

Abschlussbericht

Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde - EWS-Frost -

von

Giulia Giannelli, Jürgen Braun

Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und
Umweltsystemmodellierung

Förderkennzeichen: L75 14011

Laufzeit: 01.11.2014 - 31.12.2015

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Mai 2017



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	AUFBAU UND METHODEN	3
3	METHODENENTWICKLUNG ZUR ERMITTLUNG DES BEGINNS DER FROSTBILDUNG	8
4	DARSTELLUNG DER WICHTIGSTEN NATURWISSENSCHAFTLICH-TECH-NISCHEN ERGEBNISSE UND ANDERER RELEVANTER PROJEKTRESULTATE	9
4.1	Untersuchungen des Nahfeldes der EWS	9
4.1.1	Temperaturausbreitung im Nahbereich der EWS	9
4.1.2	Auswirkung des Strömungszustandes in der EWS auf die Temperaturausbreitung	10
4.1.3	Frostausbreitung im Nahfeld einer EWS	12
4.2	Untersuchungen innerhalb der EWS	13
4.2.1	Temperaturausbreitung in EWS bei transienter Strömung in Sondenrohren	13
4.2.2	Temperaturentwicklung innerhalb des EWS Kerns für $T = -2^{\circ}\text{C}$ und $T = 0^{\circ}\text{C}$	14
4.2.3	Temperaturentwicklung innerhalb des EWS Kerns für $-5^{\circ}\text{C} \leq T \leq -3^{\circ}\text{C}$	14
4.2.4	Einfluss von Reynoldszahl und Kühlleistung auf die Durchfrostung bei Zieltemperatur $T = -3^{\circ}\text{C}$	15
4.2.5	Einfluss des Kühlbetrieb auf die Durchfrostung bei Zieltemperatur $T = -3^{\circ}\text{C}$ mit turbulenter Strömung in Sondenrohren	16
4.3	Zusammenfassung und Fazit	19
5	ERREICHTE FORTSCHRITTE FÜR DIE WISSENSCHAFT UND/ODER TECHNISCHE ANWENDUNGEN	22
6	VORTEILE UND PRAKTISCHE ANWENDBARKEIT DER ERGEBNISSE	22
7	KONZEPT ZUM TRANSFER DER ERGEBNISSE AUF DIE ANWENDUNG	23
8	REFERENZEN	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der gezeigten Experimente	7
Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse (F/T = Frost-Tau-Wechsel)	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Draufsicht((Skizze) a) und Schnitt (b) des VEGAS-Großbehälters mit Darstellung bestehender Temperaturfühler (B1-B12), neuer im Nahbereich der EWS liegender Temperaturfühler (B20-B29) sowie der neuen EWS (zwischen neuen Temperaturfühlern)	3
Abbildung 2: a) Draufsicht des Großbehälters, b). Details des Nahbereichs der EWS)	4
Abbildung 3: Befestigung der inneren Temperaturfühler vor Verpressung (a, b, c). Befestigung der äußeren Temperaturfühler nach Verpressung der EWS (d, e, f)	5
Abbildung 4: Verpressung der Sonde am KIT (a,b). Einbau der EWS in das vorbereitete Bohrloch im VEGAS Großbehälter (c)	5
Abbildung 5: EWS – Querprofil. Temperaturmessebene der instrumentierten EWS im Querschnitt der Schicht „L“. Blau markiert: innere (I), äußere (O), oberstromige (U), unterstromige (D), und seitliche (S) Temperaturfühler). Orange markiert: DTS-Kabel.	6
Abbildung 6: der EWS – Vertikalprofil mit vier Temperaturmessebenen, eine für jede Aquiferschicht.	6
Abbildung 7: kleinskaliges Frostbildungsexperiment mit Probe aus Verfüllmaterial. Dielektrizitätskonstante (Wassersättigung) und Temperatur werden durch eine TDR-Sonde bzw. durch PT-100 Temperaturfühler gemessen	8
Abbildung 8: Temperatúrausbreitung in Schichten verschiedener Durchlässigkeit im Nahfeld einer EWS mit und ohne Grundströmung	10
Abbildung 9: Temperatúrausbreitung im Nahfeld, Vergleich turbulenter/laminarer EWS Durchströmung, stagnierendes Grundwasser	11
Abbildung 10: Temperatúrausbreitung im Nahfeld, Vergleich turbulenter/laminarer EWS Durchströmung, fließendes Grundwasser	11
Abbildung 11: Temperatúrausbreitung im Nahfeld der EWS bei Zulaufteperatur $T = -5^{\circ}\text{C}$	12
Abbildung 12: Temperatúrausbreitung im EWS-Verfüllmaterial bei transienter EWS-Strömung, Szenarien S3 (links) und S7 (rechts)	13
Abbildung 13: Vergleich der inneren Temperaturfühler der EWS für eine Zielzulaufteperatur von 0°C (S3, links) und von -2°C (S4, rechts)	14
Abbildung 14: Vergleich der inneren Temperaturfühler der EWS für Szenarien S5, S6 und S7 (Zielzulaufteperaturen $T = -3^{\circ}\text{C}$, $T = -4^{\circ}\text{C}$, und $T = -5^{\circ}\text{C}$) bei transienter Strömung in den Sondenrohren.	15
Abbildung 15: Einfluss von Kühlleistung und Reynoldszahl	16
Abbildung 16: Einfluss des Kühlbetriebs auf Durchfrostung des Hinterfüllmaterials	18

