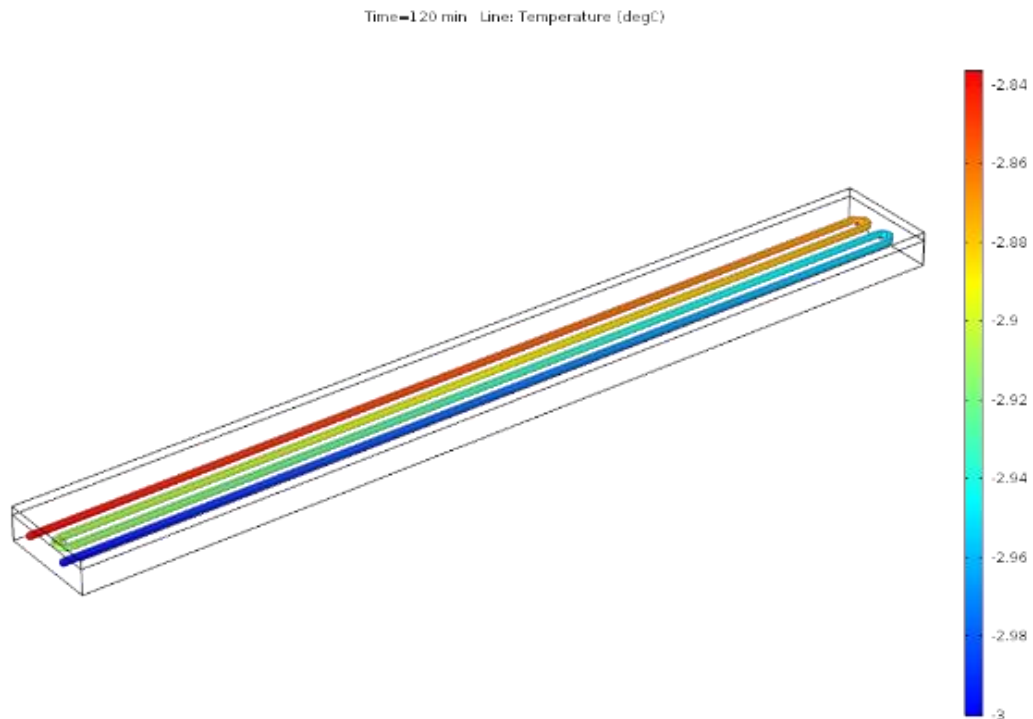


Abbildung 147: Numerische Simulation der Kühlpanele

### 9.9.2 Aufbau des Versuchsstandes

Die Kühlpanele sind aus Aluminium und haben eine Breite von 62 mm und eine Länge von 540 mm. Mit Hilfe einer CNC-Maschine wurden 2 U-förmige Kanäle in die Panele gefräst. Anschließend wurden Plastikpanele aufgeklebt und Zufluss und Abflussadapter in die dafür vorgebohrten Löcher eingesetzt (Abbildung 148).



Abbildung 148: Kühlpanele

Diese Kühlpaneele wurden auf Dichtigkeit geprüft und in der Form eines Hexagons zusammengeklebt (Abbildung 149). Nachdem der Kleber ausgehärtet war, wurde nochmals die Dichtigkeit getestet, bevor der Reaktor in den Versuchsaufbau eingebaut wurde.



Abbildung 149: Zusammenbau der Kühlpaneele

Es wurden 16 Pt1000-Sensoren verwendet um die Temperaturen über die Höhe des Reaktors an drei verschiedenen Seiten zu messen. Die Löcher für die Sensoren wurden vor dem Zusammenbau in die Paneele gebohrt. Auf jeder der drei Seiten befinden sich jeweils fünf Sensoren in einem Abstand von 100 mm, wie in Abbildung 150 dargestellt.

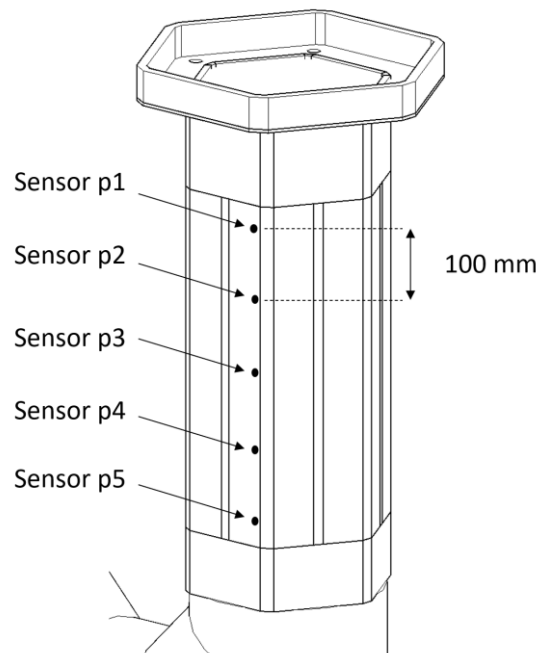


Abbildung 150: Sensorverteilung

Da bei typischem Erdreich die Korngrößenverteilung einen erheblichen Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit und Porosität hat, ist es problematisch diese als Füllmaterial für

den Reaktor zu verwenden. Für das Experiment wurde deshalb auf eine künstliche Rekonstruktion des Erdreichs zurückgegriffen, damit über die gesamte Tiefe die gleiche hydraulische Leitfähigkeit und Porosität angesetzt werden kann.

Innerhalb des Reaktors wurden zur Temperaturmessung Sensorkugeln herangezogen, die den gleichen Durchmesser wie das künstliche Erdreich besitzen. Fünf der Kugeln wurden unten im Reaktor auf der selben Höhe wie Sensornummer 5 in Abbildung 150 und fünf oben im Reaktor (auf Höhe von Sensornummer 1 in Abbildung 150) angeordnet, um die Wassertemperatur beim Abfluss aus dem Reaktor zu ermitteln. Die Sensorkugeln sind in Abbildung 151 dargestellt.

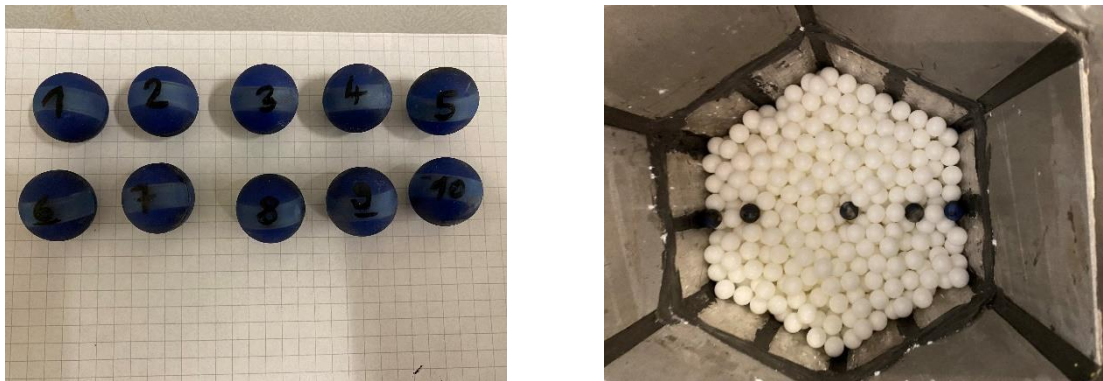


Abbildung 151: Sensorkugeln und künstliches Erdreich

Abbildung 152 zeigt den kompletten Versuchsaufbau, nachdem alle Sensoren installiert wurden.



Abbildung 152: vollständig installiertes Experiment

### 9.9.3 Ergebnisse

Bei dem dreitägigen Experiment wurde das Wärmeträgerfluid auf  $-3\text{ °C}$  abgekühlt und eine Strömungsgeschwindigkeit von  $1,3\text{ m}^3/\text{d}$  eingestellt. Die Wassertemperatur pendelte sich bei etwa  $20\text{ °C}$  ein. Abbildung 153 zeigt den Temperaturverlauf über das Paneel.

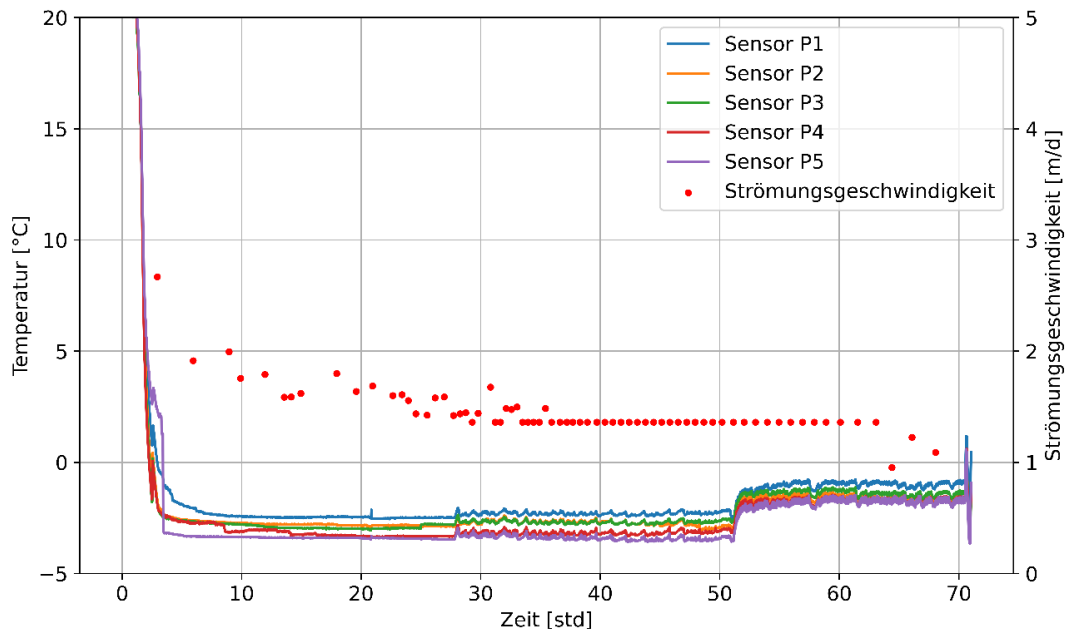


Abbildung 153: Temperaturen der Kühlpaneele

Das thermisch unbeeinflusste Wasser strömt von unten her in den Reaktor ein, die Sensoren am Boden des künstlichen porösen Mediums sollten demzufolge die höchsten Temperaturen messen (Abbildung 154).

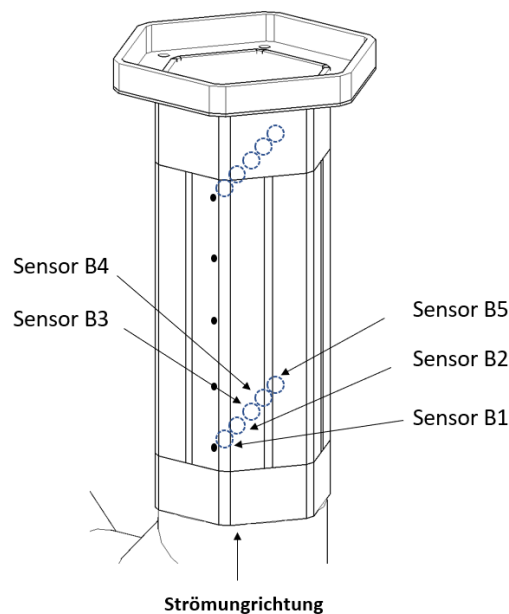


Abbildung 154: Bodensensoren für poröse Medien (unten)

Die energetische Versorgung der Sensoren erfolgt über in die Sensoren integrierten Batterien. Um eine frühzeitige Entladung der Batterien vorzubeugen, wurde für die Temperaturmessungen ein Intervall von 15 min gewählt.

Abbildung 155 zeigt die gemessenen Temperaturen der Sensoren. Die Sensoren B1 und B5 befinden sich beide an den inneren Rändern des Reaktors bzw. nahe an den Paneelen, ihre gemessenen Temperaturen sind dementsprechend sehr ähnlich. Die Sensoren B2 und B4 wurden neben den Sensoren B1 und B5 angeordnet (Abbildung 154), ihre Temperaturen sind dementsprechend ebenfalls sehr ähnlich, der Sensor B3 sitzt in der Mitte und ist daher stärker von der Temperatur des einströmenden Wassers beeinflusst, demzufolge am wärmsten.

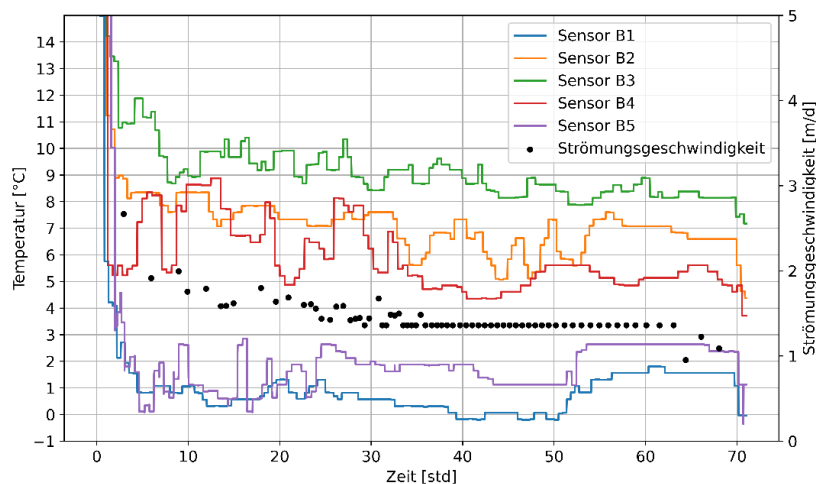


Abbildung 155: Gemessene Temperaturen in porösen Medien

Mit Einsetzen der Kühlung begann die Strömungsgeschwindigkeit in den porösen Medien zu schwanken, mit dem Resultat, dass die Temperaturen in den porösen Medien ebenfalls schwankten. Die von den Sensoren in der Platte gemessenen Temperaturen blieben jedoch weitestgehend konstant (Abbildung 156).

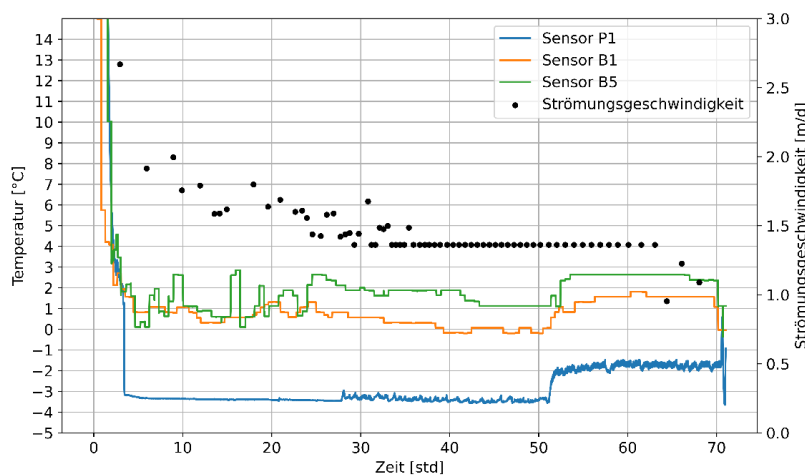


Abbildung 156: Temperatur an den Paneelwänden (unten)



Fünf Sensoren wurden auf dem oberen Rand des porösen Mediums etwa auf der gleichen Höhe wie der in der Platte befindliche Sensor P5 positioniert (Abbildung 157). Die Sensoren B7 und B9-2 waren beschädigt und ihre Daten konnten nicht wiederhergestellt werden.

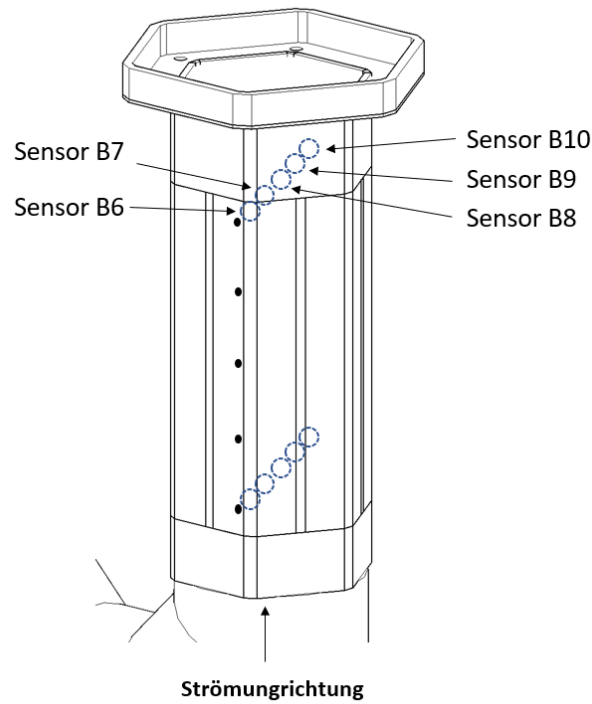


Abbildung 157: Bodensensoren für poröse Medien (oben)

Abbildung 158 zeigt die gemessenen Temperaturen in den Sensoren B6, B8 und B10 und vergleicht die Temperaturen mit dem Temperatur Sensor P5 im Panel.

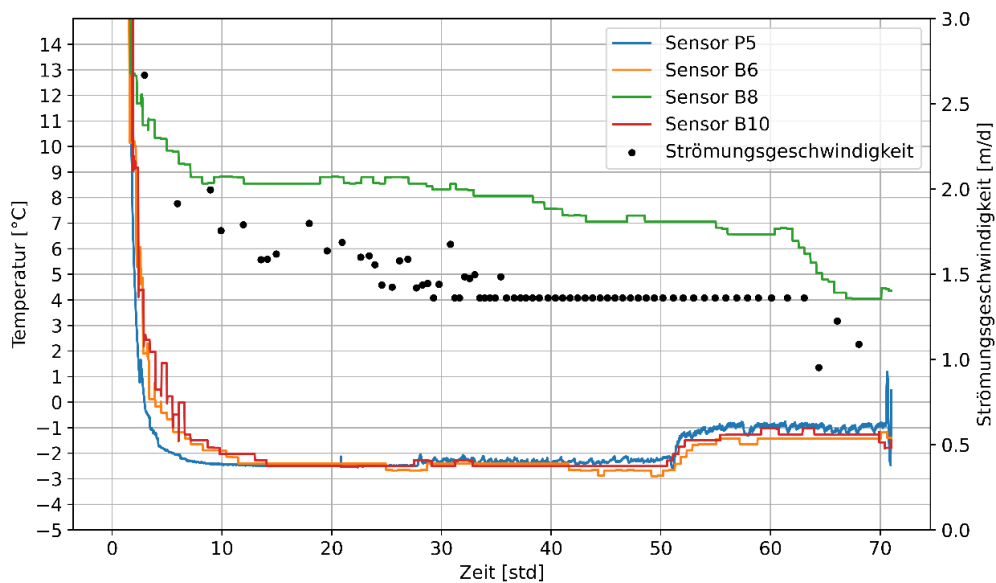


Abbildung 158: Temperatur an den Paneelwänden (oben)

30 Stunden nach Versuchsbeginn bildete sich eine leichte Eisschicht an der Paneelwand im Inneren des Reaktors, nach 50 Stunden bildete sich eine Eisschicht am Ein- und Auslass des Kühlers und am Ein- und Auslass der Paneele sowie an den Rohren und dem Verteiler. Dieser Zustand ließ die Rohre spröde werden und sie drohten zu brechen (Abbildung 159), diesem vorbeugend wurde die Temperatur des Kühlers von  $-3\text{ °C}$  auf  $-1,5\text{ °C}$  angehoben.

Die porösen Medien wurden zu diesem Zeitpunkt visuell inspiziert, ein Einfrieren konnte jedoch nicht festgestellt werden.



Abbildung 159: Frostentwicklung an der Außenseite

In der sechzigsten Stunde wurde trotz der erhöhten Temperatur ein Gefrieren in den porösen Medien festgestellt, worauf die Strömungsgeschwindigkeit zu sinken begann und die Temperatur im Sensor B8 stark fiel, obwohl die Gefrierfront die Mitte des Reaktors nicht erreichte, und die Strömungsgeschwindigkeit nahm trotzdem weiter ab.

Abbildung 160 zeigt einen Vergleich zwischen den Sensoren B3 und B8, die in der Mitte des Reaktors unten bzw. oben angebracht sind.

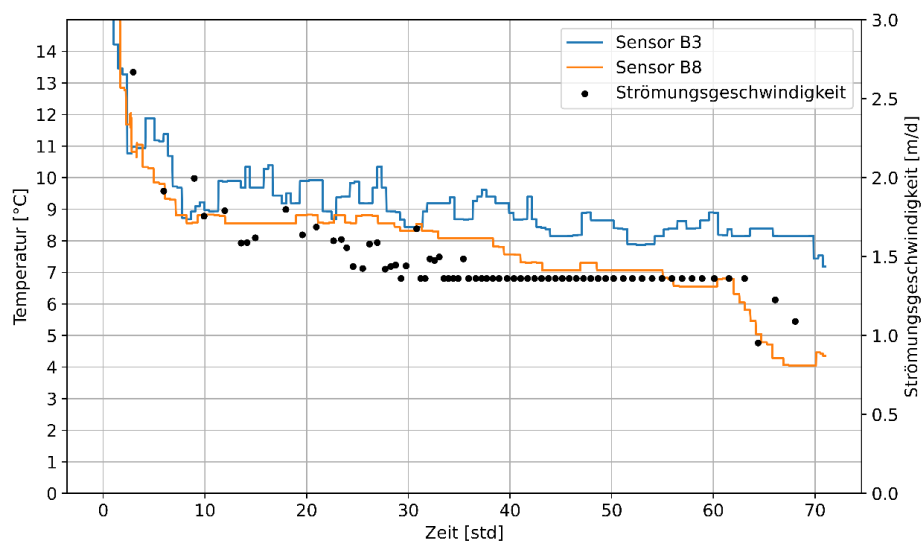


Abbildung 160: Temperaturvergleich zwischen oben und unten

Die ursprüngliche Versuchsplanung sah vor, mit einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/d zu beginnen und den Durchfluss sukzessive zu verringern, bis ein Gefrieren erreicht wurde. Das Gefrieren wurde jedoch bereits bei einer Fließgeschwindigkeit von 1,3 m/d erreicht.

Die Ursache für das Gefrieren in diesem Versuch und nicht in AP 4 sind mannigfaltig:

- 1- In diesem Versuch grenzt der künstliche Boden an eine Kühlplatte, während sie in AP4 durch eine Mörtelschicht getrennt waren, welche den Wärmeübergang reduzieren könnte.
- 2- In AP 4 wurde das Temperaturprogramm oberhalb und unterhalb des Gefrierpunktes durchgeführt, in diesem Versuch hingegen blieben die Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes.
- 3- Die Porosität des künstlichen porösen Mediums ist sehr groß, was theoretisch die Wahrscheinlichkeit des Einfrierens aufgrund der hohen hydraulischen Leitfähigkeit verglichen mit den natürlichen porösen Medien verringert. Andererseits bedeutet dies auch, dass das Wasser in direktem Kontakt mit den Kühlplatten steht was wiederum einen Einfluss auf das Einfrierereignis haben könnte.