Kurzfassung

Frost-Tau-Wechsel beim Betrieb von Erdwärmesonden (EWS) kann zu einer Beschädigung des Hinterfüllmaterials der EWS und auch des umliegenden porösen Mediums führen. Um einer potentiellen Frostbildung in einer EWS vorzubeugen wird die minimale Zulauftemperatur der EWS auf minus 3°C begrenzt. Diese Minimaltemperatur wurde basierend auf Erfahrungswerten und numerischen Modellrechnungen festgelegt. Es liegen jedoch keine detaillierten experimentellen Untersuchungen von Temperaturgradienten und Temperaturisothermen innerhalb des Sondenraums vor, die diese Festlegung wissenschaftlich untermauern (hinterfragen) könnten.

In Abhängigkeit verschiedener Lastfälle lieferte eine neue EWS-Anlage im VEGAS-Versuchsbehälter durch ihre hochaufgelöste Instrumentierung erstmals zeitlich und räumlich aufgelöste Temperaturgradienten und Profile innerhalb und im Nahbereich einer EWS. Schwerpunkt der Untersuchungen war es festzustellen, unter welchen Bedingungen eine Frostbildung im Sondenraum stattfindet und ggf. Nutzungsszenarien abzuleiten, die einen frostfreien Betrieb der EWS sicherstellen.

Summary

During the utilization of borehole heat exchangers (BHE) freeze-thaw-cycles may cause damages to the injected grout of the BHE and also to the surrounding porous media. To prevent a potential freezing of a BHE, the minimum inflow temperature of the BHE is restricted to minus 3°C. This minimum temperature was defined based on experience and calculations of numerical models. However, no detailed experimental studies of temperature gradients and isotherms inside the BHE space are available to support (question) this regulation.

A new BHE, set up in one of the large VEGAS containers was equipped with temperature sensors at a high spatial resolution both within the BHE itself and within its immediate surroundings. Based on a number of loading cases this new set-up allowed for the first time for the detailed spatial and temporal investigation of temperature profiles and gradients in the BHE zone.

Focus of the study was to determine under which conditions a freezing of the BHE grout might occur and to describe possible utilization scenarios, which would ensure a frost-free use of the BHE.

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende, des Übergangs von fossilen Energieträgern und Kernenergie hin zu nachhaltigen Energiekonzepten, spielt die Nutzung geothermischer Energie eine wichtige Rolle. Auch unterstützt durch Fördermittel wurden im Land Baden-Württemberg in den letzten Jahren ca. 35 000 oberflächennahe Geothermieanlagen gebaut, deren potentielle Einwirkung auf die Umwelt untersucht und kontrolliert werden müssen, um eine nachhaltige und effiziente Anwendung zu gewährleisten. Mit Hilfe der Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS-EWS 2015) des Landes Baden-Württemberg sollen die Risiken nachteiliger Umwelteinflüsse dieser Anlagen auf Grund von Bohr- und Ausbauarbeiten minimiert werden.

Aus Gründen der Standsicherheit, der hydraulischen/thermischen Anbindung und des Umweltschutzes muss das Bohrloch nach Einbau der Sondenrohre mit geeignetem Verfüllmaterial verpresst werden. Die Standsicherheit muss dabei unter allen denkbaren Betriebsbedingungen sichergestellt werden. Nach Stand der Technik wird ein Bohrloch von unten nach oben verpresst. Der Verfüllbeton hat nach der Aushärtung eine geringe Wasserdurchlässigkeit um hydraulische Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Grundwasserleitern zu verhindern was z.B. zu Setzungen oder zu Verlagerung von Kontaminationen in vorher saubere Grundwasserleiter führen könnte. Weiterhin könnten bevorzugte Fließwege, wenn Anhydridschichten angeschnitten werden, Bodenhebungen verursachen.

Im Rahmen dieses Berichts wird die Summe aus Sondenrohren plus Verfüllmaterial als Erdwärmesonde (EWS) bezeichnet. Zur Untersuchung der Standsicherheit von EWS (und Nahfeld) müssen drei Hauptlastfälle betrachtet werden: LC1: „Bau/Einrichtung“, LC2 „Geochemische Beanspruchung durch den umgebenen Aquifer“ und LC3: „Betrieb“. LC1 und LC2 werden im Detail in der LQS EWS 2015 behandelt. Der Lastfall LC3 (Betrieb) ist der Fokus dieser Untersuchung.

Geothermieanlagen werden im Regelfall zur Deckung der Grundlaste ausgelegt. Zur Systemoptimierung und Effizienzsteigerung, insbesondere zur kurzzeitigen Deckung eines Spitzenbedarfs kann theoretisch der Einsatz eines Wärmeträgerfluid mit einer Temperatur auch unter dem Gefrierpunkt des Wassers (0°C) in Betracht kommen. Solch ein Lastfall kann jedoch Frostbildung und damit eine Expansion des Wasservolumens in den Poren des Hinterfüllmaterials verursachen. Der daraus entstehende Druckanstieg kann zu Spannungen und damit zu Veränderungen der Betonstruktur führen. Mikrorisse können sich ausbilden, die wiederum zur Entstehung bevorzugter Fließpfade entlang des Bohrlochs führen.

Um den Betrieb sicher frostfrei zu halten erlauben einige Genehmigungsbehörden lediglich Wasser als Trägerfluid. Im Land Baden-Württemberg ist die minimale Zulauftemperatur des Wärmeträgerfluids auf - 3°C festgelegt, um Frostbildung in der EWS und im Nahfeld zu verhindern. Nachdem derzeit keine detaillierten experimentellen Untersuchungen von Temperaturgradienten und Isothermen innerhalb der EWS und des Nahfeldes vorliegen, die diese Festlegung wissenschaftlich untermauern (hinterfragen) könnten, sollten diese Fragen im Technikumsmaßstab detailliert adressiert werden.

In VEGAS wurde dazu eine EWS in einen großen (L x B x H = 9m x 6m x 4,5m) künstlichen, ungespannten Aquifer eingebaut. Sowohl die EWS (im Hinterfüllmaterial) als auch der Aquifer

fer in unmittelbarer Sondennähe wurde mit Temperaturfühlern mit hoher räumlicher Auflösung ausgestattet. In Abhängigkeit verschiedener Lastfälle lieferte dieser neue Versuchsaufbau durch seine hochaufgelöste Instrumentierung erstmals detaillierte zeitlich und räumlich aufgelöste Temperaturgradienten und -profile innerhalb und im Nahbereich einer EWS. Außerdem war konnte aufgezeigt werden unter welchen Bedingungen eine Frostbildung im EWS-Hinterfüllmaterials und des anliegenden Aquifers wahrscheinlich ist.

2 Aufbau und Methoden

Die Untersuchungen wurden im VEGAS-Großbehälters (L x B x H: 9 m x 6 m x 4,5 m) in einem ungespannten, geschichteten Aquifer durchgeführt. Der Aquifer hat eine durchschnittliche Porosität von 0,32 und besteht aus vier Schichten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten (Abbildung 1); bestehend, von unten, aus einer Mittelsand-, einer Grobsand-, einer Feinsand- und wieder einer Mittelsandschicht. Der Grundwasserspiegel befindet sich ca. 50 cm unter Gelände. Untersuchungen sind sowohl bei stagnierendem als auch bei fließendem Grundwasser möglich. Die horizontale Grundwasserströmungsrichtung (Abbildung 1) wird mittels Fluss- bzw. Festpotentialrandbedingung (Zu- bzw. Abfluss) kontrolliert.

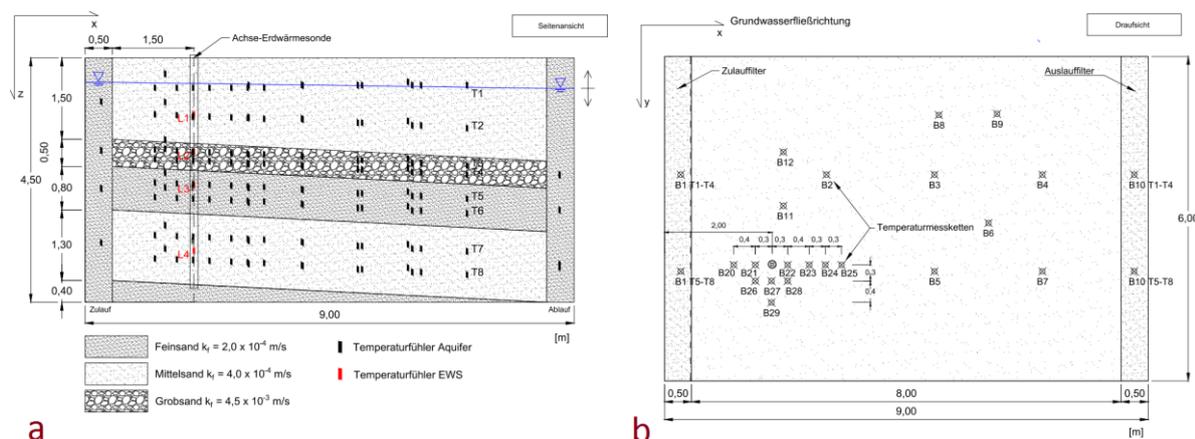


Abbildung 1: Draufsicht((Skizze) a) und Schnitt (b) des VEGAS-Großbehälters mit Darstellung bestehender Temperaturfühler (B1-B12), neuer im Nahbereich der EWS liegender Temperaturfühler (B20-B29) sowie der neuen EWS (zwischen neuen Temperaturfühlern)

Als Grundwasser wird Trinkwasser verwendet, das über einen Wärmetauscher durch die Kühlwasserversorgung der Universität Stuttgart gekühlt werden kann. Bei den gezeigten Experimenten beträgt die Zulauftemperatur in den Versuchscontainern ca. 8,5°C. Durch die relativ geringe Strömung, durch das große Versuchsvolumen und durch Randeinflüsse (Labortemperatur) stellen sich im Untersuchungsraum die in Tabelle 1 dargestellten Anfangstemperaturen ein.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „geomatrix.bw“ (Bisch et al, 2014) waren 96 Pt-100 Temperaturfühler (12 Messlotrechte mit jeweils 8 Tiefen) bereits im Behälter eingebaut worden. Für die anstehenden Untersuchungen wurden weitere 80 Pt-100 (in 10 Messlotrechten) im Nahbereich der neuen EWS so platziert (Abbildung 1b), dass von jeder Messlotrechten jeweils zwei Temperaturfühler pro Aquiferschicht angeordnet sind.