Diese Phänomene sollten separat untersucht werden, was jedoch nicht in den Rahmen dieses Arbeitspakets fällt.

### **9.10 AP 6: Detailsimulation zur Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur (Solites)**

Die Simulationen dieses Arbeitspakets betrachten ein Worst-Case-Szenario für das Auftreten von Frostbedingungen im Bohrloch nach einem Dauerbetrieb der EWS über 8 Wochen und ungünstigen Sondenrohrpositionen. Dazu wird anhand der in AP 3b ermittelten Worst-Case-Varianten detailliert untersucht, bis zu welcher minimalen Zulauftemperatur unter Worst-Case-Bedingungen (Dauerbetrieb über 8 Wochen) kein Frost entsteht. Die Zulauftemperatur bezieht sich im Nachfolgenden immer auf die Temperatur des Wärmeträgermediums in den kalten Sondenrohren in der Betrachtungsebene am Sondenkopf. Die Betrachtungstiefe am Sondenkopf wurde gewählt, da dort generell die niedrigsten Temperaturen im EWS-System auftreten (vergl. AP 3a).

Zur Ermittlung der minimalen Zulauftemperatur wurde bei den vorgegebenen Randbedingungen die kalte Eintrittstemperatur der Erdwärmesonde so lange in Schritten von 0,5 K variiert, bis die minimale Eintrittstemperatur ermittelt werden kann, bei der weder im Verfüllmaterial noch im Untergrund die in kleinskaligen Experimenten ermittelten Gefriertemperaturen (s. AP 1) unterschritten werden. Zur Eingrenzung des detailliert in Schritten von 0,1 K zu betrachtenden Bereichs der kalten Eintrittstemperatur, erfolgte zunächst eine Variation der Eintrittstemperatur in Schritten von 0,5 K.

#### **Frostkriterium**

Auf der Basis der Ergebnisse in AP 1 wurde für die Gewährleistung der Eisfreiheit in Verfüllung und Untergrund eine Gefriertemperatur von  $-0,5\text{ °C}$  definiert. Anhand von Abbildung 16 in AP 1 wird dargelegt, dass der Verfüllbaustoff VM3 mit ca.  $-0,5\text{ °C}$  die höchste Gefriertemperatur hat und somit in den kleinskaligen Versuchen das Worst-Case-Szenario darstellt. Die Untersuchungen in AP 1 zeigen, dass bei kleinskaligen zylindrischen Proben aus Verfüllmaterial die erste Nukleation (Entstehung von ersten, einzelnen Eiskristallen) zwar bei einer Temperatur

deutlich niedriger als  $-3\text{ °C}$  erfolgen kann. Im großskaligen Versuch (Erdwärmesondensystem) kann jedoch im Gegensatz dazu die erste Nukleation bereits bei einer höheren Temperatur ausgelöst werden, z.B. wenn die Wärmeträgerflüssigkeit im Rohr eine Temperatur von  $-3\text{ °C}$  hat [33]. Zudem wurde eine Unterscheidung zwischen Nukleation und Gefrieren dargelegt. In den kleinskaligen Versuchen fand ein Gefrieren nur in der Grenzfläche zwischen Baustoff und Außenwand) statt, während Nukleationen im Porenwasser des Verfüllbaustoffs vorkommen sich aber nicht zu einem zusammenhängenden Eiskörper ausbilden können. Grenzflächen (ITZ: interfacial transition zone) treten auch bei Fremdkörpern innerhalb des Verfüllmaterials auf und somit an den Übergängen von PE-Rohren zum Verfüllmaterial. Im Verfüllbaustoff selbst findet bei der Grenztemperatur von  $-0,5\text{ °C}$  keine Durchfrostung statt.

#### 9.10.1 Numerisches Modell:

Arbeitspaket 6 ist eng mit AP 3b verknüpft und basiert direkt auf den dort verwendeten Modellen. Eine detaillierte Betrachtung des Modells ist in der Beschreibung in AP 3b zu finden. Die Untersuchungsergebnisse in AP 3b zeigen, dass die Temperaturen im Untergrund am geringsten sind, wenn die Sondenrohre des Zu- und Rücklaufs weit auseinanderliegen und in direktem Kontakt zur Bohrlochwand stehen – so, wie es in Geometrie c der Fall ist (Abbildung 161: 2D-Simulationsmodelle a und c, die zur Ermittlung der Zulauftemperatur herangezogen werden, bei der eine Frostfreiheit gegeben ist. Abbildung 161. Um den Effekt der Zentrierung in Bezug auf die Untergrundtemperatur bewerten zu können, wird die Variation der Sondenzulauftemperatur zusätzlich mit der Geometrie a durchgeführt, bei der sich die Sondenrohre im Bohrlochmittelpunkt befinden.

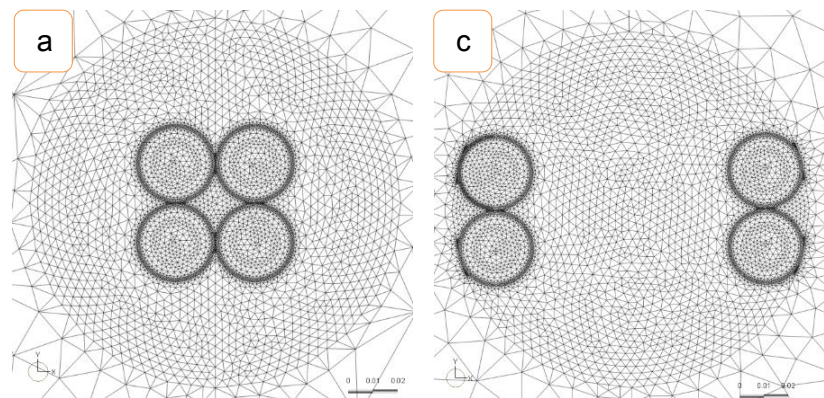


Abbildung 161: 2D-Simulationsmodelle a und c, die zur Ermittlung der Zulauftemperatur herangezogen werden, bei der eine Frostfreiheit gegeben ist.

#### Modellparameter:

Aus AP 3b geht hervor, dass bei einem langen Dauerbetrieb von 8 Wochen die geringsten Untergrundtemperaturen auftreten, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds niedrig ist und gleichzeitig eine hohe Wärmeleitfähigkeit im Verfüllmaterial vorliegt. Dies gilt jedoch nicht im unmittelbaren Nahbereich um die Sondenrohre (Grenzflächen PE zu Verfüllmaterial), dort führt auch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials zu den geringsten Temperaturen. Bei der Variation der Sondeneintrittstemperatur werden daher die folgenden Parameter mit zwei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten im Verfüllmaterial kombiniert:

- Sondenrohranordnung a und c wie in Abbildung 161 dargestellt (Bohrlochdurchmesser: 150 mm)
- 2-U-EWS mit PE-Sondenrohren 32 x 2,9 mm
- Effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds (keine direkte Berücksichtigung von Konvektion): 1 W/(mK)
- Spreizung zwischen Zu- und Rücklauf: 1 K
- Der EWS-Volumenstrom wird so gewählt, dass in den geraden Abschnitten der Sondenrohre eine Reynolds-Zahl von 5.000 vorliegt (s. AP 3)
- Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials: 0,8 und 2 W/(mK)

### 9.10.2 Darstellung der Ergebnisse für Geometrie a:

Die Betrachtung der Temperaturen erfolgt für dieselbe Auswahl an Beobachtungspunkten wie in AP 3b: im Untergrund (UX), im Verfüllmaterial (HX), an der Bohrlochwand (BX) und an den Grenzflächen von PE-Rohren zum Verfüllmaterial (PEX). Die Auswahl der näher betrachteten Beobachtungspunkte ist in Abbildung 162 rot umkreist.

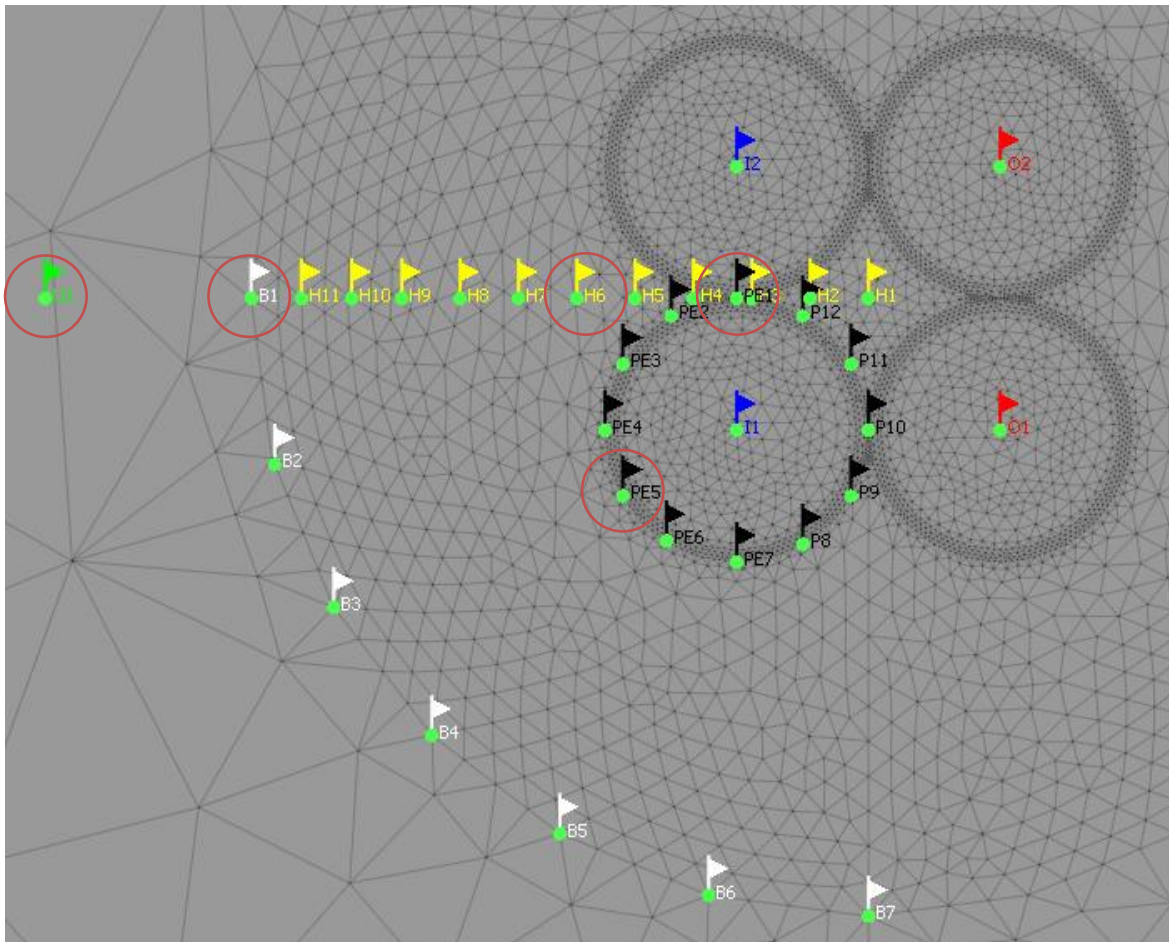


Abbildung 162: Darstellung aller Beobachtungspunkte und Positionen der näher untersuchten Beobachtungspunkte (rot umkreist) in Geometrie a

Abbildung 163 zeigt die Endtemperatur nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauf-temperatur für Geometrie a mit einer Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von 0,8 W/(mK) an den bestimmten Beobachtungspunkten (s. Abbildung 162). Dabei wurden 15 Simulationen

mit einer je um 0,5 K niedrigeren Temperatur durchgeführt, beginnend bei 0 °C. Es zeigt sich, dass sich mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=1$  für alle Beobachtungspunkte ein exakt lineares Verhältnis zwischen Zulauftemperatur und Endtemperatur am Beobachtungspunkt einstellt. Eine weitere Verfeinerung der Temperaturstufen auf 0,1 K ist somit nicht notwendig, da das Erreichen einer beliebigen Endtemperatur an einem bestimmten Beobachtungspunkt bei einer gesuchten Zulauftemperatur algebraisch bestimmt werden kann.

Die niedrigsten Temperaturen treten an der Grenzfläche zwischen Sondenrohren und Verfüllmaterial (Punkte *PE1* bis *PE12*) auf, sowie in den Zwickeln zwischen den Sondenrohren (Punkte *H1* bis *H6*). Der kälteste Punkt befindet sich an der Grenzfläche zwischen den beiden kalten Sondenrohren des Zulaufs (Punkt *PE1*). An diesem Punkt weicht die Temperatur nach 8 Wochen nicht signifikant von der Zulauftemperatur ab. Zur Gewährleistung der Frostfreiheit im Verfüllbaustoff darf die Zulauftemperatur von -0,5 °C deshalb in diesem Worst-Case-Szenario nicht unterschritten werden (vergl. Ergebnisse AP1). Im Bereich der Bohrlochwand (Punkte *B1* bis *B7*) treten die niedrigsten Temperaturen in *B1* auf. Eine Temperatur von -0,5 °C tritt dort bei einer Zulauftemperatur von -3,9 °C auf. Im Untergrund in einer horizontalen Entfernung von 4 cm zum Bohrloch wird die Frostbedingung (-0,5 °C) erst ab einer Zulauftemperatur von kleiner -5,2 °C erreicht. (Punkt *U1*). In Tabelle 28 sind die Zulauftemperaturen für Geometrie *a* und einer Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von 0,8 W/(mK) an allen ausgewählten Beobachtungspunkten aufgelistet, bei denen die -0,5 °C-Grenze erreicht wird.

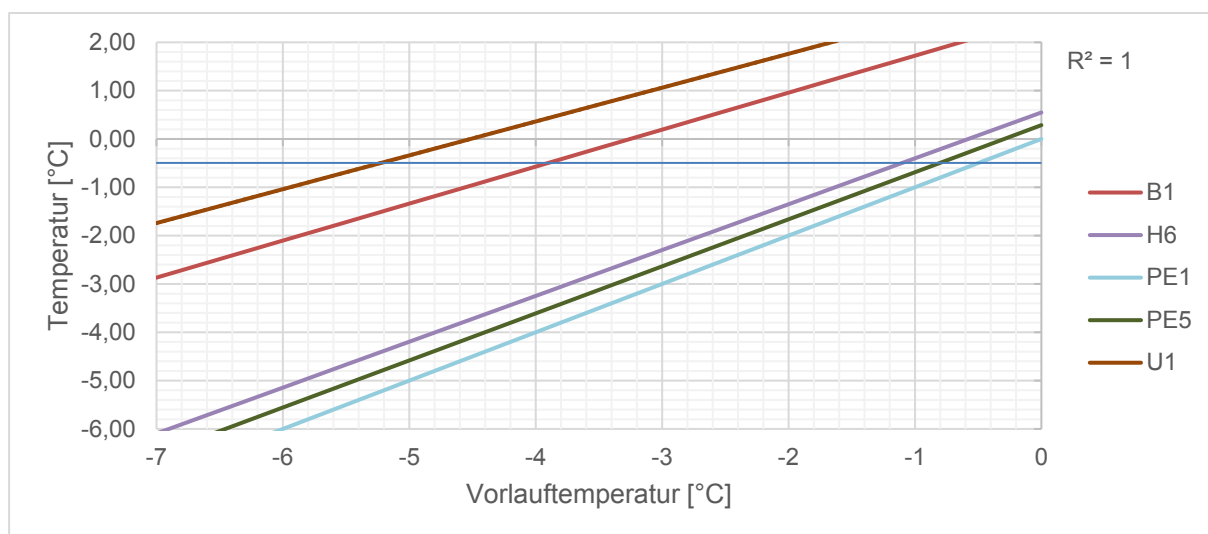


Abbildung 163: Darstellung der Endtemperaturen ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 162) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauftemperatur für Geometrie *a*; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK); blaue Linie = -0,5 °C-Grenze

Tabelle 28: Minimale Zulauftemperaturen an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 162) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Geometrie *a*; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials 0,8 W/(mK)

Beobachtungspunkt	B1	H6	PE1	PE5	U1
T <sub>Zulauf</sub> [°C]	-3,9	-1,1	-0,5	-0,8	-5,2

In Bezug auf die minimalen Temperaturen beim Sondenbetrieb, ist anhand Abbildung 164 und Tabelle 29 festzustellen, dass sich eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von 2,0 W/(mK) positiv auf den sondennahen Bereich auswirkt. An der Grenzfläche von PE-Rohr zum Verfüllmaterial kann die Zulauftemperatur geringfügig (0,04 K) niedriger sein (Punkt *PE5*) als bei der Variante mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit von 0.8 W/mK. Mit zunehmender

Entfernung von den Sondenrohren wird die  $-0,5\text{ °C}$ -Grenze schon bei höheren Zulauftemperaturen erreicht. An der Grenzfläche von Verfüllung zum umgebenden Untergrund (Punkt *B1*) wird die Frosttemperatur bei  $-2,3\text{ °C}$  Zulauftemperatur erreicht und liegt damit ca. 1,6 K höher als bei einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials.

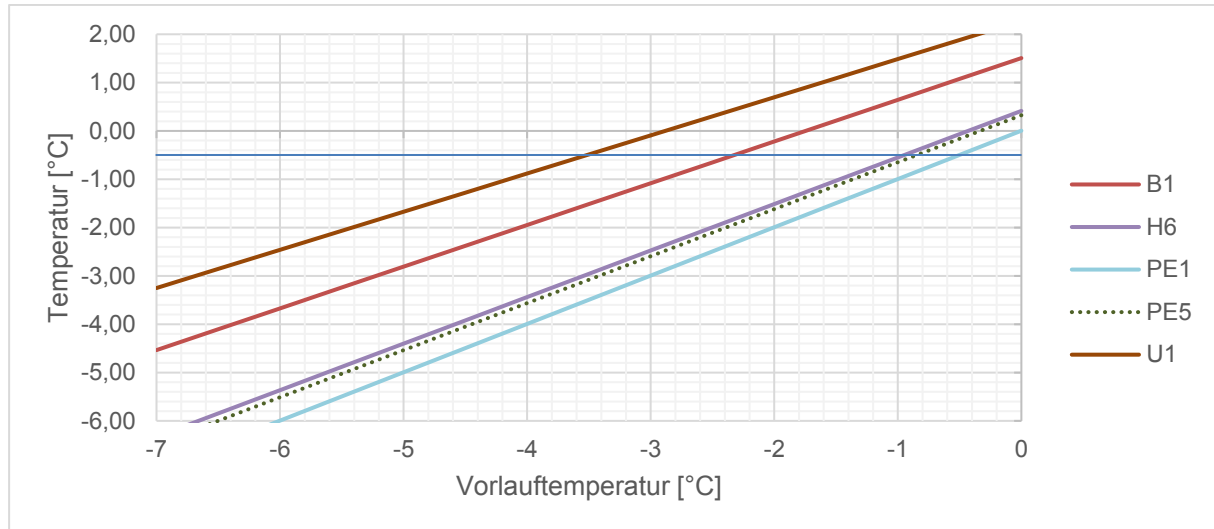


Abbildung 164: Darstellung der Endtemperatur ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 162) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauftemperatur für Geometrie *a*; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials  $2,0\text{ W/(mK)}$ ; blaue Linie =  $-0,5\text{ °C}$ -Grenze

Tabelle 29: Minimale Zulauftemperaturen an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 162) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Geometrie *a*; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials  $2,0\text{ W/(mK)}$

Beobachtungspunkt	B1	H6	PE1	PE5	U1
$T_{\text{Zulauf}} [\text{°C}]$	-2,3	-1,0	-0,5	-0,9	-3,5

### 9.10.3 Darstellung der Ergebnisse für Geometrie *c*:

Für die in Abbildung 161 rechts abgebildete Geometrie *c* mit außenliegenden Sondenrohren unterscheiden sich die minimalen Temperaturen vor allem an der Bohrlochwand und im Untergrund im Vergleich zu einer zentrierten Sonde. Die Positionen der hier gewählten Beobachtungspunkte sind Abbildung 165 zu entnehmen.

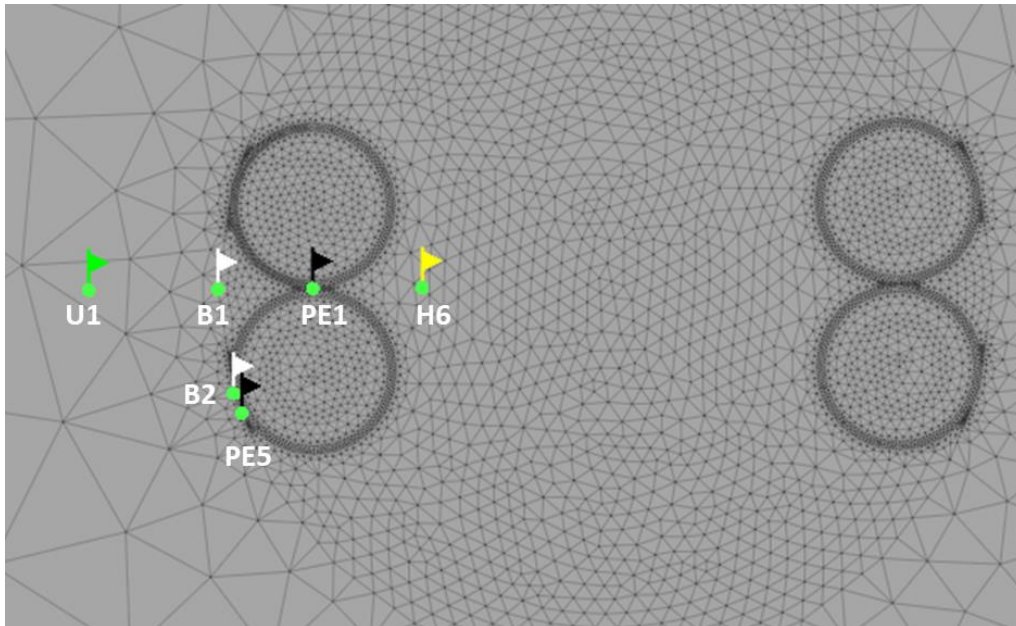


Abbildung 165: Position der im Detail betrachteten Beobachtungspunkte in Geometrie c

Eine Temperatur von  $-0,5\text{ °C}$  wird an *B1* bei einer Zulaufemperatur von  $-1,1\text{ °C}$  erreicht. Im Untergrund in einer horizontalen Entfernung von 4 cm zum Bohrloch wird das Frostkriterium ab einer Zulaufemperatur von kleiner  $-2,4\text{ °C}$  erreicht und somit ca. 2,9 K früher als bei Geometrie *a*. Auch bei Geometrie *c* unterscheidet sich die Temperatur an dem Kontakt der beiden Sondenvorläufe (Punkt *PE1*) nicht signifikant von der Fluidtemperatur des Zulaufs.

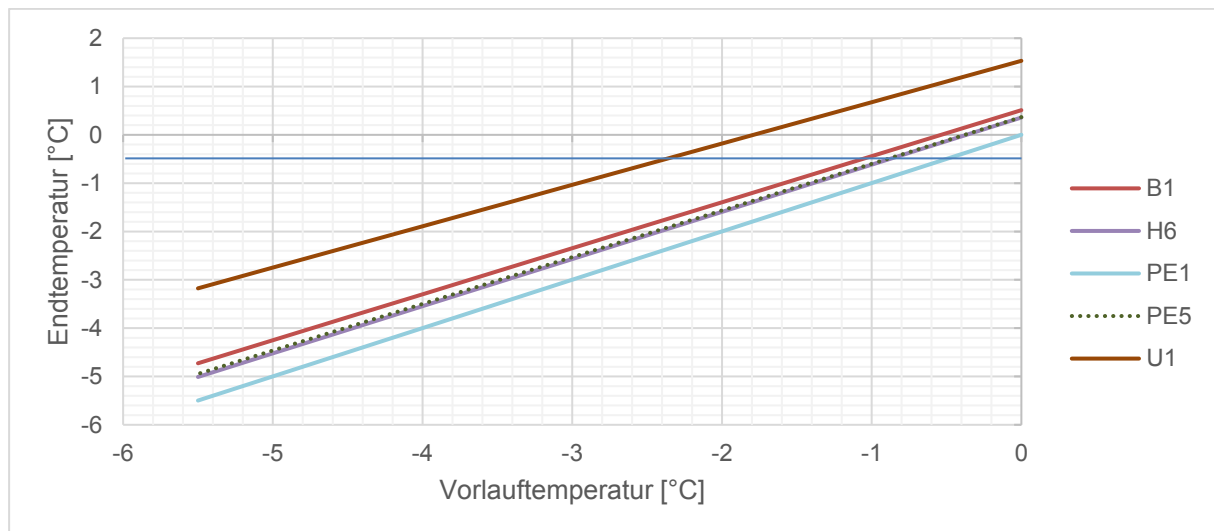


Abbildung 166: Darstellung der Endtemperatur ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 165) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulaufemperatur für Geometrie *c*, Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials  $0,8\text{ W/(mK)}$ ; blaue Linie =  $-0,5\text{ °C}$ -Grenze

Tabelle 30: Minimale Zulaufemperaturen in Geometrie *c* an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 165) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Geometrie *c*; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials  $0,8\text{ W/(mK)}$

Beobachtungspunkt	B1	H6	PE1	PE5	U1
$T_{\text{Zulauf}}\text{ [°C]}$	-1,1	-0,9	-0,5	-0,9	-2,4



Bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von  $2,0 \text{ W/(mK)}$  muss die Zulauf­temperatur am restriktivsten gehandhabt werden. Bis auf Punkt *PE1* sind an allen vorhandenen Beobachtungspunkten die Zulauf­temperaturen am höchsten, bei denen die Frostgrenze erreicht wird (Abbildung 167 und Tabelle 31).

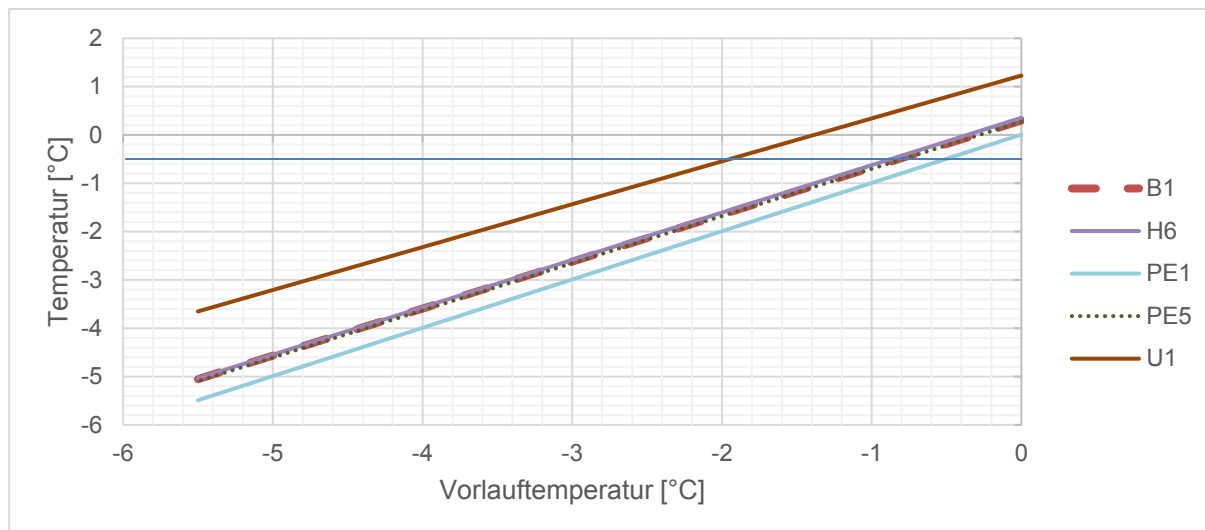


Abbildung 167: Darstellung der Endtemperatur ausgewählter Beobachtungspunkte (siehe Abbildung 165) nach 8 Wochen Dauerbetrieb mit konstanter Zulauf­temperatur für Geometrie *c*, Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials  $2,0 \text{ W/(mK)}$ ; blaue Linie =  $-0,5 \text{ °C}$ -Grenze

Tabelle 31: Minimale Zulauf­temperaturen in Geometrie *c* an ausgewählten Beobachtungspunkten (siehe Abbildung 165) für Frostfreiheit nach 8 Wochen Dauerbetrieb; Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials  $2,0 \text{ W/(mK)}$

Beobachtungspunkt	B1	H6	PE1	PE5	U1
$T_{\text{Zulauf}} [\text{°C}]$	-0,82	-0,87	-0,51	-0,79	-1,95

#### 9.10.4 Zusammenfassung

Die Simulationen dieses Arbeitspakets betrachten ein Worst-Case-Szenario für das Auftreten von Frostbedingungen im Bohrloch nach einem Dauerbetrieb der EWS über 8 Wochen und ungünstigen Sondenrohrpositionen. Hierbei wird als Grenztemperatur für eine Frostgefahr  $-0,5 \text{ °C}$  angesetzt, die sich aus den kleinskaligen Versuchen des AP1 ergab. Diese ist laut AP 1 nicht direkt auf die Gegebenheiten einer realen EWS übertragbar, denn je nach Rahmenbedingung kann Frost erst bei deutlich niedrigeren Temperaturen auftreten (z.B.  $-3 \text{ °C}$  oder tiefer). Im Verfüllbaustoff selbst findet bei der Grenztemperatur von  $-0,5 \text{ °C}$  keine Durchfrostung statt. An den Grenzflächen (ITZ) kann dabei jedoch Frost auftreten. Daher wird im Worst-Case-Szenario diese Grenztemperatur von  $-0,5 \text{ °C}$  verwendet.

Die Temperatur an der Kontaktlinie der beiden Zulaufrohre entspricht ohne signifikante Abweichung der Zulauf­temperatur des Wärmeträgerfluides. Bei dem angenommenen extremen Dauerbetrieb der EWS und der Frostgrenztemperatur von  $-0,5 \text{ °C}$  darf eine Zulauf­temperatur von  $-0,5 \text{ °C}$  nicht unterschritten werden. Haben die Sondenrohre des Zulaufs Kontakt zur Bohrlochwand, darf eine Zulauf­temperatur von  $-0,8 \text{ °C}$  nicht unterschritten werden, wenn das Frostkriterium an der Bohrlochwand nicht unterschritten werden soll. Die Zulauf­temperatur kann deutlich reduziert werden, wenn sich die Sondenrohre zentriert im Bohrloch befinden und die

Temperatur an der Bohrlochwand als Grenzkriterium betrachtet wird. In diesem Fall ist ein Betrieb mit einer Zulauftemperatur von  $-2,3\text{ °C}$  möglich. Wird diese Konstellation mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit ( $0,8\text{ W/(mK)}$ ) des Verfüllbaustoffs kombiniert, ist eine Zulauftemperatur von  $-3,9\text{ °C}$  anwendbar.

### 9.11 AP 7a: Numerische Untersuchung verschiedener Szenarien (Solites)

Bei den in AP 6 durchgeführten Detailuntersuchungen zur Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur wurden ausschließlich Worst-Case-Szenarien mit sehr langem Dauerbetrieb von 8 Wochen betrachtet. Deren Eintreten in der Realität ist eher unwahrscheinlich. Beispielsweise führt eine in der Praxis übliche Taktung von Wärmepumpenanlagen gegenüber dem betrachteten Dauerbetrieb zu einer verstärkten Regeneration des Untergrunds. Folglich ist damit zu rechnen, dass in der Praxis in der überwiegenden Zahl der Fälle auch mit geringeren Zulauftemperaturen, als der in AP 6 ermittelten minimal zulässigen Zulauftemperatur, eine Frostfreiheit des Verfüllmaterials und des Untergrunds gegeben ist.

In diesem Arbeitspunkt wird daher auf der Basis der numerischen Simulationen aus AP 3b bzw. AP 6 analysiert, inwiefern die minimal zulässige Zulauftemperatur reduziert werden kann, wenn an Stelle eines achtwöchigen Dauerbetriebs ein Taktbetrieb der Wärmepumpenanlage angenommen wird.

#### Vorgehen:

Die Abbildung des Taktbetriebs der Wärmepumpe erfolgt mit Hilfe von vereinfachten Lastfällen. Anstelle eines permanenten Dauerbetriebs über 8 Wochen wird die Dauer des ununterbrochenen Wärmepumpenbetriebs auf eine bestimmte, gleichbleibende Maximaldauer pro Tag begrenzt und die Wärmepumpe für die restlichen Stunden des Tages abgeschaltet. Analog zu der in der VDI 4640 Blatt 2 aufgeführten Dauer der Maximalleistung bei unterschiedlichen Jahresvolllaststunden (Tabelle 6 in [39]) werden die zwei Lastszenarien laut Tabelle 32 verwendet.

Tabelle 32: Dauer des täglichen Wärmepumpenbetriebs ohne Unterbrechung bei unterschiedlichen Jahresvolllaststunden; Auszug aus VDI 4640 Blatt 2 Tabelle 6 [39]

Jahresvolllaststunden [h/a]	Dauerbetrieb pro Tag [h]
1200	5
2400	18

Grundlage für die Ermittlung der minimal zulässigen Zulauftemperatur des Wärmeträgermediums bilden die Temperaturen am Ende der Betriebsphase des letzten Tages des achtwöchigen Betrachtungszeitraums.

#### Ergebnis:

Die Ermittlung der minimalen Zulauftemperatur des Wärmeträgermediums erfolgt auf Grundlage des in AP 6 definierten Frostkriteriums mit einer Temperatur von  $-0,5\text{ °C}$  im Verfüllbaustoff und im geologischen Untergrund. Dies gilt auch in den Grenzschichten (ITZ) zwischen Sondenrohren und Verfüllbaustoff bzw. diesem und umliegender Geologie. Tabelle 33 zeigt die

Zulauftemperaturen, welche am Ende des achtwöchigen Betrachtungszeitraums zum Erreichen des Frostkriteriums an den jeweiligen Beobachtungspunkten B1 und PE1 bei zentrierten Sondenrohren führen (Geometrie a, s. AP 6 Abbildung 162). Der Beobachtungspunkt PE1 repräsentiert die Stelle, an der generell die niedrigste Temperatur im gesamten Modell außerhalb der Sondenrohre auftritt. Dort unterscheidet sich die Temperatur der Grenzschicht nicht maßgeblich von der Zulaufemperatur des Wärmeträgermediums. Um eine Frostfreiheit zu gewährleisten, darf die Zulaufemperatur des Wärmeträgermediums daher eine Temperatur von  $-0,5\text{ °C}$  nicht erreichen. Dies gilt sowohl für einen durchgängigen Dauerbetrieb der Wärmepumpe als auch für die dargestellten Taktbetriebe von 5 h und 18 h pro Tag unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes.

Zum Vermeiden des Frostkriteriums in der Grenzfläche zwischen Verfüllbaustoff und umliegender Geologie dürfen wesentlich niedrigere Zulauftemperaturen des Wärmeträgermediums erreicht werden. Im Falle einer zentrierten Anordnung der Sonden im Bohrloch, wie bei Geometrie a, wirkt sich die Art des Taktbetriebs merklich auf die Temperaturen in der Grenzfläche zwischen Verfüllbaustoff und umliegender Geologie aus. So liegt die minimal erlaubte Zulaufemperatur an Beobachtungspunkt B1 bei einem Betrieb von 18 h pro Tag mit  $-2,5\text{ °C}$  0,9 K höher als bei einem Betrieb von 5 h pro Tag, wenn eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials vorliegt.

Tabelle 33: Darstellung der Zulaufemperatur bei Erreichen des Frostkriteriums ( $-0,5\text{ °C}$ ) am Ende des Betrachtungszeitraums für die Sondengeometrie a; (\*Ein Dauerbetrieb von 24 h pro Tag entspricht dem Dauerlastszenario aus AP 6); Beobachtungspunkte siehe Grafiken in AP 6.

Sondengeometrie	Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes [W/(mK)]	Dauerbetrieb pro Tag [h]	Zulaufemperatur, die zum Erreichen des Frostkriteriums ( $-0,5\text{ °C}$ ) am Beobachtungspunkt führt [°C]	
			B1	PE1
a (zentriert)	0,8	24*	-3,9	-0,5
a (zentriert)	0,8	18	-4,2	-0,5
a (zentriert)	0,8	5	-6,0	-0,5
a (zentriert)	2	24*	-2,3	-0,5
a (zentriert)	2	18	-2,5	-0,5
a (zentriert)	2	5	-3,6	-0,5

Tabelle 34 zeigt die Zulauftemperaturen, welche am Ende des achtwöchigen Betrachtungszeitraums zum Erreichen des Frostkriteriums an den jeweiligen Beobachtungspunkten B1 und PE1 führen. Bei der Sondengeometrie handelt es sich dabei um an der Bohrlochwand anliegende Sondenrohre (Geometrie c, s. AP 6 Abbildung 165).

Durch die an der Bohrlochwand anliegenden Sondenrohre treten die niedrigsten Temperaturen am Beobachtungspunkt B2 auf, der Grenzfläche des kalten Sondenrohres zur umliegenden Geologie. Um das Gefrieren in dieser Grenzfläche zu vermeiden, darf die Zulaufemperatur des Wärmeträgermediums  $-0,8\text{ °C}$  nicht unterschreiten. Bemerkenswert ist, dass für einen täglich 5-stündigen Betrieb die minimale Zulaufemperatur lediglich 0,2 K tiefer als bei permanentem Dauerbetrieb liegt, wenn der Verfüllbaustoff eine Wärmeleitfähigkeit von nur 0,8 W/(mK) hat.

Tabelle 34: Darstellung der Zulaufemperatur bei Erreichen des Frostkriteriums ( $-0,5\text{ °C}$ ) am Ende des Betrachtungszeitraums für die Sondengeometrie c; (\*Ein Dauerbetrieb von 24 h pro Tag entspricht dem Dauerlastszenario aus AP 6); Beobachtungspunkte siehe Grafiken in AP 6.

Sondengeometrie	Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes [W/(mK)]	Dauerbetrieb pro Tag [h]	Zulauftemperatur bei Erreichen des Frostkriteriums (-0,5 °C) am Ende des Betrachtungszeitraums [°C]	
			B2	PE1
c (außenliegend)	0,8	24*	-0,9	-0,5
c (außenliegend)	0,8	18	-0,9	-0,5
c (außenliegend)	0,8	5	-1,2	-0,5
c (außenliegend)	2	24*	-0,8	-0,5
c (außenliegend)	2	18	-0,8	-0,5
c (außenliegend)	2	5	-1,0	-0,5

### Zusammenfassung

Auf Basis der Simulationen unterschiedlicher Bohrlochgeometrien bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Verfüllbaustoffes und variierender Betriebszeiten der Wärmepumpe wurden die minimal zulässigen Zulauftemperaturen in die Erdwärmesonde betrachtet, die gerade das vorab definierte Frostkriterium (minimal -0,5 °C) erreichen. Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden:

Die niedrigsten Temperaturen treten an der Grenzfläche der kalten Sondenrohre des Zulaufs zum Verfüllbaustoff auf. Im speziellen gilt dies nahe der Kontaktfläche zwischen den beiden kalten Sondenrohren selbst. Die niedrigsten auftretenden Temperaturen außerhalb der Sondenrohre unterscheiden sich dabei nicht merklich von denen des Wärmeträgermediums. Somit darf die minimale Zulauftemperatur des Wärmeträgermediums die des Frostkriteriums – in diesem Fall -0,5 °C – nicht unterschreiten. Im Vergleich zum im vorhergehenden Kapitel betrachteten Dauerbetrieb kann die minimale Zulauftemperatur für diesen Betrachtungspunkt nicht reduziert werden.

Für das Nahfeld um die kalten Sondenrohre herum wirkt sich die Taktung der Wärmepumpe bzw. die Dauer des täglichen Wärmepumpenbetriebs kaum auf die im Hinterfüllmaterial auftretenden Minimaltemperaturen aus. Wenn die kalten Sondenrohre an der Bohrlochwand anliegen, kann die Zulauftemperatur im Vergleich zum permanenten Dauerbetrieb um 0,2 K reduziert werden, wenn eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials (2,0 W/(mK)) vorliegt und die Wärmepumpe täglich nur 5 h in Betrieb ist. Bei niedriger Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials (0,8 W/(mK)) ist eine Reduzierung um 0,3 K möglich.

Wird sichergestellt, dass die Sondenrohre nicht direkt an der Bohrlochwand anliegen, sondern zentriert eingebaut sind, zeigen die Betrachtungen der Sondengeometrie a, dass die minimale Zulauftemperatur deutlich reduziert werden kann auf Temperaturen zwischen -2,5 und -6,0 °C, je nach Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes und der Betriebszeit der Wärmepumpe.

### 9.12 AP 7b: 3D THM-Simulation ausgesuchter Realszenarien (IGS)

Im Rahmen des AP 7b wurden zwei dreidimensionale, thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen einer Erdwärmesonde mit realen Randbedingungen (Tiefe ~ 99 m) für ausgewählte Lastszenarien sowie geotechnische und hydrogeologische Randbedingungen durchgeführt. Diese Simulationen erlauben eine physikalisch und mechanisch zutreffende Abbildung aller wesentlichen Vorgänge (Spannungszunahme über die Tiefe, Dichteströmungen entlang der Erdwärmesonde) unter physikalisch und mechanisch zutreffender Simulation der

im porösen Medium Boden ggf. auftretenden temperaturinduzierten Dichteströmungen, der Phasenwechsel im Aquifer und im Verfüllmaterial (vgl. AP 2) sowie der temperaturinduzierten mechanischen Beanspruchungen des Verfüllbaustoffes. Die Lastszenarien wurden in Abstimmung mit AP 7a gewählt.

Zudem sollte der Einfluss einer Grundwasserströmung unter Variation der Strömungsgeschwindigkeit, der Aquifermächtigkeit und der Aquifertiefenlage untersucht werden.

Die Berechnungen ermöglichen somit auch eine Validierung der Berechnungsergebnisse des AP 7a. Ziel dieser Validierung ist die Überprüfung der in den vereinfachten Berechnungen implementierten Ansätze des Phasenwechsels sowie des Schädigungspotentials. Erforderlichenfalls können die Berechnungsergebnisse des AP 7a an die Berechnungsergebnisse AP 7b angepasst werden.

### 9.12.1 Numerisches Modell

Das numerische Modell in diesem Arbeitspaket verwendet die Module für Wärmeübertragung, Rohrströmung, Phasenwechsel und mechanische Spannungen des numerischen Simulationsprogramm COMSOL, die bereits zuvor in AP5b verwendet wurden. Darüber hinaus verwendet dieses Modell auch die Darcy-Strömung, um die Grundwasserströmung in den porösen Medien zu simulieren.

Die Validation des Darcy-Durchflussmoduls erfolgte anhand eines in der Dissertation von Baier [40] aufgestellten und validierten Randwertproblem. Diese Case Study besteht aus Kühllanlagen, mit denen ein Stützgewölbe für einen Tunnelvortrieb aufgefroren wird. Eine von links nach rechts orientierte Grundwasserströmung beeinflusst die Frostkörperbildung (Abbildung 168).

Die vom IGS ermittelten Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen von Baier [40] gut überein. Abbildung 168 zeigt die beiden Modelle für eine Situation 10 Tage nach Beginn des Aufgefrierens bei einer Grundwasserströmungsgeschwindigkeit von 0,75 m/d.

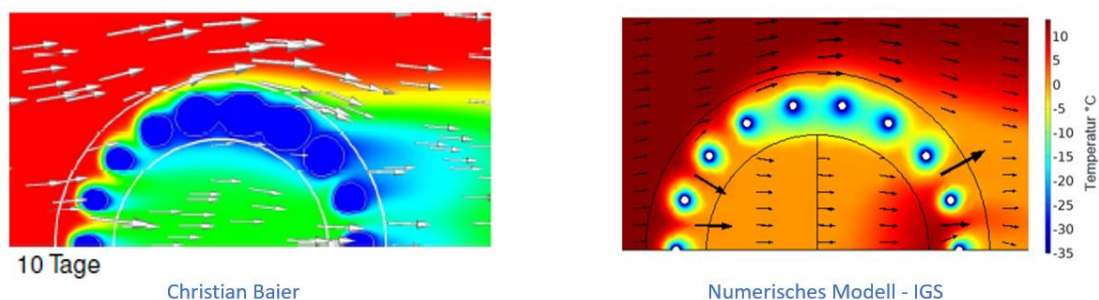


Abbildung 168: Validierungsergebnisse für eine 10-tägige Gefrierentwicklung unter Einfluss einer Grundwasserströmung

Das vom IGS entwickelte gekoppelte 3D-Modell stellt ein realistisches Szenario ähnlich der Geometrie 3 aus AP5b dar. Die Abbildung 169 zeigt die gewählte geometrische Anordnung im

Grundriss, die ein Worst-Case-Szenario darstellt, da die Rohrkonfiguration mit den Kühlrohren am Rande des Verfüllmaterials liegen und so eher zu einem Gefrierprozess führen.