Eine 4,5 m lange EWS wurde extern hergestellt und in ein speziell gebohrtes Bohrloch im VEGAS-Aquifer eingebaut. Nachdem der Aquifer aus Sand aufgebaut war und im gesättigten Sand keine Kohäsionskräfte auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass der Ringraum nach dem Ziehen der Verrohrung von Sand geschlossen und eine gute Anbindung der EWS an den Aquifer erreicht wurde. Zur Herstellung der EWS wurden Doppel-U-Sondenrohre aus Pe-XA (Dext = 32mm, s = 2,9mm; RAUGEO Sonde Pe-Xa – Hersteller: REHAU) verwendet. Die Rohre wurden in ein PE-Rohr (150mm) eingebaut, zentriert und

nach Transport nach Karlsruhe im Versuchsstand des KIT mit „Schwenk EWM-Plus“ im Kontraktorverfahren verpresst (Abbildung 4).



Abbildung 2: a) Draufsicht des Großbehälters, b) Details des Nahbereichs der EWS)

Dies ermöglichte eine genaue Verteilung von 32 Pt-100 Temperaturfühlern innerhalb des EWS-Querschnitts und am Übergang EWS – Nahfeld (Abbildung 3, Abbildung 5). Vor dem Verpressen wurden Temperaturfühler an vorab bestimmten Punkten an den Rohrabstandhaltern befestigt. Nach Aushärtung des Betons und Transport der EWS nach Stuttgart wurden weitere Temperaturfühler entlang der Außenwand der EWS befestigt. Von den 32 Temperaturfühlern wurden jeweils sechs auf vier Tiefen verteilt (Abbildung 5, Abbildung 6) dargestellt. Zusätzlich wurden, zur Bestimmung des Temperaturgradienten Rohr – Aquifer, jeweils vier Sensoren auf zwei Niveaus (Mitte von Grobsand- und von Feinsandsschicht) angebracht (insgesamt 8 PT100, nicht in Abb. dargestellt). Somit standen pro Aquiferschicht sechs bzw. 10 Temperaturfühler zur genauen Messung der Temperaturverteilung zur Verfügung.

Zusätzlich wurde ein DTS-Kabel (Distributed Temperature Sensing) mit einer Auflösung von 0,5 m als Doppel-Loop innerhalb der gesamten Sonde entlang eines U-Rohrs sowie direkt außerhalb der Sonde angebracht (Kooperation mit Roman Zorn, EIFER).

Abbildung 5 zeigt einen repräsentativen Querschnitt der Erdwärmesonde mit einem Durchmesser von 150 mm. Pt-100 Temperaturfühler sind mit blauen Punkten markiert. Es wird zwischen inneren Temperaturfühlern "I" (zwischen Sondenrohren) und äußeren Temperaturfühlern "O" (Grenzfläche EWS – Aquifer) unterschieden.

Zwei ETR-Tests (enhanced thermal response), unter Nutzung eines Heizdrahts im DTS-Kabel, wurden durchgeführt, um die Wärmeleitfähigkeit des Systems zu charakterisieren: Zuerst ohne Grundströmung (ETRT1) und dann mit einer Grundströmung mit Abstandsgeschwindigkeit $v_a = 0,61$ m/d (ETRT2). Die Temperatur entlang der DTS-Kabel wurde basierend auf dem Raman-TDR Verfahren gemessen. Dazu wurden Laserimpulse in die Glasfaser gesandt und die temperaturabhängige Ramanstreuung zeitaufgelöst von den DTS-Instrumenten hinsichtlich Intensität und Laufzeit ausgewertet.

Die in den Untersuchungen ermittelten durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten waren für stagnierendes Grundwasser (ETRT1) $\lambda_{\text{eff}} = 3,4$ W/m/K und für fließendes Grundwasser

(ETRT2) $\lambda_{\text{eff}} = 4,8 \text{ W/m/K}$. Die Werte sind unrealistisch hoch, was daran liegt, dass der Auswertung die „Linear Source Theorie“ zugrunde liegt, die im VEGAS-Aquifer nur beschränkt anwendbar ist. Der Quotient der Leitfähigkeiten kann jedoch als richtig angenommen werden und zeigt, dass die Wärmeabfuhr durch die Grundströmung erhöht wurde.