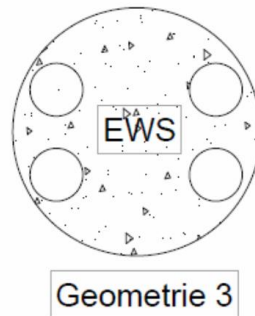


Abbildung 169: Rohrkonfiguration

Das Modell besteht aus 3 Bodenschichten, die dieselbe horizontale Ausdehnung besitzen, aber bezüglich der Schichtdicke variieren. Die unterste Schicht besteht aus Sand und hat eine Höhe von 40 m, gefolgt von einer 20 m hohen Tonschicht und einer 39 m hohen Sandschicht (s. Abbildung 170)

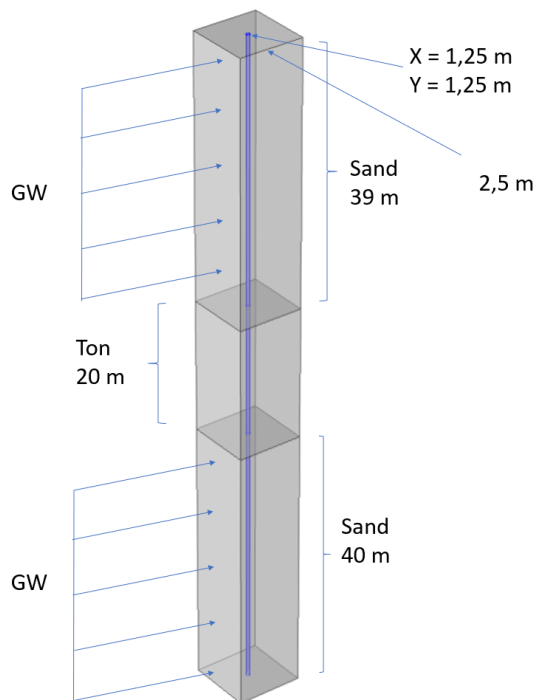


Abbildung 170: Modellgeometrie (mit Grundwasserströmung)

Tabelle 35 zeigt die in diesem Modell verwendeten Parameter für poröse Medien:

Tabelle 35: Materialparameter

Sand	Dichte	2050 [kg/m <sup>3</sup> ]
------	--------	---------------------------

	Wärmeleitfähigkeit	2.4 [W/(mK)]
Ton	Dichte	2500 [kg/m <sup>3</sup> ]
	Wärmeleitfähigkeit	2.8[W/(mK)]

### 9.12.2 Ergebnisse des numerischen Modells

Die Simulationen bilden 3.600 Betriebsstunden (5 Monate) ab. Das Temperaturprofil für die Kühlpumpen wurde einem realen Erdwärmesondenprojekt entnommen, bei dem die Temperaturen aber nicht auf -3 °C sanken, weshalb diese mittels einer Sinusfunktion modifiziert und erweitert wurden, sodass die Temperatur auf die gewünschte Temperatur von -3 °C sinkt

Bei der verwendeten Sinusfunktion stellt die x-Variable die Zeit in Minuten und y(x) die Temperatur in Grad Celsius dar. :

$$y(x) = 5 \cdot \sin(0.004255(x - 1110)) + 2$$

Abbildung 171 zeigt das resultierende Temperaturprofil für die ersten 72 Stunden des Betriebs.

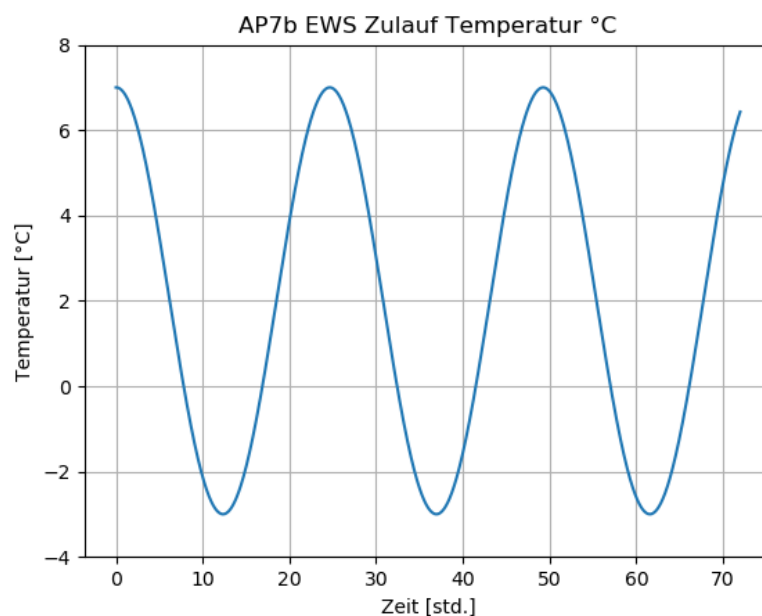


Abbildung 171: Zulauftemperatur der Erdwärmesonde [°C]

Die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers in den beiden Sand-Aquifern wurde zwischen  $v = 0,1$  m/d und  $1,0$  m/d variiert. Zusätzlich wurde eine Variante ohne Grundwassereinfluss untersucht. Die Ergebnisse werden nachfolgend dokumentiert.

#### Model 1 ( $v = 0,1$ m/d)

Das Modell zeigt, dass die Vorlauftemperaturen in den Erdwärmesonden zwar bis auf -3 °C sinken, die Temperatur im Erdreich um die Erdwärmesonde herum jedoch nicht unter den Gefrierpunkt sinkt, allerdings wurde festgestellt, dass die Temperaturen im Erdreich mit jedem Kühlzyklus abnehmen.

Abbildung 172 zeigt die minimale Temperatur im Erdreich im Umkreis der Erdwärmesonde, welche in der Simulation numerisch ermittelt wurden. Die minimale Temperatur im Boden tritt stets an dem Übergang Bohrlochverfüllung / Boden auf jedoch variiert die Tiefe, in der die minimale Temperatur auftritt über die Simulationsdauer. Die Temperatur beginnt zu sinken, bis sie nach 1500 Betriebsstunden ein Plateau zwischen 0°C and 5,5°C erreicht.

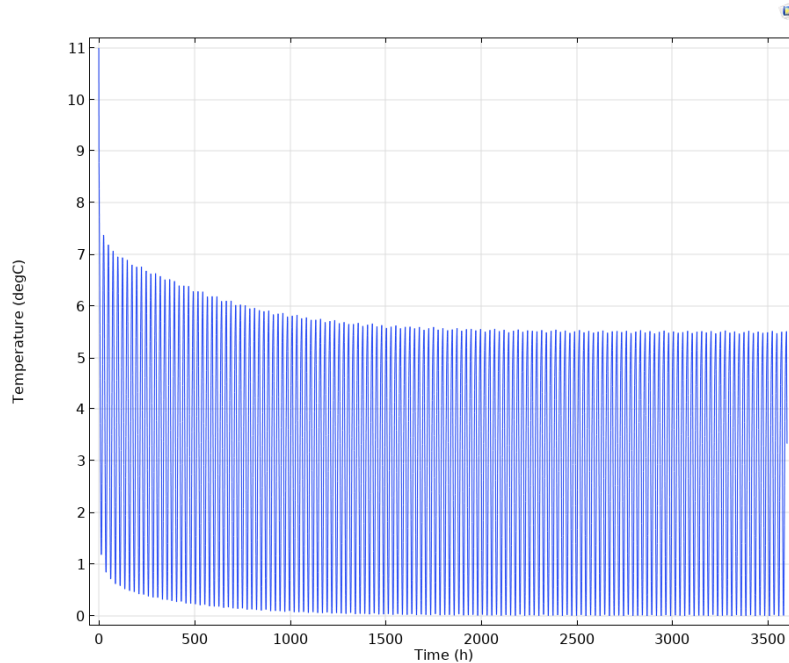


Abbildung 172: Geringste Temperatur, die im gesamten Bodenmodell zur jeweiligen Stunde gemessen wurde (Model 1)

Der Grundwasserstrom trägt auch zur Abkühlung des Bereichs hinter der Erdwärmesonde bei, was zu Effizienzproblemen führen kann, wenn weitere Erdwärmesonden nachgeschaltet sind. Abbildung 173 zeigt die Temperaturverteilung in einem horizontalen Schnitt im Sand und den Verlauf des Grundwassers in einer Tiefe von 20 m nach 62 Stunden, dem dritten Abkühlungszyklus im Modell, während Abbildung 174 die Temperaturverteilung im Boden in derselben Tiefe von 20 m zum Zeitpunkt nach 3557 Stunden zeigt, dem vorletzten Zyklus im Modell.



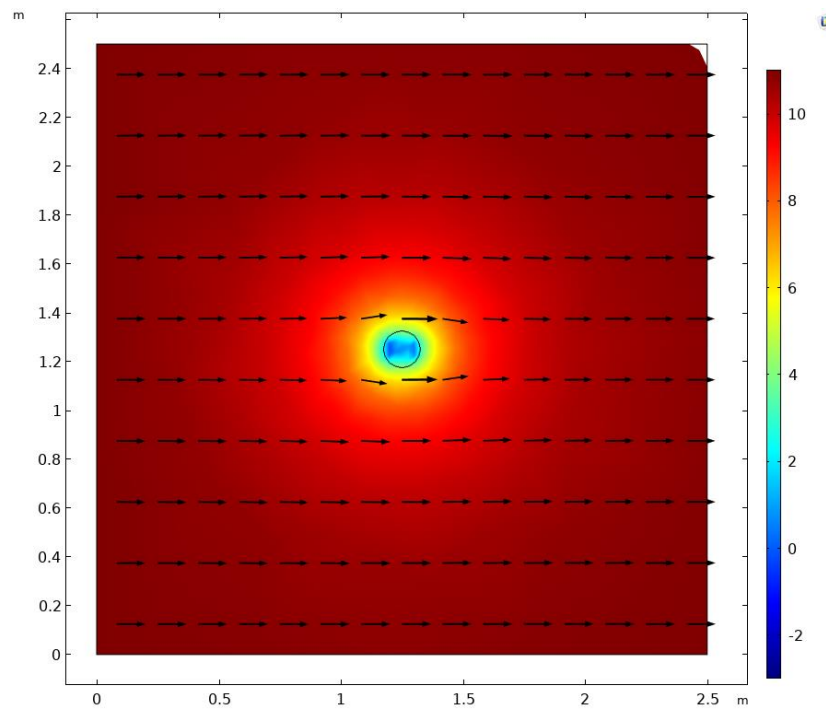


Abbildung 173: Temperaturverteilung bei Zeitindex 62 Stunden (20m)

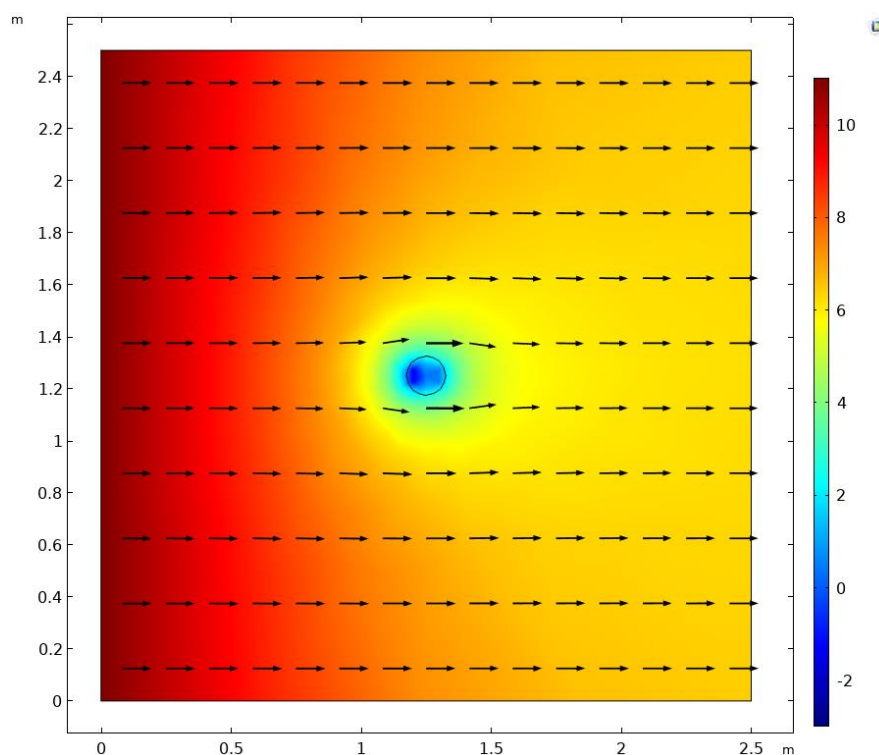


Abbildung 174: Temperaturverteilung bei Zeitindex 3557 Stunden (20m)

Die Abbildung 175 und Abbildung 176 zeigen die Temperaturverteilung in 50 m Tiefe (Ton-schicht) und in 80 m Tiefe (unterste Sandschicht) zum Zeitpunkt nach 3557 Stunden; in keiner dieser Schichten findet ein Phasenwechsel statt.

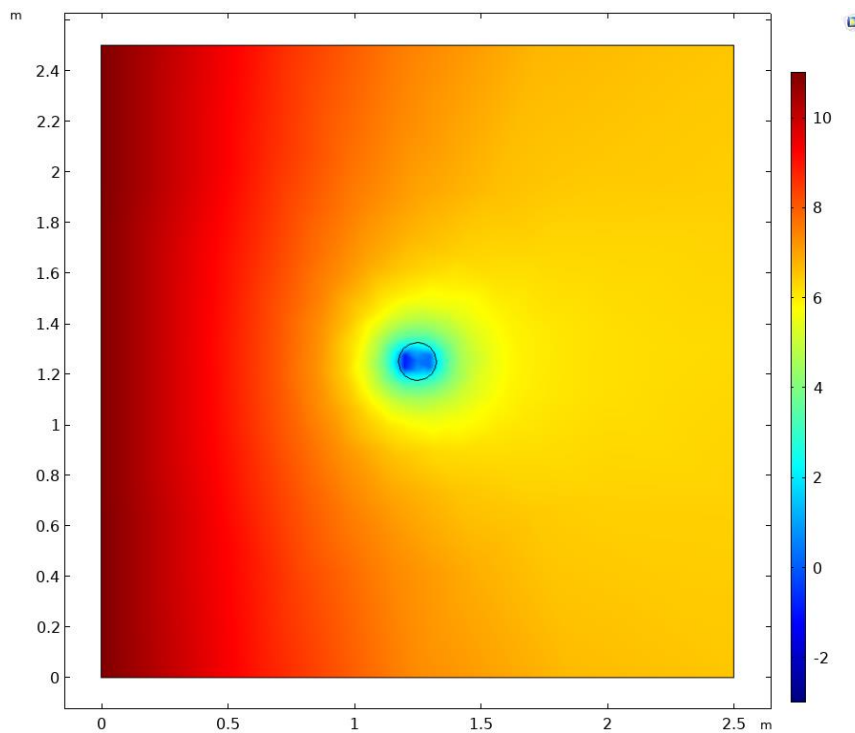


Abbildung 175: Temperaturverteilung bei Zeitindex 3557 Stunden (50m)

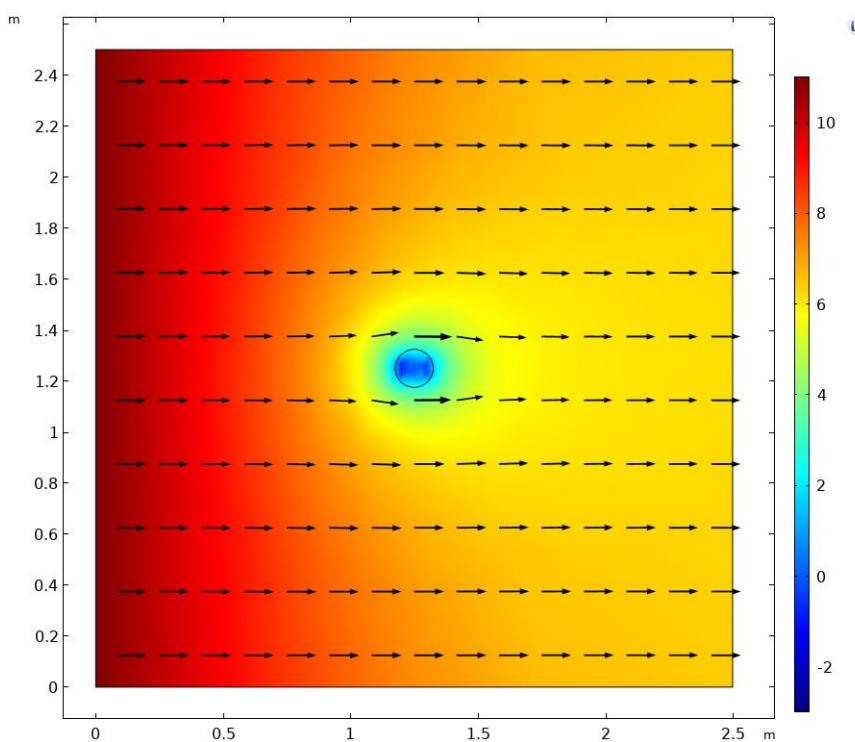


Abbildung 176: Temperaturverteilung bei Zeitindex 3557 Stunden (80m)

Während die Bodentemperaturen nicht unter den Gefrierpunkt sinken, waren im Verfüllmaterial Temperaturen unter dem Gefrierpunkt vorhanden. Aufgrund der bereits in AP2 erwähnten Super-Cooling Phänomene konnte mit dem Modell jedoch nicht zuverlässig überprüft werden, ob eine Phasenänderung im Material stattfindet.

Abbildung 177 zeigt die Temperaturen im Verfüllmaterial in verschiedenen Tiefen des Systems bei einem Zeitindex von 3557 Stunden.

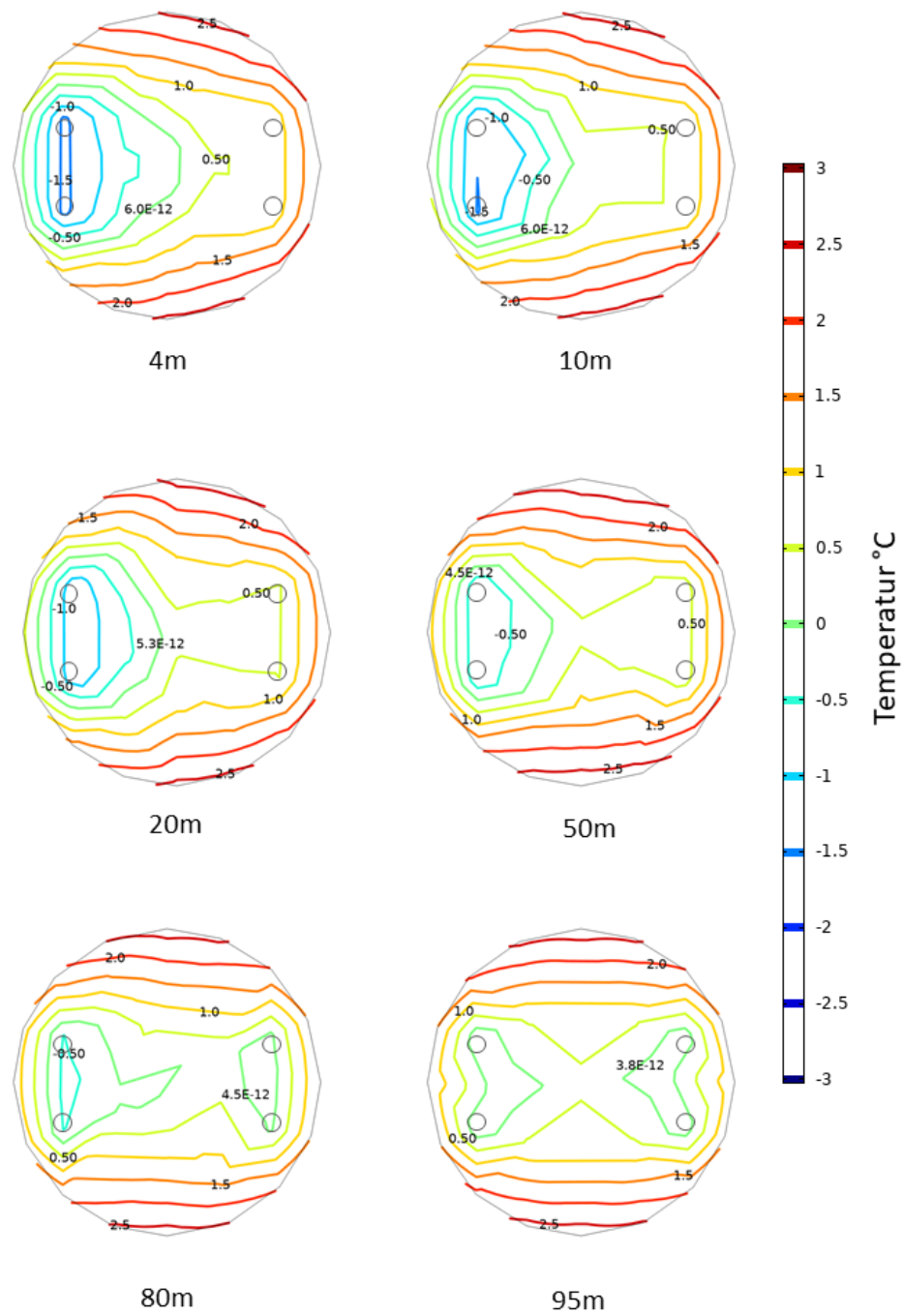


Abbildung 177: Temperatur im Verfüllmaterial in verschiedenen Tiefen

**Modell 2 (1 m/d)**

Das Modell 2 entspricht, u.a. auch hinsichtlich der Vorlauftemperaturen dem Modell 1, nur die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers wurde von 0,1 m/d auf 1 m/d erhöht.

Abbildung 178 zeigt die minimale Temperatur in den Bodenschichten, die die Erdwärmesonde umgeben, ähnlich wie bei den vorherigen Modellergebnissen sinken die Temperaturen in dem die EWS umgebenden Bodenkontinuum nicht unter den Gefrierpunkt.

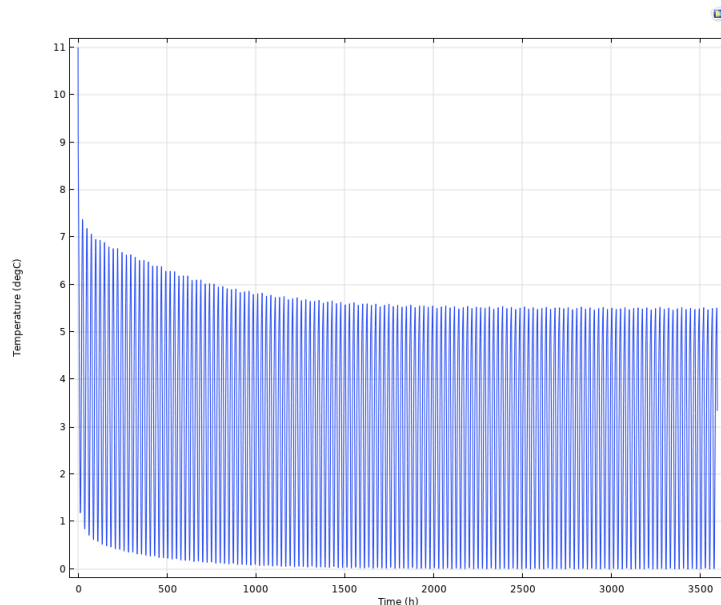


Abbildung 178: Geringste Temperatur, die im gesamten Bodenmodell zur jeweiligen Stunde gemessen wurde (model 2)

Abbildung 179, Abbildung 180 und Abbildung 181 zeigen die Temperaturverteilung im System in horizontalen Schnitten in 20 m, 50 m und 80 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden .

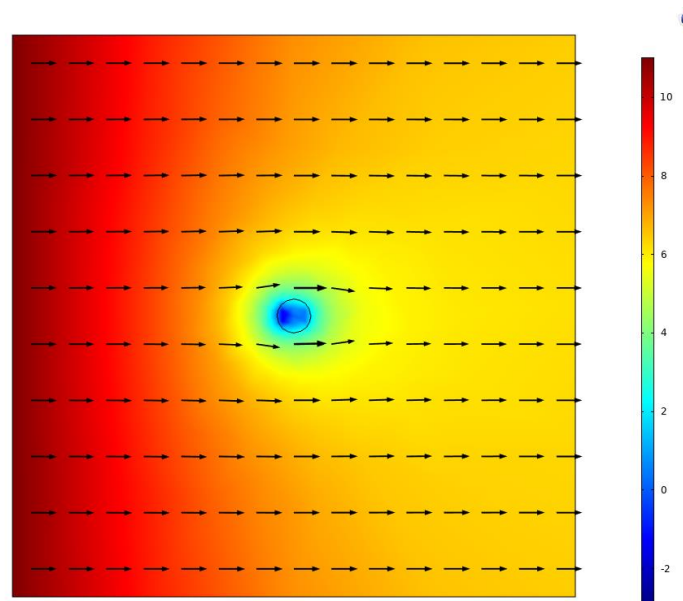


Abbildung 179: Temperaturverteilung in 20 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden

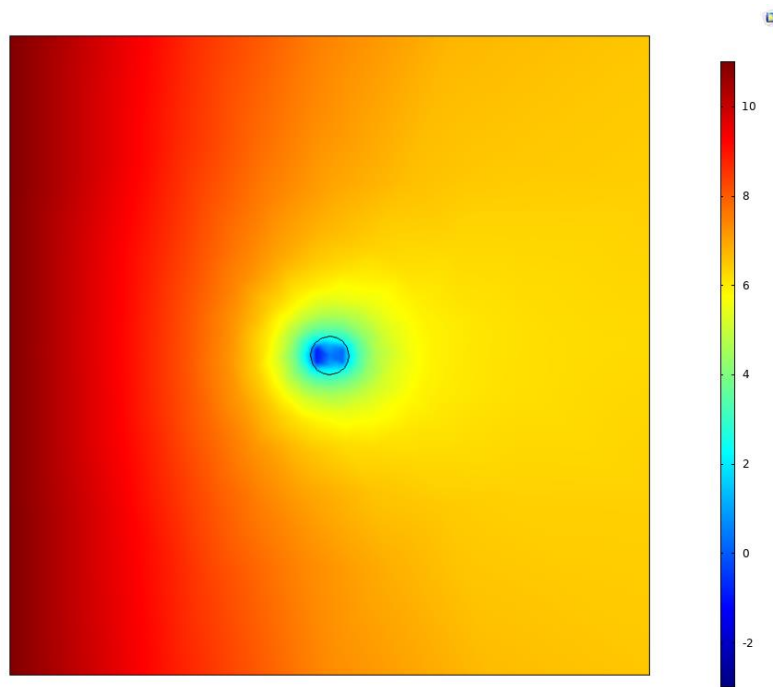


Abbildung 180: Temperaturverteilung in 50 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden

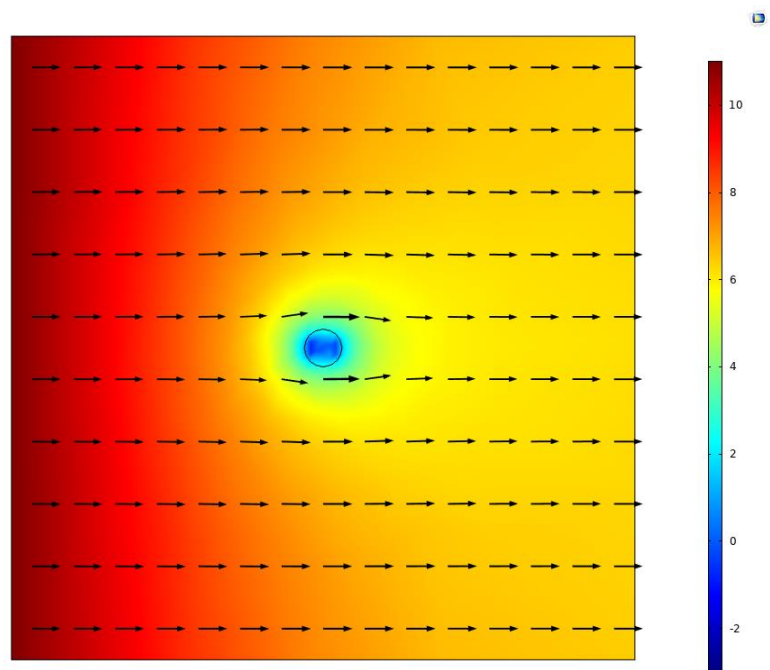


Abbildung 181: Temperaturverteilung in 80 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden

Während sich die Temperaturverteilung in den Bodenschichten im Vergleich zum Modell mit  $v = 0,1$  m/d nicht wesentlich verändert hat, zeigt Abbildung 182, dass die Temperaturen im Verfüllmaterial in diesem Modell etwas höher sind als im Vorherigen.

Dies zeigt, dass die Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit (bei  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nur eine sehr geringe Auswirkung auf das System hat und hauptsächlich um ca.  $0,5$  K höhere Temperaturen im Verfüllmaterial zur Folge hat, insbesondere im tieferen Teil der Erdwärmesonde.

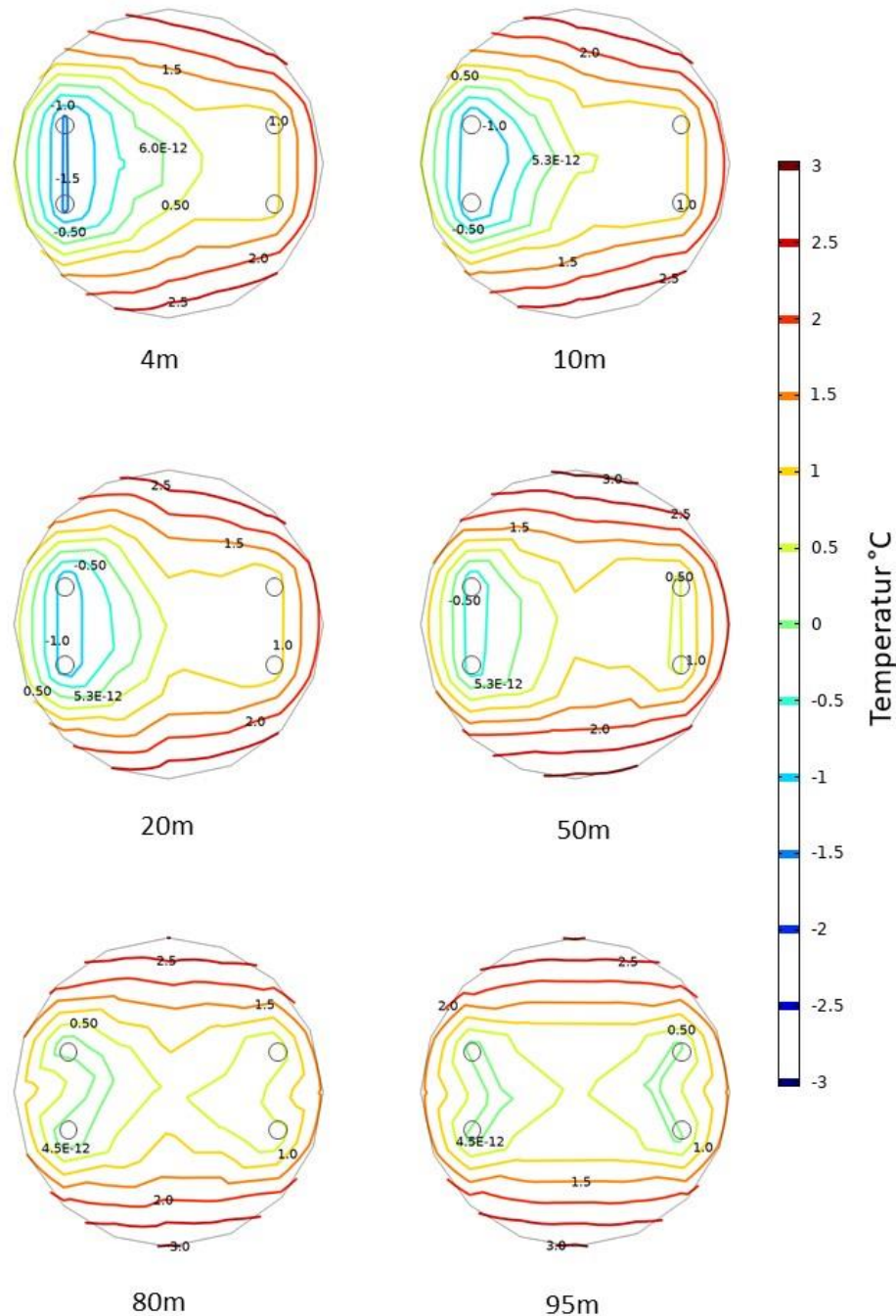


Abbildung 182: Temperatur im Verfüllmaterial in verschiedenen Tiefen bei Zeitindex 3557 Stunden

### Model 3 (kein Grundwasser)

Es wurde ferner ein Modell ohne Grundwasserströmung untersucht, das nur aus Tonschichten (ohne Sandschichten) und ohne Grundwasserströmung besteht. Dabei wurden für die EWS dieselben Vorlauftemperaturen simuliert. Abbildung 183 , Abbildung 184 und Abbildung 185 zeigen die Temperaturverteilung im Ton nach 3557 Stunden

Da kein Grundwasserfluss vorhanden ist, ist zu erkennen, dass die „Temperaturlinse“ in der Nähe des Vorlaufs (links) größer und in größerer Tiefe in der Nähe des Rücklaufs (rechts) kleiner ist, um dann am Boden gleichmäßiger zu werden, was zu erwarten ist, da das Wärmeträgerfluid mit zunehmender Tiefe wärmer wird.

Die Temperaturen im Boden in der Nähe des Vorlaufs waren ebenfalls etwas niedriger, die niedrigste aufgezeichnete Temperatur betrug jedoch  $-0,5\text{ °C}$  und dauerte einige Minuten. Die Ergebnisse der im Rahmen von AP4 durchgeführten Laborexperimente zeigen jedoch, dass der Boden erst bei einer Temperatur von  $-1,2\text{ °C}$  gefror, was auf den Latentwärmeeffekt zurückzuführen ist.

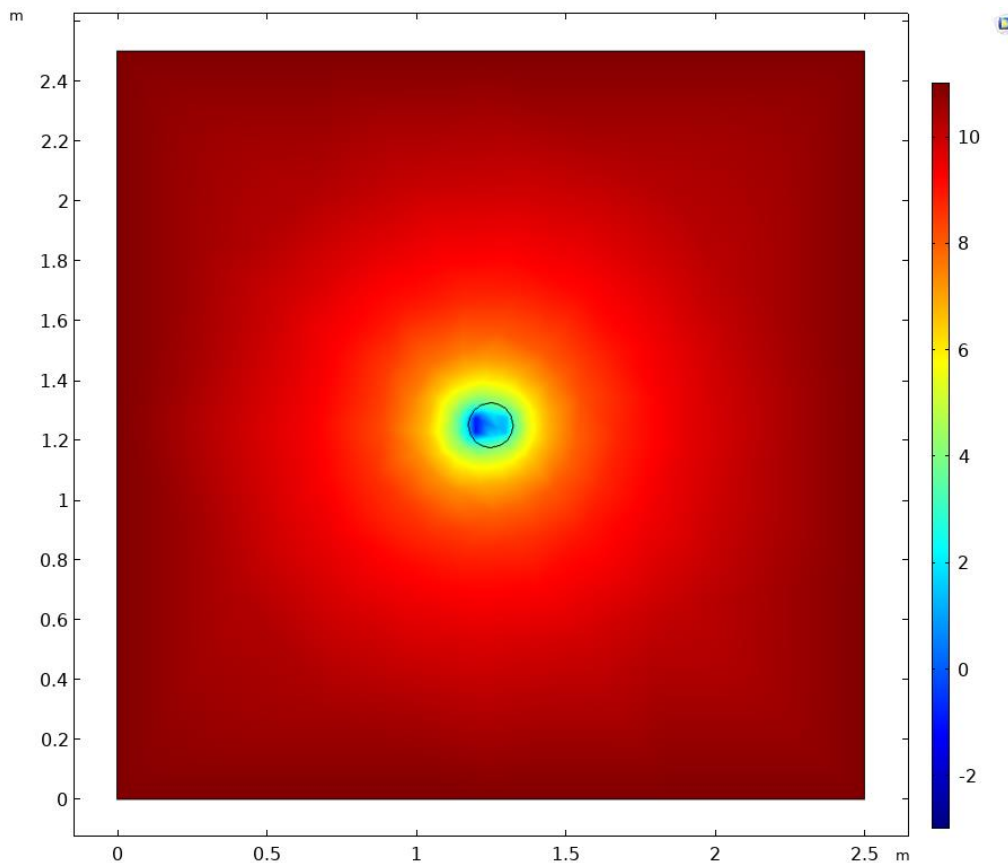


Abbildung 183: Temperaturverteilung in 20 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden

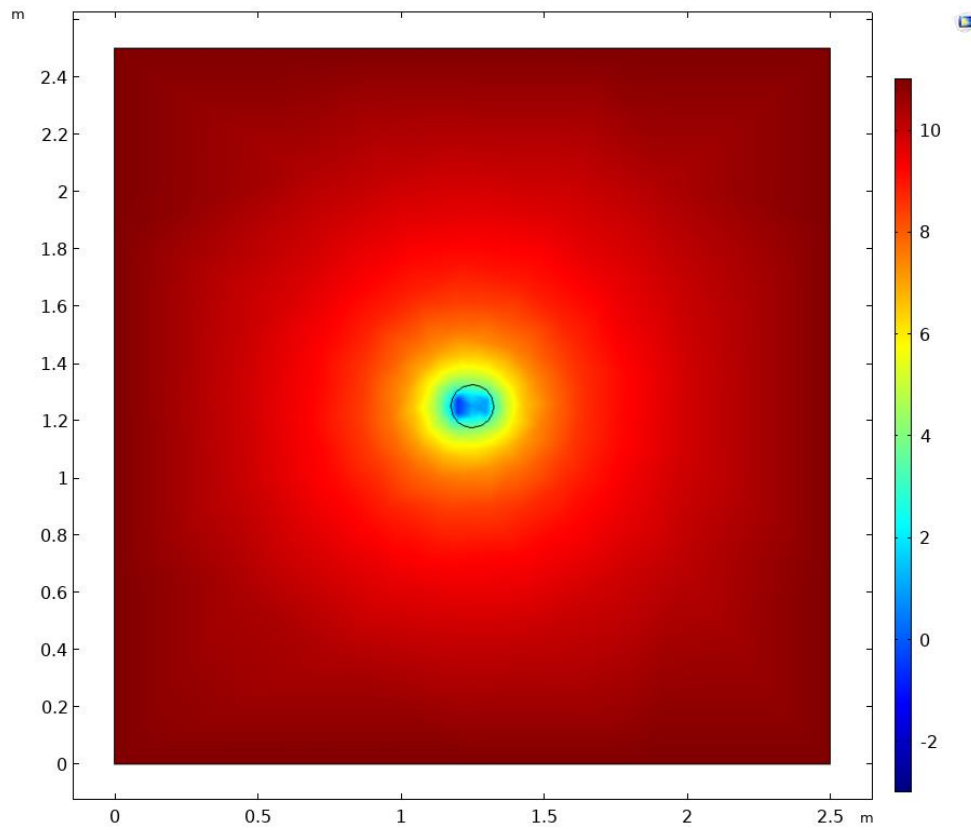


Abbildung 184: Temperaturverteilung in 50 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden

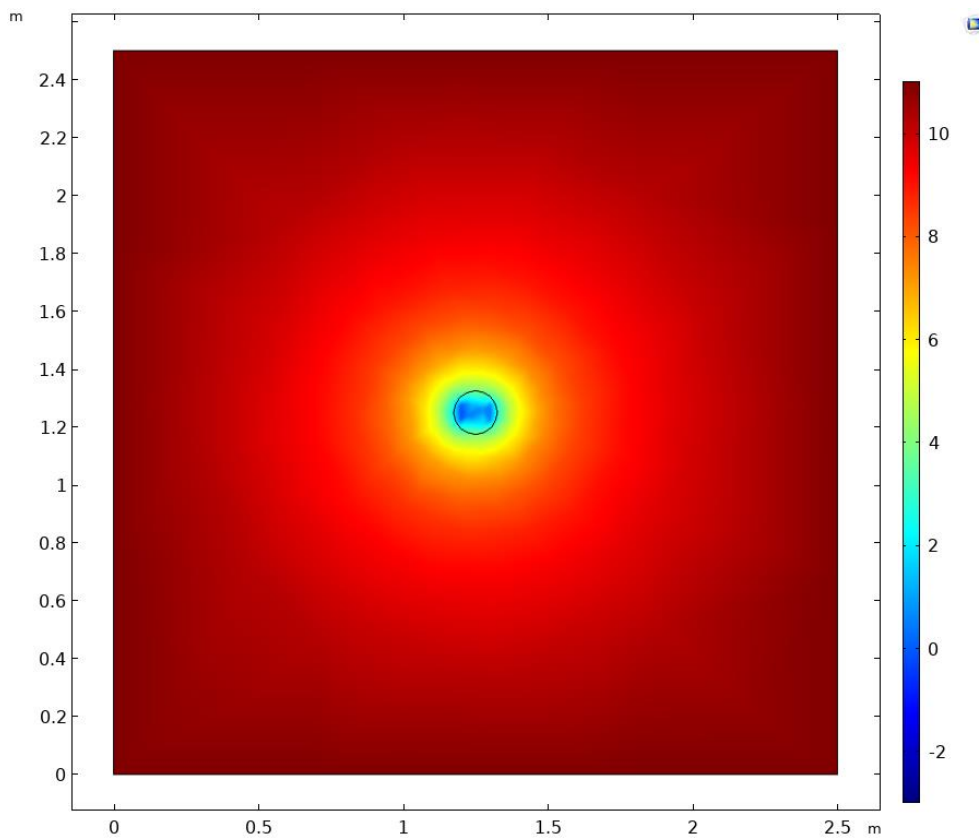


Abbildung 185: Temperaturverteilung in 80 m Tiefe bei Zeitindex 3557 Stunden



Da in diesem Modell kein Grundwasserstrom vorhanden ist, sind die Verfüllmaterialtemperaturen (Abbildung 186) niedriger als bei den vorherigen Modellen.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Temperaturen in dem Vorlauf der Sondenrohre selbst in 95 m Tiefe nicht über 0°C steigen, was immer noch keine Phasenänderung in der Bodenschicht verursacht. Dies könnte auf die relativ kurze Zeit zurückzuführen sein, in der das System bei dem sinusförmigen Betrieb (Abbildung 171) mit einer Temperatur von -3 °C betrieben wird. Eine Phasenänderung im Boden wäre gegebenenfalls zu erwarten, wenn das System über einen längeren Zeitraum bei -3 °C betrieben würde.

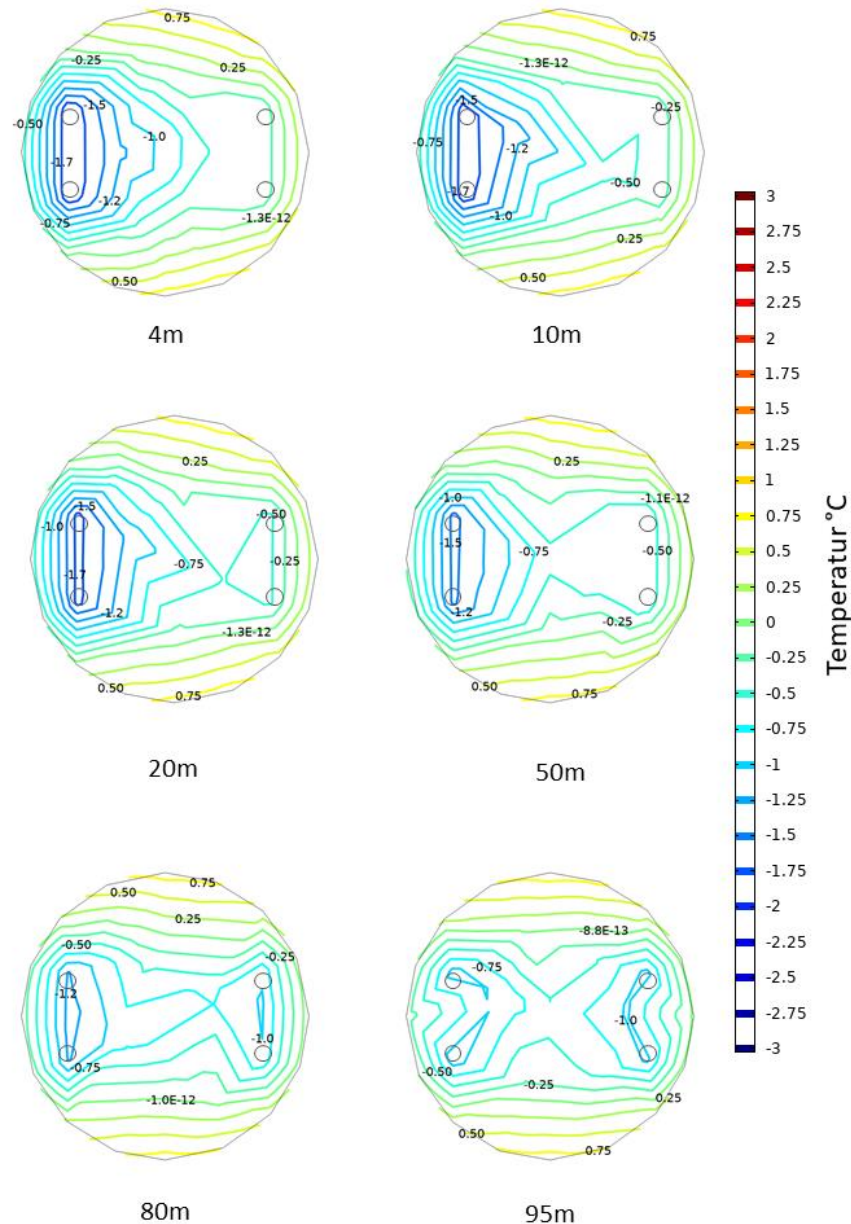


Abbildung 186: Temperatur im Verfüllmaterial bei Zeitindex 3557 Stunden

Zusammenfassend wurden in diesem Arbeitspaket 3 verschiedene Erdwärmesondenmodelle mit realistischen Szenarien und Betriebszeiten vorgestellt, das erste Modell mit einem Grundwasserfluss von 0,1 m/d, das zweite mit einer Grundwasserströmung von 1 m/d und das letzte ohne Grundwasserströmung. Die Ergebnisse aller Modelle zeigen, dass in den Wärmetauscher umgebenden Bodenschichten kein Gefrieren auftritt, jedoch sinkt die Temperatur im Verfüllmaterial in allen Modellen unter die Gefrieretemperatur, jedoch waren die Modelle aufgrund der Unterkühlungs- und Nukleationseffekte (zuvor in AP2 diskutiert) nicht in der Lage, den Phasenwechsel im Verfüllmaterial zuverlässig vorherzusagen.

### 9.13 AP 8a: Großversuch im Realmaßstab (Solites)

Solites unterhält am KIT in Karlsruhe ein Forschungsgelände zur Untersuchung von Erdwärmesonden. Auf diesem Gelände befinden sich zwei verrohrte Bohrungen, in die 30 m tiefe Erdwärmesonden eingebaut werden können. Die eingebauten Erdwärmesonden können im Versuchsstand unter definierten Bedingungen betrieben werden. Nach Abschluss der Versuche im eingebauten Zustand erlaubt der Versuchsaufbau den abschnittsweisen zerstörungsfreien Rückbau der untersuchten Erdwärmesonden, sodass deren Verfüllqualitäten untersucht werden können.

In diesem Arbeitspaket wurde eine mit 34 Temperaturfühlern ausgestattete Erdwärmesonde mit definierten Sondenrohrpositionen in ein künstliches Bohrloch auf dem Forschungsgelände eingebaut. Diese Erdwärmesonde wurde dann mit einer konstanten Zulauftemperatur (ca. -3 °C) im Grenzbereich der zur Frostvermeidung minimal zulässigen Zulauftemperatur betrieben.

Die während des Betriebs an definierten Positionen innerhalb der Erdwärmesonde erfassten Temperaturen (Pt100-Sensoren) wurden zur Überprüfung der in den vorigen Arbeitspaketen verwendeten numerischen Modelle verwendet. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf dem tiefenorientierten Temperaturverlauf im Verfüllbaustoff.

Außerdem sollte mit Hilfe des druckluftbeaufschlagten Tracer-Vorratstanks im unteren Aquifer des künstlichen Bohrlochs ein definierter hydrostatischer Druck zugewiesen und Tracer-Flüchtigkeit in den Aufbau des Bohrlochs eingeleitet werden. Damit wurde für die anfangs nahezu undurchlässige (Baustoff-)Schicht die Systemdurchlässigkeit qualitativ bestimmt und bevorzugte Wegsamkeiten gefunden.

Der wesentliche Mehrwert des Großversuchs im Realmaßstab gegenüber den mittelskaligen Versuchen (s. AP 4) sowie gegenüber den von VEGAS in einem Großbehälter (4 m Tiefe) bereits durchgeführten Versuchen (vgl. Projekt EWS-Frost) besteht in der deutlich größeren EWS-Tiefe und der damit möglichen Nachbildung von realitätsnahen Tiefentemperaturprofilen und Spannungszuständen. Damit sollte die Vermutung bestätigt werden, dass die Frostgefahr in einer EWS mit zunehmender Tiefe abnimmt.

#### 9.13.1 Versuchsaufbau und Materialien

Abbildung 192 zeigt den schematischen Aufbau des Großversuchs mit den wesentlichen Komponenten und Querschnitten. Rechts in der Abbildung ist ein vertikaler Querschnitt des Aufbaus und der Schichten dargestellt. Eine künstliche, 30 m tiefe EWS-Bohrung wurde aus zwei unabhängigen und übereinanderliegenden Aquiferen, getrennt von einer hydraulisch (nahezu

undurchlässigen (Baustoff-)Schicht (Aquiclude), nachgebildet. Die beiden Aquifere wurden durch wassergesättigte Quarzsandschichten aus Sand mit 0,1-0,4 mm Korngröße (Holcim) realisiert; der Aquiclude mit dem Quellton Mikolit 00 von GWE, der bereits für die mittelskaligen Frostversuche in AP 4 verwendet wurde. Er wurde mit einem Mischungsverhältnis von 170 kg zu 72 l Wasser eingefüllt. In Tabelle 36 sind die Eigenschaften der genutzten Baustoffe für den Probenaufbau aufgeführt.

Das Funktionsprinzip des Versuchsaufbaus sowie insbesondere die hydraulische Abdichtung zwischen den beiden Aquiferen wurde mit Hilfe mehrerer Testaufbauten vorab erprobt, um kritische Punkte vor der Durchführung des Großversuchs erkennen und lösen zu können. Als Ergebnis erfolgte die Abdichtung mit hydraulisch abdichtendem Schnellzement.

Von den 30 m der Bohrung entfielen 10,5 m auf den unteren Aquifer, 5,4 m auf den Aquiclude und 14 m auf den oberen Aquifer. Die Dicke der Dichtungsschicht zwischen Aquiclude und den Aquiferen betrug etwa 0,1 m.

Tabelle 36: Eigenschaften des Quarzsandes und in AP1 berechnete Porosität der damit hergestellten Proben; Eigenschaften des Quelltons wie in AP 5 angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit eines gesättigten Quarzsandes ist der VDI Richtlinie 4640 Blatt 1 [11] entnommen.

Material	Korngröße [mm]	Schüttdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Hydr. Durchlässigkeit [m/s]	Porosität [-]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
Quarzsand	0,1-0,4	-	$\approx (3,61 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	0,40-0,43	2,4
Quellton	(7 bis 12) x 8	1,00	$< 1 \cdot 10^{-10}$	-	1,25

Die Bohrung wurde in miteinander verschraubten PVC-Außenrohren von 2 Metern Länge mit Durchmesser  $D_a/D_i$  280 mm/255 mm und Wandstärke 12,5 mm aufgebaut. Abgeschlossen wurde dieses Außenrohr mit Dichtungsflanschen. Um die Dichtigkeit des Aufbaus zu gewährleisten, wurden Bitumen-Schrumpfschläuche an den Verschraubungen angebracht. Mithilfe eines im Außenrohr zentrierten, als Platzhalter für die EWS-Bohrung dienenden, transparenten PVC-Rohrs (Abbildung 188 c) mit Außendurchmesser 160 mm wurden die Schichten der Ringraumverfüllung sukzessive aufgebaut. Der Aufbau und diese Komponenten sind in Abbildung 188 zu sehen. Der Platzhalter wurde anschließend entfernt.

Um die Standfestigkeit der Sandaquifer ohne Innenrohr zu gewährleisten, wurde der Quarzsand mit 2 % des 2-Komponenten Epoxid-Harz Isolera I101 angemischt. Abbildung 187 zeigt eine freistehende Sand-Epoxidharz-Geologie ohne Außen- und Innenrohr.

Die hydraulische Durchlässigkeit des Sandes wurde im Forschungsvorhaben QEWSII mittels eines Triaxialzellenversuchs nach DIN 18 130-T1 [41] geprüft. Der ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert beträgt demnach  $k_f = (3,61 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$  m/s. Für eine Fluidtemperatur von 10 °C ergibt sich ein normierter Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{f10} = (2,66 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$  m/s [9]. Bei der Probenpräparation wurde der Sand dabei leicht verdichtet, was bei dem Versuchsaufbau in diesem Projekt nicht gemacht wurde. Es ist daher davon auszugehen, dass der Durchlässigkeitsbeiwert der Aquifere in diesem Versuch größer ist. Die Porosität wurde als mit den Werkstoffen QS8 und QS9 aus AP 1 vergleichbar angenommen.



Abbildung 187: freistehende Sand-Epoxid-Geologie

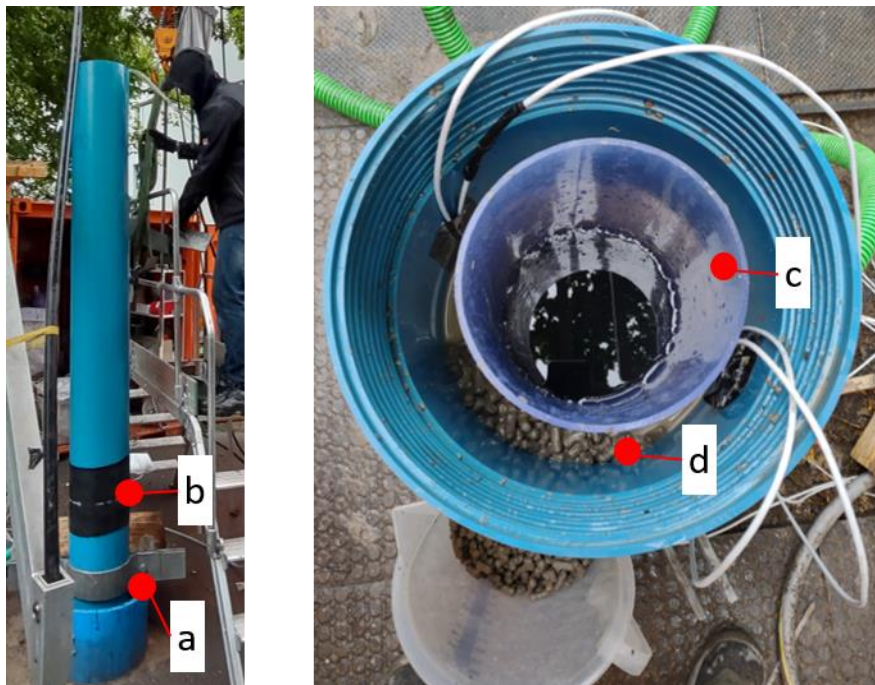


Abbildung 188: Aufbau des Versuchs. Links: Eine Klemmschelle [a] positioniert den Versuchsaufbau in der Forschungsbohrung. Die Außenrohre werden aufgeschraubt und mit einem Schrumpfschlauch [b] abgedichtet. Rechts: zentriertes Innenrohr [c] und Quelltonpellets im Ringspalt [d].

In der Quelltonschicht wurde das in Abbildung 188 c zu sehende Innenrohr belassen, um die Stabilität der Formation zu gewährleisten. Die Eigenschaften der verwendeten Rohre, auch der Sondenrohre, sind in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Eigenschaften (Innendurchmesser, Höhe, Dicke, Farbe) und Anwendungsbereich der Probenrohre

Material	Verwendung	$D_i$ [mm]	$D_a$ [mm]	L [m]	Wandstärke [mm]	Farbe	$\lambda$ [W/(m*K)]
PVC (Polyvinylchlorid)	Außenrohr	255	280	2	12,5	blau	0,15
PVC	Innenrohr Aquiclude	154	160	6,3	3	transparent	0,15
PE 100 (Polyethylen)	Sondenrohr	26,2	32	30	2,9	schwarz	0,42

Nach dem Aufbau der Ringspaltverfüllung wurden die Sondenrohre eingebracht und die Suspension eingepresst. Um die Sondenrohre auszurichten, wurden Abstandshalter bzw. Zentrierhilfen angebracht. Als Verfüllwerkstoff wurde der in den Vorversuchen in AP 1 getestete EWM PLUS von Schwenk mit ID VM3d benutzt, dessen Eigenschaften in Tabelle 38 aufgeführt sind. Der Durchmesser der Sondenbohrung betrug 160 mm. Die Suspension wurde mit Hilfe des auch in AP 4 verwendeten GERTEC IS-38-E-Kolloidmischers eingebracht.

Tabelle 38: Eigenschaften des Verfüllbaustoffs (<sup>1</sup> Herstellerangaben)

ID	W/Z Wert <sup>1</sup> [-]	Suspensionsdichte <sup>1</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]	Hydr. Durchlässigkeit <sup>1</sup> [m/s]	Druckfestigkeit (28d) <sup>1</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit <sup>1</sup> [W/(m*K)]	thermisch verbessert <sup>1</sup>
VM3d	0,3	1,94	<5*10 <sup>-11</sup>	12	≥2	Quarzsand

### 9.13.2 Messtechnik und Aufbau

Die Aufzeichnung des vertikalen Temperaturverlaufs im Verfüllwerkstoff erfolgte mittels zweier Sensorketten. Einzelne Pt100 Sensoren der Klasse 1/10 DIN wurden zur Erfassung der Temperatur in der wassergefüllten Forschungsbohrung und als Referenzsensoren für die Sensorketten eingesetzt. Abbildung 189 zeigt schematisch die Sensoranordnung im gesamten Aufbau. In insgesamt 6 Messtiefen (Pn mit n = 1...6) wurden jeweils 3 Pt100 Sensoren (Pn.1, Pn.2, Pn.3) zur Erstellung eines Temperaturprofils im Wasserbad außen am Außenrohr angebracht. In der Ringspaltverfüllung und an den Sondenrohren, also in der Geologie, wurden in vier Messtiefen (PA, PB, PC, PD) jeweils 4 Pt100 Sensoren (z.B. PA.P, PA.G, PA.V, PA.R) verbaut. In Abbildung 189 sind rechts die Positionen und Einbautiefen dargestellt. Links im Bild ist ein horizontaler Querschnitt  $\alpha - \alpha$  dargestellt, in dem die Verteilung der Sensoren in einer Einbauebene dargestellt ist. Drei weitere Pt100 Einschraubensensoren [V, R1, R2] waren in den Vor- und Rücklauf des Thermostats eingebaut.

Die Platzierung und Menge der Sensoren wurde mit dem IGS abgesprochen, damit eine definierte und ausreichende Datengrundlage für die Temperaturrandbedingungen in der Simulation (AP 8b) erhoben werden konnte. Tabelle 39 gibt einen Überblick.

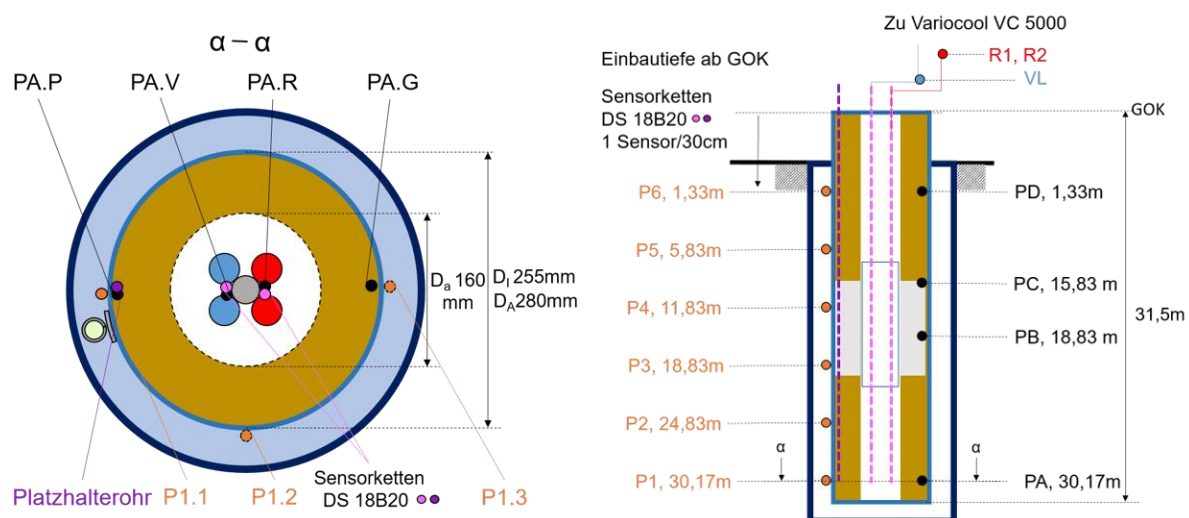


Abbildung 189: Einbaupositionen der Sensoren in einem horizontalen Querschnitt (links) und die Einbautiefen in einem vertikalen Querschnitt (rechts). Darstellungen nicht maßstäblich.

Tabelle 39: Übersicht über die Positionen und eingebauten Sensoren

Typ	Positionen (Anzahl)	Gesamtanzahl
Sensorkette DS 18B20	VL, RL, Ringspalt	3
Pt100	P1-6 (3); PA (4), PB (2), PC (4), PD (4)	31
Pt100 Einschraub	P.VL, P.R1, P.R2	3

Insgesamt wurden 34 Pt100-Sensoren der Firma TMH verwendet und zusätzlich 3 Sensorketten von der Firma André Voutta Grundwasserhydraulik eingebaut. Neben den Sensorketten am Sondenvor- und rücklauf wurde eine Sensorkette in der Ringraumverfüllung eingebaut. Hierfür war ein Platzhalterrohr aufgebaut worden, in welches diese nach Fertigstellung des Aufbaus eingeführt wurde. Die Sensorketten bestehen aus digitalen DS 18B20 Sensoren von Maxim Integrated Products Inc. und liefern das Temperaturprofil über die Tiefe der Sonden. Sie wurden an ein 3-adriges Datenkabel im Abstand von 30 cm angeschlossen. Das Kabel wurde zusammen mit den Sensoren durch ein 8 mm starkes Röhrchen gezogen, dieses mit Silikonöl gefüllt und verschlossen. Die Pt100 Sensoren im Ringspalt wurden während des Aufbaus mit Silikon am Außenrohr befestigt; Abbildung 190 zeigt diese Bauschritte, Abbildung 191 die Sensoren. Tabelle 40 beschreibt die verwendeten Sensoren.



Abbildung 190: Einbau der Pt100 Referenzsensoren am Außenrohr und Platzhalterrohr für die Sensorkette im Ringspalt (rot markiert links) und Platzhalter und Sensorkabel im verfüllten Ringspalt (rechts).

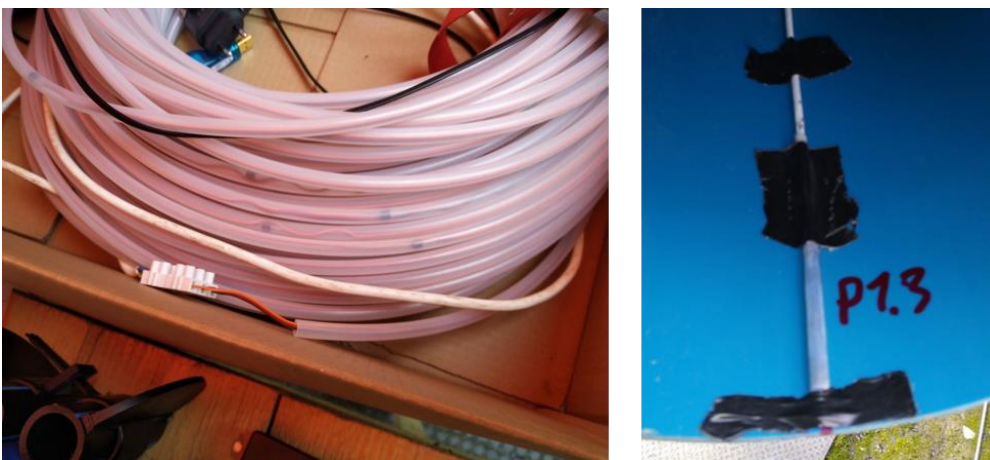


Abbildung 191: Sensorkette DS 18B20 (links) und Pt100 Sensor von THM mit Schutzrohr und Teflonabdichtung (rechts).

Tabelle 40: Überblick der Eigenschaften der verwendeten Temperatursensoren u.a. Grenzabweichung und entsprechende Gültigkeitsbereiche nach Herstellerangaben [42] und in Anlehnung an DIN EN 60751:2009-05 [13].

Typ	Messprinzip	Durchmesser [mm]	Klasse	Gültigkeitsbereich [°C]	Grenzabweichung [°C]
Sensorkette DS 18B20	Digitales Thermometer	8	-	-10 bis 85	±0,5
Pt100	4-Leiter Widerstandselement	6	1/10 DIN	-50 bis 220	±0,1 *(0,3 + 0,005*t)
Pt100 Einschraub	4-Leiter Widerstandselement	6	1/10 DIN	-50 bis 220	

Die Klasse 1/10 DIN ist nicht genormt. Angaben wie 1/10 DIN beziehen sich auf Bruchteile der Klasse B. Die Grenzabweichungen der Genauigkeitsklasse 1/10 DIN berechnet sich laut Hersteller TMH zu:

$$\text{Grenzabweichung nach } : \frac{1}{10} \text{ DIN} = \pm \left( \frac{1}{10} * (0,3 + 0,005 * t) \right)$$

Die Pt100 Sensoren wurden mit Hilfe von Agilent 34970A Datenloggern, die an einen Messlaptop mit der Benchlink 3 Software angeschlossen waren, kontinuierlich ausgelesen. Aufgrund des sehr kleinen angestrebten Messbereichs zwischen -3 und -2 °C wurde für die Kalibrierung durch Solites die Annahme einer linearen Kennlinie als ausreichend betrachtet und die Sensoren wurden mit einem Messpunkt, der mit einem Eisbad mit konstant gehaltener Temperatur hergestellt wurde, kalibriert. Als Referenzthermometer wurde ein Precision Plus Thermometer der Fa. Priggen mit ±0,04 °C Grundgenauigkeit und eine Pt100 1/10 DIN Sonde gewählt.

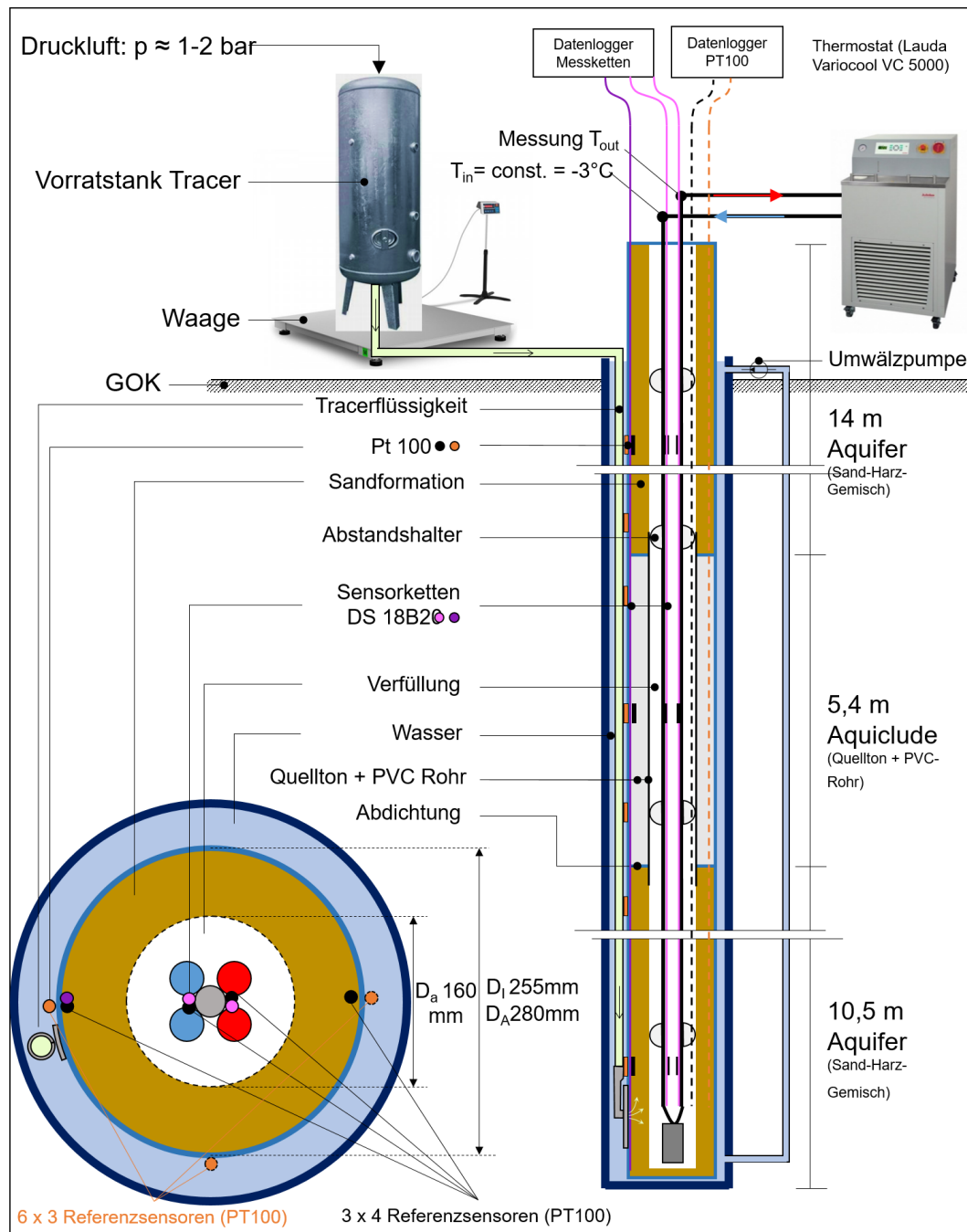


Abbildung 192: Skizze zum experimentellen Aufbau des Großversuchs, horizontaler Querschnitt (links unten) & vertikaler Querschnitt (rechts). Im horizontalen Querschnitt sind die Positionen der Messketten und Referenzsensoren skizziert, im vertikalen Querschnitt die Schichten des Probenaufbaus. Außerdem sind alle wichtigen Komponenten eingezeichnet.