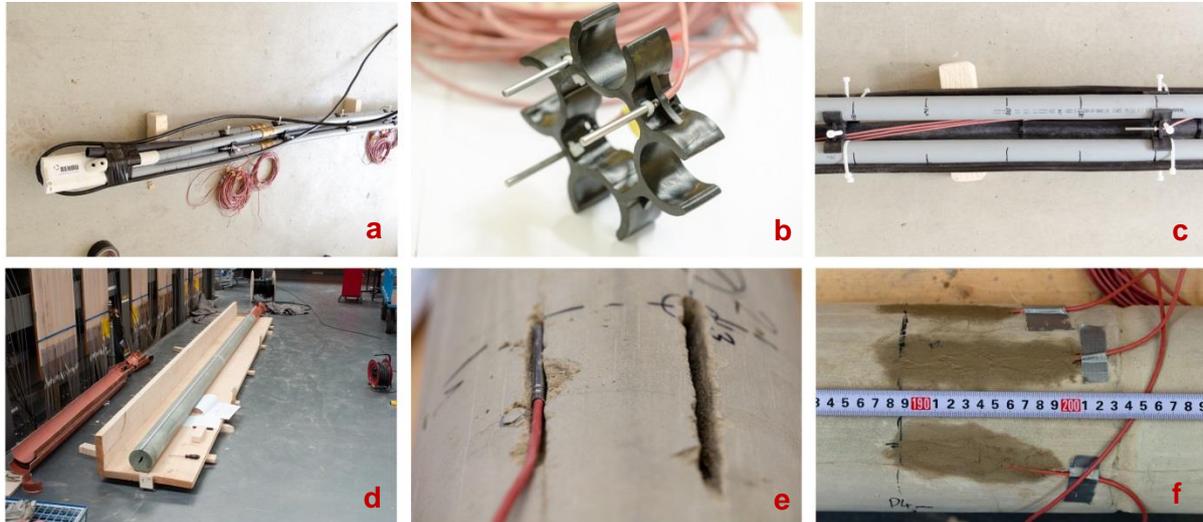


Abbildung 3: Befestigung der inneren Temperaturfühler vor Verpressung (a, b, c). Befestigung der äußeren Temperaturfühler nach Verpressung der EWS (d, e, f)

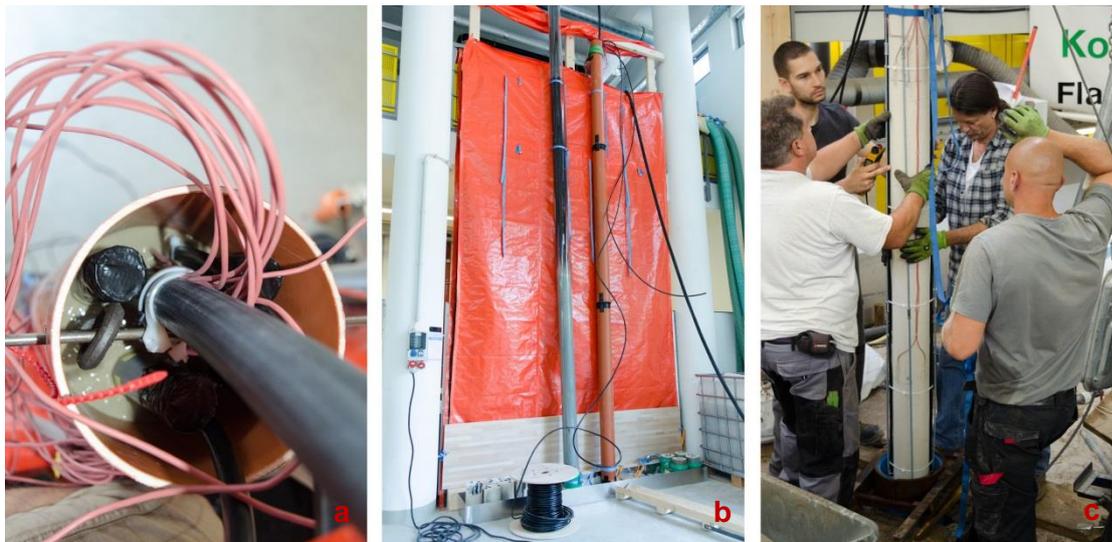


Abbildung 4: Verpressung der Sonde am KIT (a,b). Einbau der EWS in das vorbereitete Bohrloch im VEGAS Großbehälter (c)

Die Zulauftemperatur des Wärmeträgerfluids in die Sonde wurde durch einen Thermostat „Unichiller 020 Tw“, Kühlleistung max. 2 kW, kontrolliert. Die Rohrleitungen zwischen Thermostat und EWS wurden isoliert und der Zustrom des Wärmeträgerfluids wurde mittels zweier Ventile gleichmäßig zwischen den beiden U-Loops aufgeteilt. Dadurch konnten in allen Rohren die gleichen Reynoldszahlen sichergestellt werden. Zusätzlich wurde der Durchfluss jeden Loops mittels eines MIDs (magnetic inductive detectors, Krohne) gemessen und aufgezeichnet.