Die Sensorketten wurden mit einer durch die Firma André Voutta Grundwasserhydraulik selbstentwickelten Technik ausgelesen.



### 9.13.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit einer konstanten Vorlauftemperatur von  $-3\text{ °C}$  durchgeführt. Die Wärmeübertragung bzw. der Bohrlochwiderstand im Versuchsaufbau wird durch das Wasser in der Forschungsbohrung sowie das PVC-Außenrohr und das PE100-Sondenrohr beeinflusst, sodass mit einer Temperaturspreizung von etwa  $1\text{ K}$  gerechnet wurde. In verfüllten Erdwärmesonden wird als Wärmeträgermedium ein Glykol/Wassergemisch mit einer Konzentration von bis zu  $30\%$  Glykol verwendet, wobei wegen der vergleichsweise hohen Viskosität Propylenglykol eher ungeeignet ist. Ethanol wird meist mit Additiven vergällt, um es ungenießbar zu machen [9]. Im Versuch soll ein Wasser-Ethylenglykolgemisch mit  $20\text{ m\%}$  Glykol-Anteil verwendet werden. Dieses hat einen Gefrierpunkt von  $-9,5\text{ °C}$ . Es wurde mit einem Variocool VC 5000 Thermostat von Fa. Lauda umgewälzt. Die sonstigen Betriebsparameter zeigt Tabelle 41.

Zur Gewährleistung einer optimalen Wärmeübertragung durch Konvektion muss eine turbulente Strömung im Sondenrohr erreicht werden. Dazu wurde der Versuch in Abhängigkeit von den angestrebten Betriebstemperaturen und den Eigenschaften des Wasser-Glykolgemischs sowie in Anlehnung an die in AP 4 durchgeführten Versuche, mit einem Volumenstrom von  $920\text{ l/h}$  pro Sondenrohr durchgeführt.

Tabelle 41: Betriebsparameter des geplanten Versuchs

Vorlauftemperatur [°C]	Temperaturspreizung VL-RL [K]	Mittlere Betriebstemperatur [°C]	Volumenstrom/Sondenrohr [l/h]	Reynoldszahl
-3	1	-2,5	920	3300

Während des Versuchs wurde das Wasser in der Forschungsbohrung mit einer Umwälzpumpe in Bewegung gehalten, um möglichst konstante Rahmenbedingungen zu erreichen.

### 9.13.4 Ergebnisse

Die Datenaufzeichnung wurde am 26.10.2021 um 17:15 Uhr gestartet. Über eine Gesamtlaufzeit von ca.  $71\text{ h}$  wurde an allen Pt100-Sensoren alle zwei Minuten ein Messwert aufgezeichnet. Der Thermostat und damit der Versuch wurde um ca. 19:00 Uhr gestartet.

#### **Vorlauf- und Rücklauftemperatur**

Abbildung 193 zeigt die Temperaturverläufe der Pt100-Einschraubensensoren in Vor- und Rücklauf am Sondenkopf. Es zeigt sich, dass sich nach ca.  $8\text{ Stunden}$  die Zielvorlauftemperaturen von  $-3\text{ °C}$  einstellten und ab diesem Zeitpunkt relativ konstante Temperaturprofile auftraten. Der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf beträgt in diesem Bereich ca.  $1-1,25\text{ K}$ . Die Abweichungen zwischen den Rücklaufsensoren lagen nahezu konstant bei  $0,25\text{ K}$  und können auf unterschiedliche Einschraubtiefen der Sensoren zurückzuführen sein, was in unterschiedliche Eintauchtiefen resultiert. Grundsätzlich liegt die gemessene Temperaturdifferenz VL-RL im geplanten Bereich von  $1\text{ K}$ .

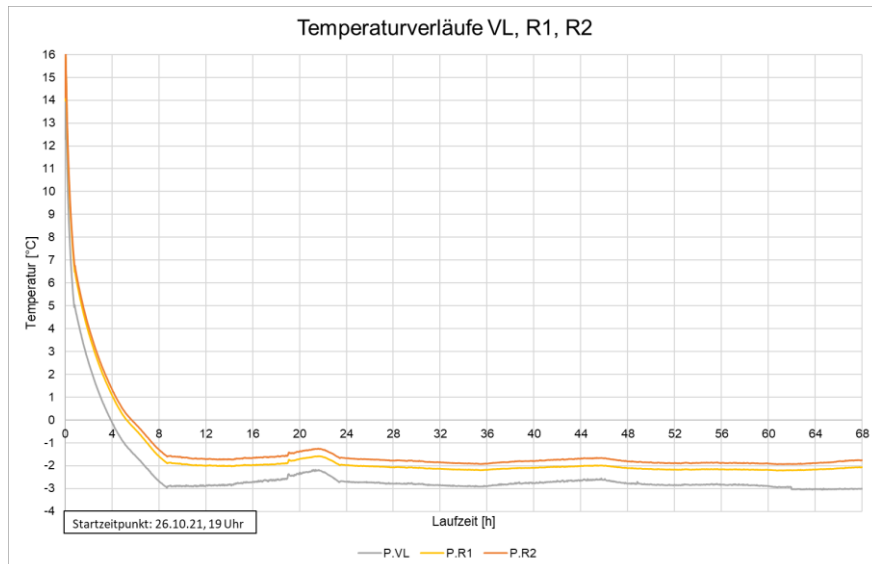


Abbildung 193: Vor- und Rückklufttemperaturen am Sondenkopf

### Umwelteinflüsse

An den Geologie-Sensoren D.G und D.P zeigen sich eindeutig Umgebungseinflüsse, die durch die geringe Einbautiefe von nur 1,33 m sowie die Entfernung zum Sondenrohr und die isolierte Position in der Sandgeologie entstehen. Auch die Messwerte im Wasserbad zeigen, dass das Wasser trotz der Umwälzung leichten Umwelteinflüssen ausgesetzt war.

Die Messwerte der Sensoren D.G, D.P und beispielhaft für das Wasserbad P4.2 und P4.3 sind in Abbildung 194 dargestellt. Eingezeichnet sind auch Datum und Uhrzeit der Spitzenwerte.

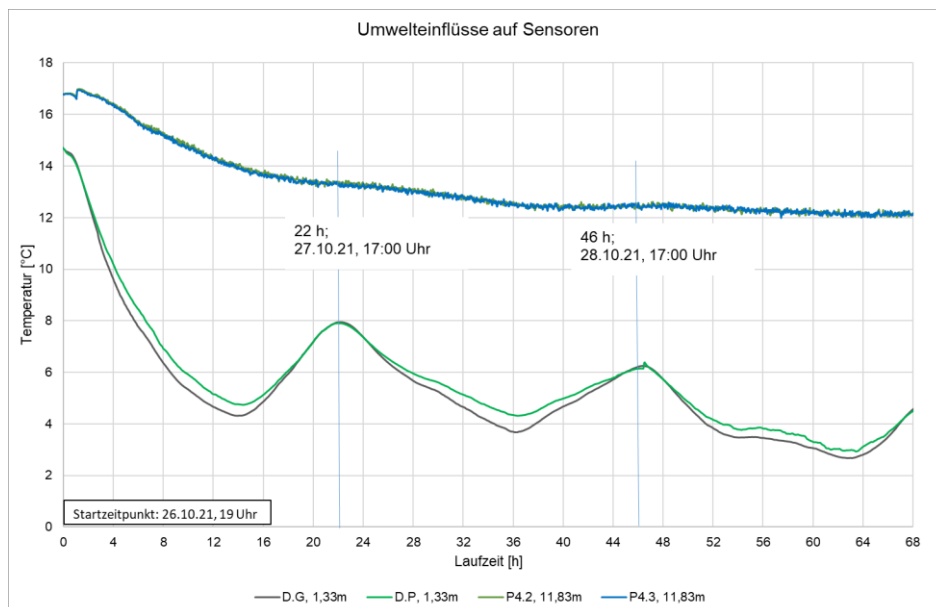


Abbildung 194: Darstellung der gemessenen Umwelteinflüsse.

Vergleicht man die Verläufe der Sensoren, zeigt sich, dass die Messwerte im Wasserbad stärkeren Schwankungen unterliegen. Dies kann beispielsweise auf durch die Umwälzpumpe entstehende Konvektion und Verwirbelungen zurückgeführt werden.

### Randbedingungen im Wasserbad

Abbildung 195 links zeigt das tiefenabhängige Temperaturprofil im Wasserbad nach 4 und 14 Stunden Versuchslaufzeit. Wie bereits in Abbildung 193 gezeigt, ist nach 8 h die Zielvorlauftemperatur von  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht, sodass ab diesem Zeitpunkt relativ konstante Bedingungen vorliegen. Zur Auswertung wurden für jede Position geeignete Sensoren ausgewählt und Mittelwerte gebildet.

Aus dem Verlauf kann die Annahme nahezu konstanter Temperaturen im Wasserbad getroffen werden. Das Wasserbad kühlt im Verlauf des Versuchs ab.

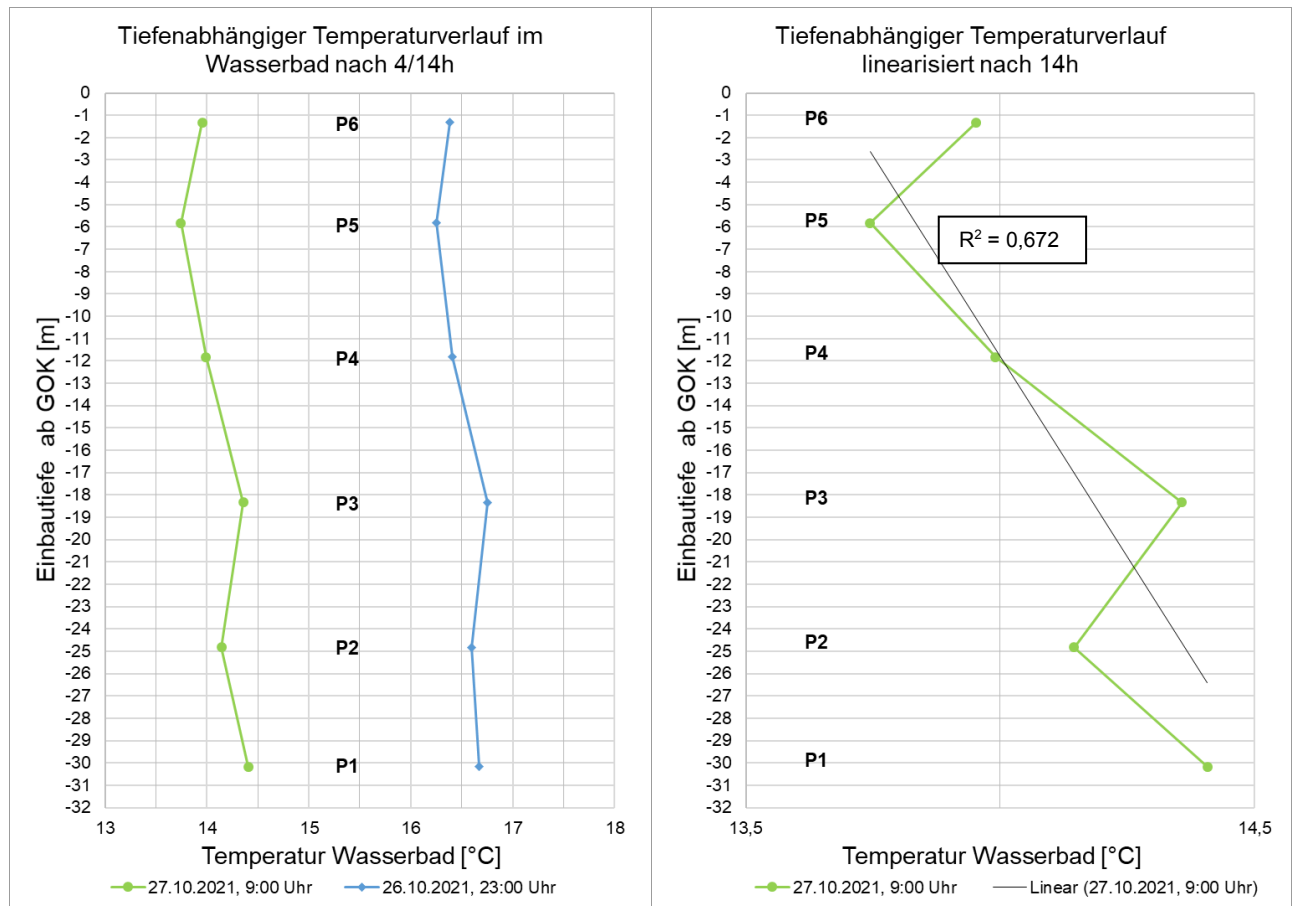


Abbildung 195: Temperaturprofile im Wasserbad nach 4 und 14 Stunden Versuchslaufzeit (links) und linearisiert nach 14 Stunden (rechts)

### Versuche zur Bestimmung des tiefenabhängigen Temperaturprofils an den Sondenrohren und in der Geologie

Ziel des Versuchs war die Erstellung tiefenabhängiger Temperaturprofile entlang der Sondenrohre und in der Geologie. Abbildung 197 zeigt die gemessenen Temperaturprofile nach 4 und 40 h Versuchslaufzeit. Die Zeitpunkte wurden so gewählt, da aus Abbildung 196 ersichtlich wird, dass zwischen 4 und 40 Stunden Unregelmäßigkeiten auftraten.

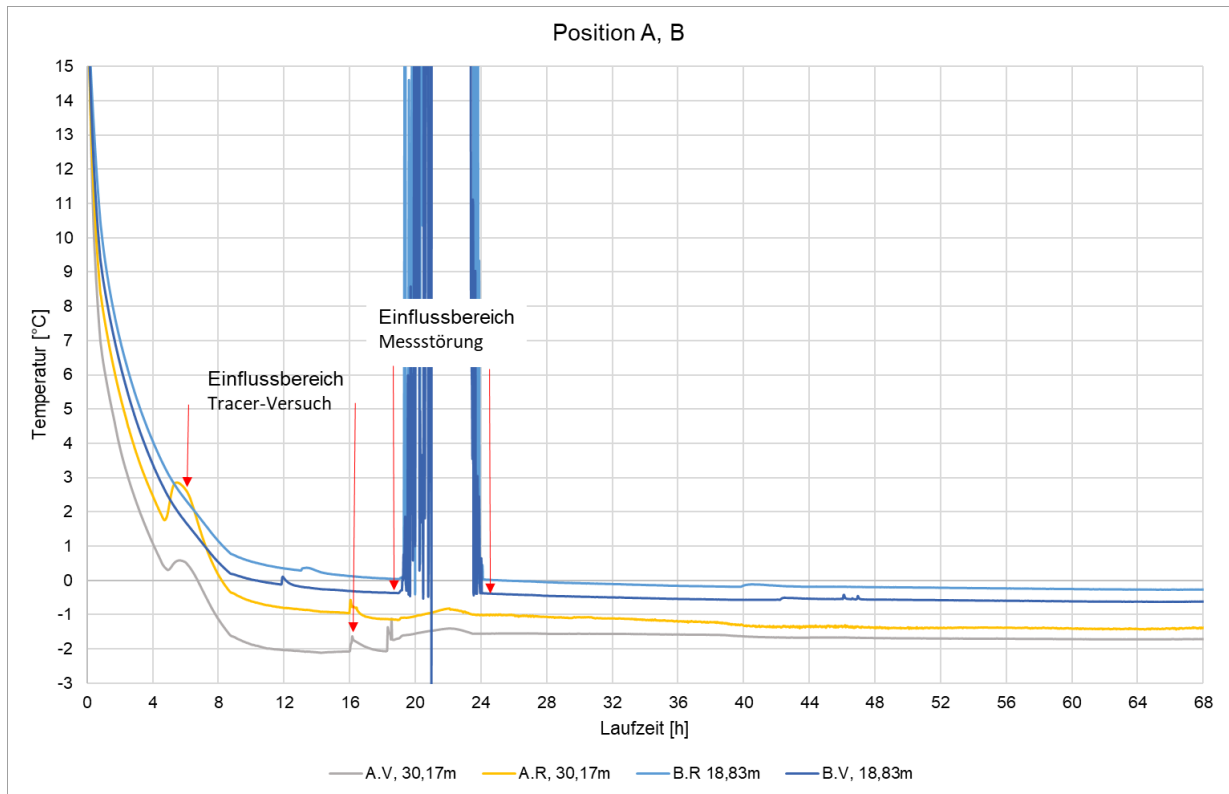


Abbildung 196: T Temperaturverlauf an den Vor und Rücklaufsensoren A.R, A.V, B.V und B.R

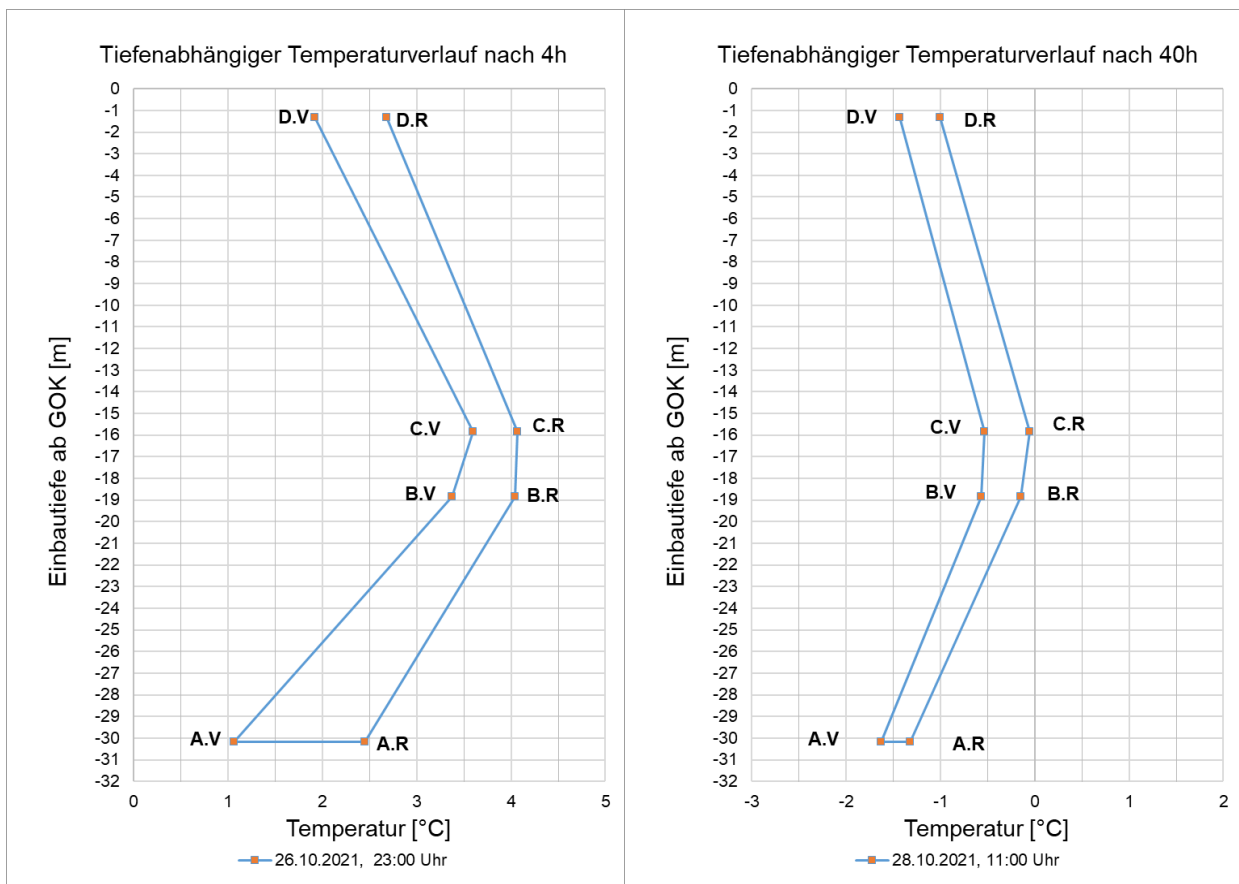


Abbildung 197: Tiefeabhängige Temperaturprofile nach 4 und 40 h Versuchslaufzeit

Es zeigt sich, dass der Temperaturverlauf über die Zeit konstant bleibt. Die Temperaturunterschiede zwischen den Vor- und Rücklaufsensoren bleiben außer am tiefsten Punkt A ebenfalls konstant. Am Punkt D scheinen diese durch die bereits gezeigten Umwelteinflüsse beeinflusst zu sein.

### **Geologie**

An den Positionen A, C und D wurden Sensoren in der Geologie eingebaut, um die Bedingungen dort zu erfassen.

Bei der Auswertung der Referenzsensoren zeigte sich, dass die Sensoren A.P und A.G ausgefallen waren, sodass mit den verbleibenden Sensoren keine ausreichend sicheren Aussagen über die thermischen Gegebenheiten in der künstlichen Geologie getroffen werden können. Anhand der Sensoren D.P und D.G konnten aber wie oben gezeigt Aussagen zu den Umgebungseinflüssen getroffen werden.

## **9.14 AP 8b: Simulation Großversuch im Realmaßstab (IGS)**

### *Ziel*

Im Rahmen des AP 8b werden dreidimensionale, thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen des Großversuchs im Realmaßstab (AP 8a) für die aufgeprägten Lastszenarien sowie die vorhandenen geotechnischen und hydrogeologischen Randbedingungen durchgeführt. Die Simulation bietet die Möglichkeit der großskaligen Validierung der vollständig gekoppelten Berechnungen, im Besonderen der Effekte des Phasenwechsels und der mechanischen Beanspruchung der EWS. Die numerischen Berechnungen berücksichtigen hierbei unter anderem auch ggf. auftretende Dichteströmungen im Bereich der Aquifere, die zu einer Beeinflussung der Temperaturverteilung entlang der EWS führen können. Diese Effekte können durch die Temperatursensoren, die entlang der Bohrlochverfüllung angeordnet sind, direkt bewertet werden. Aufgrund der Länge der EWS im Verhältnis zu den mittelskaligen Versuchen sind Dichteströmungen im Realmaßstab ausgeprägter und damit besser detektierbar.