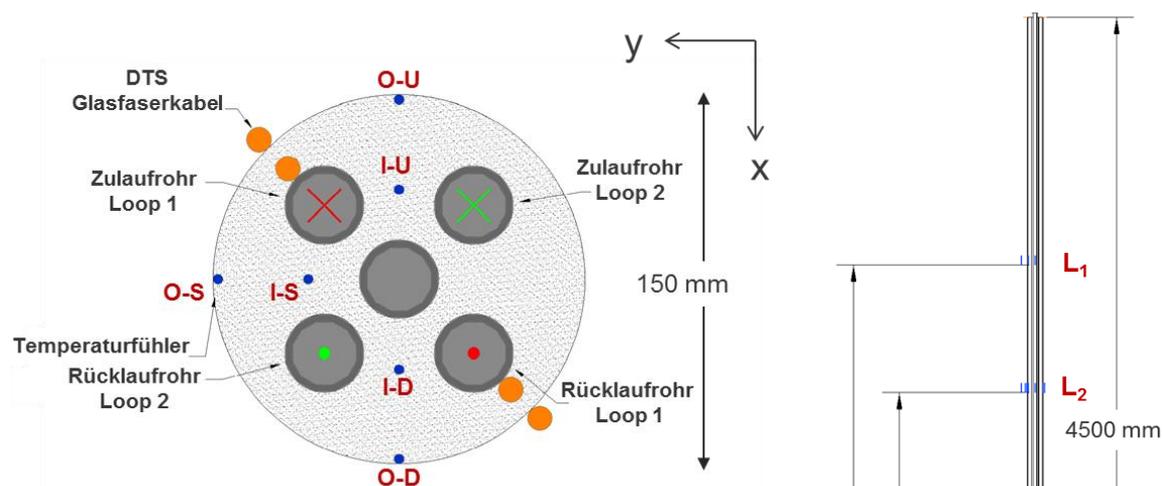


Abbildung 5: EWS – Querprofil. Temperaturmessebene der instrumentierten EWS im Querschnitt der Schicht „L“. Blau markiert: innere (I), äußere (O), oberstromige (U), unterstromige (D), und seitliche (S) Temperaturfühler). Orange markiert: DTS-Kabel.

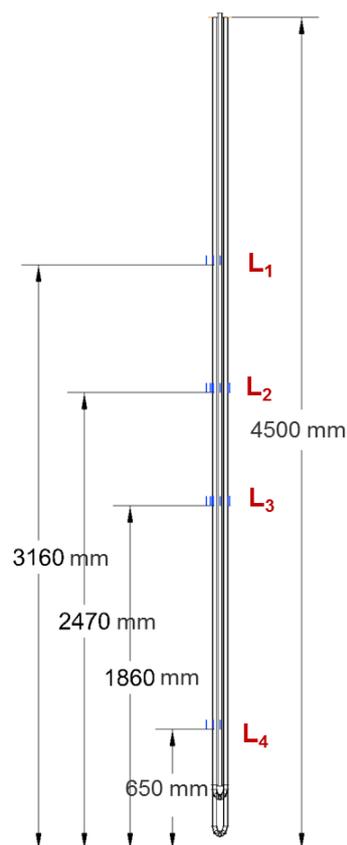


Abbildung 6: der EWS – Vertikalprofil mit vier Temperaturmessebenen, eine für jede Aquiferschicht.

Weitere Temperaturfühler waren am Thermostat (Ausfluss des Wasserbads) und in den Zu- und Ausflussrohre der EWS installiert.

Im Rahmen des Vorhabens wurden vierzehn Versuche durchgeführt; auf Grund der Anmerkungen der Gutachter wurde die Gesamtzahl der Experimente auf zwanzig erhöht. Die nachfolgend diskutierten Experimente sind mit den jeweiligen Betriebs- und Randbedingungen in Tabelle 1 zusammengefasst. Dabei entspricht die Nummerierung nicht der zeitlichen Abfolge der Experimente sondern der Reihenfolge in der sie diskutiert werden.

Die Experimente wurden mit und ohne Grundwasserströmung durchgeführt. Die Initialtemperatur im Aquifer wurde vor jedem Experiment als durchschnittliche Temperatur aller dort vorhandenen Temperaturfühler ermittelt. Sie wird von der Grundwasserströmung und auch leicht von jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur im VEGAS Labor beeinflusst. Die Kühlleistung des Thermostats war für Szenarien 1 bis 7 auf 600 W und für Szenarien 8 bis 12 auf 2 kW eingestellt. Dies hatte einen direkten Einfluss auf die Abkühlungszeit der Zulauf-temperatur (an den Gradienten in nachfolgenden Abbildungen klar zu erkennen). Bedingt durch die Pumpleistung des Thermostats lagen die Reynolds-Zahlen zwischen $Re = 2460$ und $Re = 4130$, und somit lagen einige Experimente im transienten Bereich zwischen laminar und turbulent.

Die Szenarien S1 – S11 wurden bei kontinuierlichem Kühlbetrieb durchgeführt, bei S12 wurde diskontinuierlich gekühlt (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenfassung der gezeigten Experimente

Szenario	Reynolds- zahl in EWS Rohren	EWS – Zielzulauf- temperatur [°C]	Kühlleistung des Thermostats [kW]	GW- Strömung** v_a [m/d]	Initial- temperatur in Aquifer [°C]	Labor- temperatur min / max*** [°C] / [°C]	Dauer	Beginn
S1	3900	0	0,6	0	ca.14,0	15 / 20,3	ca.168	23/01/2015
S2	4100	0	0,6	0,43	ca.14,0	15 / 20,8	ca.288	22/01/2016
S3	3000	0	0,6	0	ca.16,0	15,1 / 20,8	ca.168	23/11/2015
S4	2800	-2	0,6	0	ca.14,0	16 / 20,7	ca.336	18/02/2016
S5	3300	-3	0,6	0	ca.14,5	17,5 / 21,9	ca.144	11/11/2015
S6	2550	-4	0,6	0	ca.14,0	15,9 / 21,5	ca.144	30/10/2015
S7	2400	-5	0,6	0	ca.16,0	18,2 / 22,5	ca.144	09/10/2015
S8	4130	-3	2 (100%)	0	ca.14,0	16,7 / 21,3	ca. 216	10/01/2017
S9	3300	-3	2 (100%)	0,75	ca.14,5	20,2 / 28,0	ca. 240	23/05/2016
S10	4130	-3	2 (100%)	0,75	ca.14,0	16 / 20,7	ca. 166	15/12/2016
S11	4100	-3	2 (100%)	0	ca. 16,0	16,9 / 21	ca.72	04/11/2016
S12*	4100	-3	2 (100%)	0	ca.14,5	17,7 / 22	ca.255	20/10/2016

*) Bei **Versuch S12** wurde bei einer Gesamtlauzeit von 265 Stunden insgesamt **4 Szenarien mit diskontinuierlichem Betrieb** gefahren, a), b), c) mit Zulauftemperatur -3°C, und d) mit Zulauftemperatur -2,5°C (alle anderen Versuchsbedingungen wurden dabei nicht geändert):

- S12a, 0<t<171h: 2,5 Stunden Kühlung, 0,5 Stunden Erholung, 57 Zyklen
- S12b, 171h<t<192h: 2,5 Stunden Kühlung, 1 Stunden Erholung, 6 Zyklen
- S12c, 192h ≤ t<217h: 2,5 Stunden Kühlung, 2,5 Stunden Erholung, 5 Zyklen
- S12d, 217h ≤ t<265h: 2,5 Stunden Kühlung, 2,5 Stunden Erholung, 9 Zyklen

**) v_a ist die durchschnittliche Abstandsgeschwindigkeit basierend auf dem Gesamtdurchfluss, dem Gesamtquerschnitt und einer durchschnittlichen Porosität des Versuchsbehälters. Das heißt, die Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen Schichten sind davon unterschiedlich.

***) **Labortemperatur:** min / max Werte während Szenario, gemessen an Geländeoberkante, x-y Koordinaten des Sensors wie B9

3 Methodenentwicklung zur Ermittlung des Beginns der Frostbildung

Eine direkte Kopplung des Beginns der Eisbildung an den Temperaturverlauf ist insofern nicht möglich als dieser Zeitpunkt zum einen nicht notwendigerweise mit einer Temperatur von exakt 0°C zusammenfällt und zum anderen sich auf Grund der latenten Wärme beim Übergang von Flüssigphase (Wasser) zu Festphase (Eis) ein Temperaturplateau ausbilden kann. Aus diesem Grund wurden kleinskalige Betonproben (V 140 - 300 cm³, L ~ 8 cm, D = 5 - 7 cm), die in etwa den Querschnittsdimensionen einer EWS entsprachen, sowohl mit einem Temperatursensor als auch mit einem TDR (Time Domain Reflectometry) Sensor ausgestattet und von außen nach innen (eingetaucht in Wasserbad) mit einer Rate von - 0,5 K/h gekühlt. Eine TDR-Sonde misst die Dielektrizitätskonstante, die bei flüssigem Wasser 20-mal höher als bei gefrorenem Wasser ist.

Die rote Kurve in Abbildung 7 zeigt das schnelle Absinken der Dielektrizitätskonstante während der Frostbildung (Umwandlung flüssiges Porenwasser in Eis). Die hellblauen Punkte zeigen die Temperaturen im Probekörper; diese wurden in Vier-Minuten-Intervallen aufgezeichnet. Nach dem sogenannten „super-cooling“ ist, gleichzeitig mit dem Absinken der Dielektrizitätskonstante, ein plötzlicher Temperaturanstieg zu beobachten. Dies zeigt die „Keimbildung“, den ersten Schritt bei der Bildung einer neuen thermodynamischen Phase. Mit anderen Worten: der erste Eiskristall entsteht und die Frostbildung beginnt. Diese Temperaturspitze ist somit ein Anzeichen von Frostentwicklung im Verfüllmaterial der EWS und kann somit als Basis für die Auswertung der weiteren Experimente verwendet werden. Es ist anzumerken, dass hiermit lediglich der Beginn der Frostbildung bestimmt werden kann. Aussagen über Frostschäden (Risse etc.) können mit diesem Verfahren nicht gemacht werden.