Die Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit infolge Temperaturdehnung am Übergang von der Ringraumverfüllung zum anstehenden Untergrund wird auch durch den absoluten Spannungszustand im Boden beeinflusst. Da sämtliche in diesem Projekt vorgesehenen Versuche sogenannte 1g-Versuche sind, wird bei der Simulation einer 30 m langen EWS ein Spannungszustand erreicht, der realen Randbedingungen entspricht. Die Korrelation der numerisch simulierten temperaturinduzierten Dehnung mit der in AP 8a beobachteten Veränderung der hydraulischen Wegsamkeit entlang der EWS validiert die Untersuchungen des AP 5b und generiert die Möglichkeit, für projektierte EWS die Gefahr von Wasserwegigkeiten zwischen dem Verfüllbaustoff und der Bohrlochwand infolge Temperaturdehnungen im Vorfeld abschätzen zu können.

### 9.14.1 Numerisches Modell

Die Geometrie des numerischen Modells besteht aus einer verfüllten Bohrung (160 mm Durchmesser) und 2 U-förmigen Sondenrohren (2 Vorlaufs- und 2 Rücklaufs Rohre). Das Verfüllmaterial ist von porösem Bodenmaterial zylinderförmig (280 mm Durchmesser) umgeben. Die

verfüllte Bohrung ist 30 m lang, und das poröse Medium ist in 3 verschiedene Schichten unterteilt, zwei 12 m lange Grundwasserschichten von oben und unten und eine 6 m lange undurchlässige Schicht in der Mitte, das System befindet sich in einem größeren wassergefüllte Zylinder (280 mm Durchmesser).

Das Modell verwendet die gleiche Physik wie AP5b, einschließlich Rohrströmung, Wärmeübertragung und Phasenwechsel. Das Modellnetz besteht aus 5.021.252 tetraedrischen Elementen (siehe Abbildung 198)

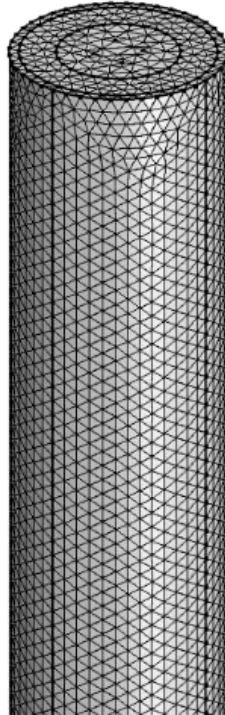


Abbildung 198: Modellnetz

#### 9.14.2 Ergebnisse des numerischen Modells

Das Modell simulierte ähnlich wie das Modell in AP8a 70 Betriebsstunden. Die verwendeten Randbedingungen wurden den Sensordaten von AP8a entnommen, leider gab es nur 8 Sensoren im Wasserbad, die zuverlässige Daten lieferten, wodurch die Möglichkeit eines Abgleichs der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen erheblich eingeschränkt wird.

Was die Vorlauftemperaturen betrifft, so wurden die Daten direkt vom Durchlaufkühler übernommen, welcher zuverlässige Daten liefert. Die im Modell verwendeten Materialeigenschaften ähneln den zuvor in AP5b verwendeten Materialien.

Leider wurden aufgrund der Größe des Experiments viele der Sensoren, die bereits im System eingebaut waren, bei der Installation der Erdwärmesonde beschädigt; die verbleibenden Sensoren sind in Abbildung 199 dargestellt

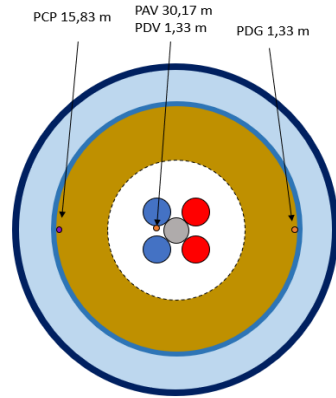


Abbildung 199: Sensorpositionen

Abbildung 200 bis Abbildung 203 zeigen die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen von AP8a. Abbildung 200 und Abbildung 201 zeigen die Sensoren PCP und PDG in einer Tiefe von 15,83 m bzw. 1,33 m. Diese Sensoren befinden sich am Rand der Bodenschicht nahe dem Wasserbad.

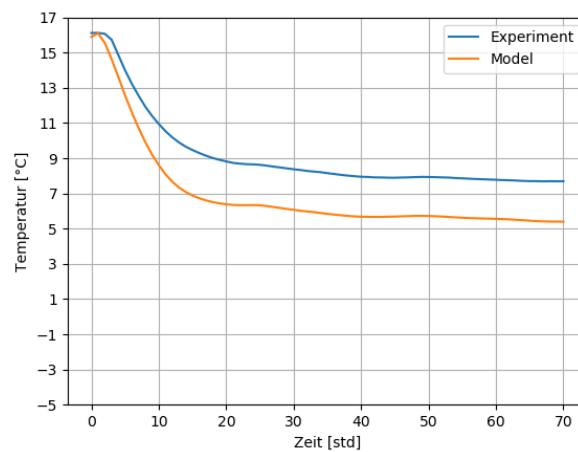


Abbildung 200: Sensor PCP (Tiefe: 15,83 m)

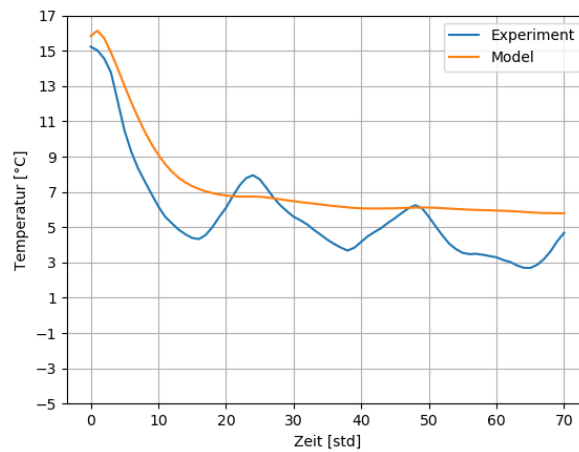


Abbildung 201: Sensor PDG (Tiefe 1,33 m)

Solites hat zwar versucht, die Temperatur im Wasserbad zu kontrollieren, aber aufgrund der Größe des Wärmetauschers und der geringen Anzahl von Sensoren im Wasserbad sowie der freien Konvektionsströmung im Wasser konnten im Versuch keine konstanten Temperaturrandbedingungen gewährleistet werden, ohne dass diese Randbedingungen messtechnisch erfasst wurden. Differenzen zwischen Experiment und Simulation sind daher unvermeidlich. Die Ergebnisse der numerischen Simulation liegen jedoch immer noch im erwarteten Temperaturbereich.

Abbildung 202 und Abbildung 203 zeigen die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Messungen der Sensoren (PAV, PDV). Da diese Sensoren näher am Füllmaterial und damit an den zuverlässigeren Randbedingungsdaten liegen, ergibt sich zwischen Simulation und Messung eine gute Übereinstimmung.

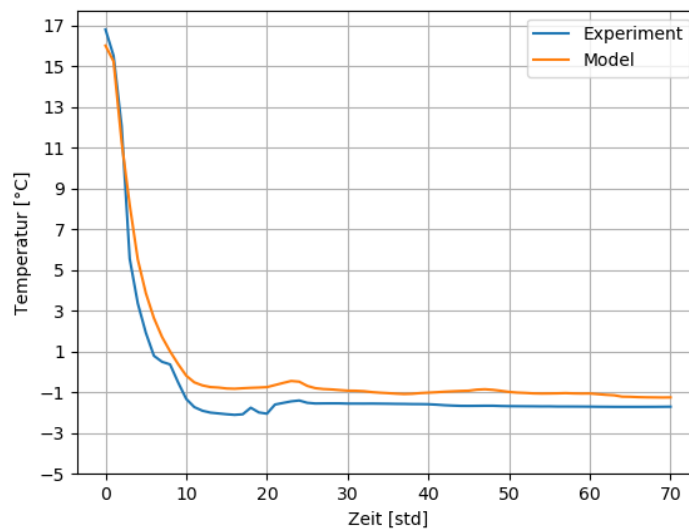


Abbildung 202: Sensor PAV (Tiefe 30,17 m)

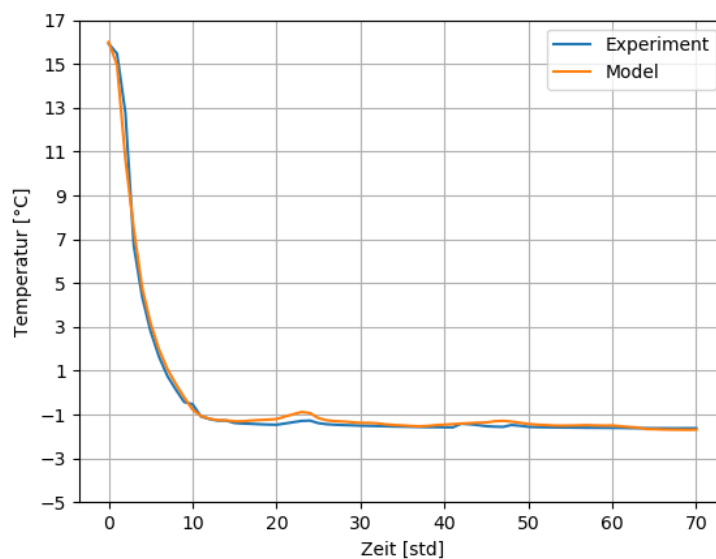


Abbildung 203: Sensor PDV (Tiefe 1,33 m)



Zusammenfassend ist festzustellen, dass es mit dem entwickelten numerischen Simulationsmodell möglich war, das von Solites in AP8a durchgeführte Experiment realitätsnah zu simulieren. Allerdings konnten im Rahmen des AP8a bei weitem nicht alle geplanten Temperaturmessungen durchgeführt bzw. nicht alle erforderlichen Temperaturmesswerte gewonnen werden, so dass ein weitergehender Abgleich zwischen Simulation und dem realen Verhalten nicht möglich war. Außerdem ist zu beachten, dass die Lage der Sondenrohre im Querschnitt über die Tiefe variiert so dass es auch aus diesem Grund zu Abweichungen zwischen Simulation und Messung kommen kann.

## 10 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Durch verschiedene Schadensfälle im Land Baden-Württemberg besteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Langzeit-Standsicherheit von Erdwärmesonden. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Bereitschaft von potentiellen Nutzern, eine solche Anlage installieren zu lassen. In Baden-Württemberg wurde in den Leitlinien „Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ des Landes Baden-Württemberg [1] daher die minimale Zulufttemperatur der EWS auf minus 3°C limitiert.

Die durchgeführten Experimente und die Ergebnisse des simulierten numerischen Modells zeigen, dass die Bodenschichten beim Betrieb der Erdwärmesonde bei einer Temperatur von minus 3 °C keinen Phasenwechsel erfahren, wodurch schädigende Strukturänderungen und damit negative Auswirkungen auf die hydraulische Barrierewirkung bindiger Bodenschichten zwischen getrennten Grundwasserleitern nicht zu besorgen sind.

Wenn die Zulufttemperatur jedoch für einige Stunden unter 0°C bleibt, kann es im Verfüllmaterial der Erdwärmesonde zu einem Phasenwechsel kommen, der zu Schäden im Verfüllmaterial führen kann. Da sich bei praxisnah hergestellten EWS die Sondenrohrpositionen zueinander über die Bohrlochtiefe stetig ändern, ist von folgendem Sachverhalt auszugehen: Die für eine Frostgefahr detektierten Worst-Case-Bedingungen (hohe räumliche Entfernungen von kalten und warmen Sondenrohren) treten nur streckenweise über die Bohrlochtiefe auf. Eine mögliche Frostbildung wird daher nur in kleineren Abschnitten der Bohrlochtiefe beginnen.

Das Ausmaß der Schäden im Verfüllmaterial wurde in AP5 mit Hilfe der Prüfung der hydraulischen Durchlässigkeit untersucht. Das Ergebnis zeigt eine sehr geringe Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit aufgrund der Temperaturänderung. Untersuchungen von Sahin et al. (2021) zu den Auswirkungen des Gefrierens von Beton zeigen jedoch, dass strukturelle Schäden in Betonproben mit hohem Wasser-Zement-Wert auftraten, aber auch, dass dieses Phänomen durch eine Minimierung der Zeit, in der die Erdwärmesonde bei einer Temperatur unter 0 °C betrieben wird, verhindert werden kann; je nach Wasser-Zement-Verhältnis des Materials kann diese Zeit zwischen einigen Minuten und mehreren Stunden liegen.

Der Feldversuch konnte belegen, dass die niedrigsten Temperaturen im horizontalen Bohrungsquerschnitt nahe der Oberfläche auftreten.

Zusammenfassend zeigen die Experimente in AP4 und AP8 sowie die numerischen Simulationen in AP5b, AP7 und AP8b, dass in den porösen Medien, die die Erdwärmesonde umgeben, kein Gefrieren auftritt, wenn die Zulufttemperatur auf -3 °C sinkt. Die Untersuchungen ergaben auch keine irreversiblen Schäden am Verfüllmaterial, allerdings wurden die langfristigen Auswirkungen von Gefrier-Tau-Zyklen auf das Verfüllmaterial nicht untersucht.

## 11 Veröffentlichungen, Wissenstransfer

### 11.1 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

keine

### 11.2 Vorträge

M. Mustafa, P. Buhmann, C. Moormann „Effect of free convection flow in water on frozen soil - an experimental and numerical study. “ in *12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 21.-22. January 2020, Ostfildern, 2020. [9]*

G. Giannelli und J. Braun, „Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich,“ in *Der Geothermiekongress (DGK) - 19.-21. November 2019, München, 2019. [31]*

G. Giannelli und J. Braun, „Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich,“ in *12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 21.-22. January 2020, Ostfildern, 2020. [32]*

Giannelli, *Qualyfing Exam: Frost-free operation of geothermal probes*, Stuttgart: ENWAT – International Doctoral Program Environment Water, 2020. [43]

G. Giannelli und J. Braun, „Vertiefte Evaluierung der „Minus 3 °C Grenze“ beim Betrieb von Erdwärmesonden,“ in *Fortbildungsverband Boden und Altlasten: Oberflächennahe Geothermie, 3. December 2020. , 2020. [44]*

J. Braun und G. Giannelli: Fachgespräch: „Durchlässigkeitsveränderungen durch Erdwärmesonden – Auswirkungen auf die Genehmigungssituation“ (13. Februar 2019, Offenburg)

J. Braun, G. Giannelli, M. Riegger, C. Moormann, P. Buhmann, M. Mustafa: „Vertiefte Evaluierung der „Minus 3 °C Grenze“ beim Betrieb von Erdwärmesonden – Validate Frost (L75 180 08/09/10)“, Statuskolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg (19.-20. April 2019, Fellbach).

### 11.3 Poster

G. Giannelli und V. Adams, „Einfluss von Frost-Tau-Wechseln auf Verpressmaterial (Poster),“ in *Der Geothermiekongress (DGK) 2019, 19.-21. November 2019, München, 2019. [30]*

## Literatur

- [1] Umweltministerium BadenWürttemberg, „*Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)*“, 2015.
- [2] M. Reuß et al., „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren“, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), FKZ 0327453A,“ 2012.
- [3] H. Anbergen, J. Frank, L. Müller und I. Sass, „Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties,“ *Geotechnical Testing Journal*, Bd. Issue 4, p. 37, 2014.
- [4] G. Giannelli und J. Braun, „Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde - EWS-Frost - (L75 14 011)“, VEGAS, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Technischer Bericht TB02/2016 (VEG 71),“ 2017.
- [5] H. F. J. M. L. & S. I. Anbergen, „): Prüfverfahren zur Frost-Tau-Wechselwiderstandsfähigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden,“ *Geothermische Energie Heft 75*, pp. 18-19, 2013.
- [6] M.-J. Setzer, „Frostschaden Grundlagen und Prüfung,“ *Beton- und Stahlbetonbau Heft 7*, pp. 350-359, 2002.
- [7] L. Müller, „Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden,“ *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe 07-08/2009*, 2009.
- [8] M. L. & P. A. J. Allan, „Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps,“ in *Proceedings World Geothermal Congress*, Kyushu – Tohoku, Japan, 2000.
- [9] H. Karrer, „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II Mit Beteiligung am IEA ECES Annex 27,“ ZAE Bayern , 2020.
- [10] Z. Zhang und Y. Liu, „Control of ice nucleation: freezing and antifreeze strategies,“ *The Royal Society of Chemistry 47*, pp. 7116-7139, 2018.
- [11] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *VDI 4640: Thermal use of the underground - Part 1: Fundamentals, approvals, environmental aspects*;, 2010.
- [12] DIN e.V. (Hrsg.), *DIN EN 60584-1:2014-07; Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1:2013); Deutsche Fassung EN 60584-1:2013*, 2013.
- [13] DIN e.V. (Hrsg.), *DIN EN 60751:2009-05 ; Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors (IEC 60751:2008); German version EN 60751:2008*.
- [14] C. A. Knight, *The freezing of supercooled liquids*, Van Nostrand Momentum Book, 1967.
- [15] M. J. Setzer, „Micro Ice Lens Formation, Artificial Saturation and Damage during Freeze Thaw Attack,“ in *Materials for Buildings and Structures, Volume 6*, Prof. F. H. Wittmann, 2000, pp. 175-182.
- [16] M. J. Setzer, „Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid,“ *Journal of Colloid and Interface Science 243*, p. 193–201, 24 September 2001.
- [17] S. J. Cooper, C. E. Nicholson und L. Jian, „A simple classical model for predicting onset crystallization temperatures on curved substrates and its implications for phase transitions in confined volumes,“ *The Journal of Chemical Physics 129*, 2008.

- 
- [18] G. W. Scherer, „Crystallization in pores,“ *Cement and Concrete Research* 29, 1998.
- [19] D. Han und R. Douglas Ferron, „Effect of mixing method on microstructure and rheology of cement paste,“ *Construction and Building Materials, Volume 93*, pp. 278-288, 15 September 2015.
- [20] T. C. Powers, „Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste,“ *Journal of the American Ceramic Society* 41, pp. 1-6, 1958.
- [21] T. C. Powers und T. L. Brownyard, „Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste,“ *Journal of the American Concrete Institute* 43, 1947.
- [22] R. F. Feldman und P. J. Sereda, „A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties,“ *Matériaux et Constructions* 1, pp. 509-520, 1968.
- [23] R. F. Feldman und P. J. Sereda, „A New Model for Hydrated Portland Cement and its Practical Implications,“ *Engineering Journal* 53, 1970.
- [24] H. M. Jennings und P. D. Tennis, „Model for the Developing Microstructure in Portland Cement Pastes,“ *Journal of the American Ceramic Society* 77, pp. 3161-3172, 1995.
- [25] P. D. Tennis und H. M. Jennings, „A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes,“ *Cement and Concrete Research* 30, pp. 855-863, 2000.
- [26] K. L. Scrivener, A. K. Crumbie und e. al., „The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete,“ *Interface Science* 12 (4), pp. 411-421, 2004.
- [27] L. Yue und H. Shuguang, „The microstructure of the interfacial transition zone between,“ *Cement and Concrete Research* 31, pp. 385-388, 2001.
- [28] A. Philappacopoulos und B. M.L., „Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps,“ *Geothermics*. 30(5), pp. 527-545, 2001.
- [29] VDZ, Verein Deutscher Zementwerke, Zement-Taschenbuch 2002, 2002.
- [30] G. Giannelli und V. Adams, „Einfluss von Frost-Tau-Wechseln auf Verpressmaterial (Poster),“ in *Der Geothermiekongress (DGK) 2019, 19.-21. November 2019*, München, 2019.
- [31] G. Giannelli und J. Braun, „Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich,“ in *Der Geothermiekongress (DGK) - 19.-21. November 2019*, München, 2019.
- [32] G. Giannelli und J. Braun, „Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich,“ in *12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 21.-22. January 2020*, Ostfildern, 2020.
- [33] G. u. B. J. Giannelli, „Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde - EWS-Frost - (L75 14 011)“, VEGAS, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Technischer Bericht TB02/2016 (VEG 71),“ 2017.
- [34] H.-J. G. Diersch, *Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*, Berlin: Springer, 2014.
- [35] H.-J. G. Diersch, D. Bauer, W. Heidemann, W. Rühaak und P. Schätzl, Finite element formulation for borehole heat exchangers in modeling geothermal heating systems by FEFLOW, In: DHI-WASY GmbH (Hrsg.): FEFLOW White Papers Vol. V, Berlin, 2010.

- 
- [36] VDI Gesellschaft, VDI-Wärmeatlas, Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [37] M. Plötze, „Thermophysical Properties of Bentonite,“ in *international meeting for Clays in natural & Engineered barriers for Radioactive waste confinement*, Lillie, France.
- [38] T. e. a. Naik, „Influence of Types of Coarse Aggregates on the Coefficient of Thermal Expansion of Concrete“, *Journal of Materials in Civil Engineering* 23, pp. 464-472, 2011.
- [39] VDI 4640 *Thermische Nutzung des Untergrunds - Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [40] C. Baier, *Doktorarbeit: "Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung"*, Aachen: RWTH Aachen University, 2008.
- [41] DIN e.V. (HRSG), *DIN 18130-1:1998-05, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche*, 1998.
- [42] Maxim Integrated Products, Inc, *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*, 2019.
- [43] Giannelli, *Qualifying Exam: Frost-free operation of geothermal probes*, Stuttgart: ENWAT – International Doctoral Program Environment Water, 2020.
- [44] G. Giannelli und J. Braun, „Vertiefte Evaluierung der „Minus 3 °C Grenze“ beim Betrieb von Erdwärmesonden,“ in *Fortbildungsverband Boden und Altlasten: Oberflächennahe Geothermie, 3. December 2020.* , 2020.
- [45] P. Adler, J. Thovert und V. Mourzenko, *Fractured Porous Media*, vol. 38, Oxford University Press, Oxford, 2012.
- [46] P. Witherspoon et al., „Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture,“ Lawrence Berkeley National Laboratory - LBNL - Paper LBL-9557, 1979.
- [47] E. Holzbecher, W. L. und M. Litz, „Modelling Flow through Fractures in Porous Media,“ in *Proceedings of the COMSOL Conference 2010*, Paris, 2010.
- [48] DIN e.V. (Hrsg.), *EN ISO 17892-1:2015-03 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts*.
- [49] DIN e.V. (Hrsg.), *DIN EN ISO 17892-2 | 2015-03 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 2: Bestimmung der Dichte des Bodens*.
- [50] W. P. e. al, „Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture“, Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL Paper LBL-9557, 1979.