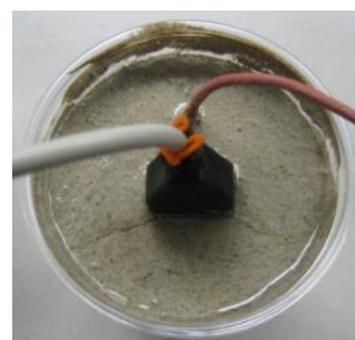
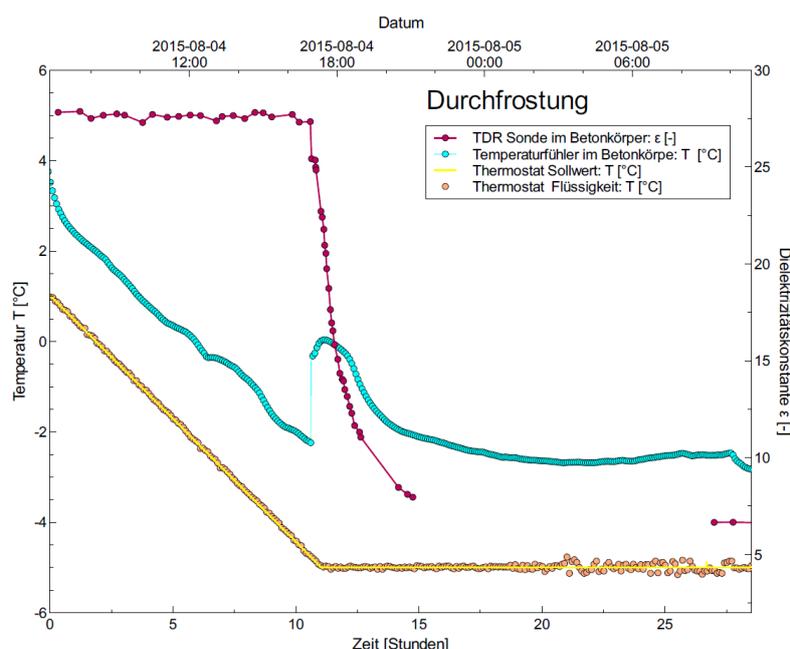


Abbildung 7: kleinskaliges Frostbildungsexperiment mit Probe aus Verfüllmaterial. Dielektrizitätskonstante (Wassersättigung) und Temperatur werden durch eine TDR-Sonde bzw. durch PT-100 Temperaturfühler gemessen

4 Darstellung der wichtigsten naturwissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer relevanter Projektergebnisse

4.1 Untersuchungen des Nahfeldes der EWS

4.1.1 Temperaturentzug im Nahbereich der EWS

Abbildung 8 zeigt die Temperaturentzug der Szenarien 1 und 2 innerhalb und im Nahfeld der EWS über die Versuchsdauer von 168 h (7 Tage) anhand ausgewählter Temperaturentzugsensoren in der Grobsandschicht (L2) und der darunterliegenden Feinsandschicht (L3). Randbedingung der Versuche waren Zulaufstemperatur $T = 0^\circ\text{C}$ und stationäres (S1) bzw. fließendes (S2) Grundwasser. Dargestellt ist die Zulaufstemperatur am Sondenkopf, die Temperaturentzungen des Temperaturentzugsensors „O-D“ (EWS-Rand) am unterstromigen Übergang von Verfüllmaterial zur Bodenmatrix sowie die Temperaturentzungen der oberstromigen (B21), seitlichen (B27 und B29) und unterstromigen (B22, B23, B24 und B5) Temperaturentzugsensoren.

In Abbildung 8a und Abbildung 8b ist die Temperaturentzug in der Grobsandschicht L2 und der darunterliegenden Feinsandschicht L3 des Referenzszenarios S1 dargestellt. Die Abkühlung ist, wie erwartet, in beiden Schichten nahezu identisch. Bei ruhendem Grundwasser ist die Temperaturentzug im Wesentlichen durch konduktiven Wärmetransport (Wärmeleitung) bestimmt. Bei gleichen Materialien (Quarzsand), gesättigten Verhältnissen (Wasser) und ähnlichen Porositäten ist somit auch ein ähnlicher konduktiver Wärmetransport in unterschiedlichen Schichten zu erwarten. Der Temperaturentzugverlauf von B23 und B29, jeweils 70 cm von der EWS entfernt, veranschaulicht die radialsymmetrische Temperaturentzugverbreitung um die Sonde. Der radiale Einflussbereich des Wärmeentzugs liegt bei diesen Versuchsbedingungen bei weniger als 130 cm.

S2 wurde bei aktiver Grundwasserströmung mit einer mittleren Abstandsgeschwindigkeit von $v_a = 0,43 \text{ m/Tag}$ durchgeführt. Abbildung 8c und Abbildung 8d zeigen die Temperaturentzugverbreitung in der Grobsand- und Feinsandschicht (L2 und L3). Der Vergleich mit S1 zeigt deutlich, dass in der Grobsandschicht nun keine radialsymmetrische Temperaturentzugverbreitung mehr stattfindet. Die oberstromige Temperaturentzugverbreitung verringert sich, dafür bildet sich eine ausgeprägte nach unterstrom ausgerichtete Temperaturentzugverfahne. Dies verdeutlichen in Abbildung 8c die vom Rand der EWS äquidistanten Temperaturentzugsensoren B21, B22 und B27 (oberstromig, seitlich, unterstromig) bzw. B23 und B29 (seitlich, unterstromig). Der oberstromige Temperaturentzugsensor B21 ist stark von der temperierten (gekühlten) Grundwassertemperatur und kaum vom Betrieb der EWS beeinflusst. Der Temperaturentzugfühler B29 wird nur noch marginal vom Wärmeentzug beeinflusst und von der Temperaturentzugverfahne kaum erreicht. Die Temperaturentzugverbreitung in S2 wird durch konvektiven Wärmetransport dominiert, der wie erwartet auf Grund der höheren hydraulischen Durchlässigkeit der Grobsandschicht (L2) dort deutlicher ausgeprägt ist als in der Feinsandschicht (L3). Die Grundströmung führt unterstromig (B22, B23, B24, B25 und B5) zu einem erhöhten Einflussbereich des Wärmeentzugs durch die der EWS.

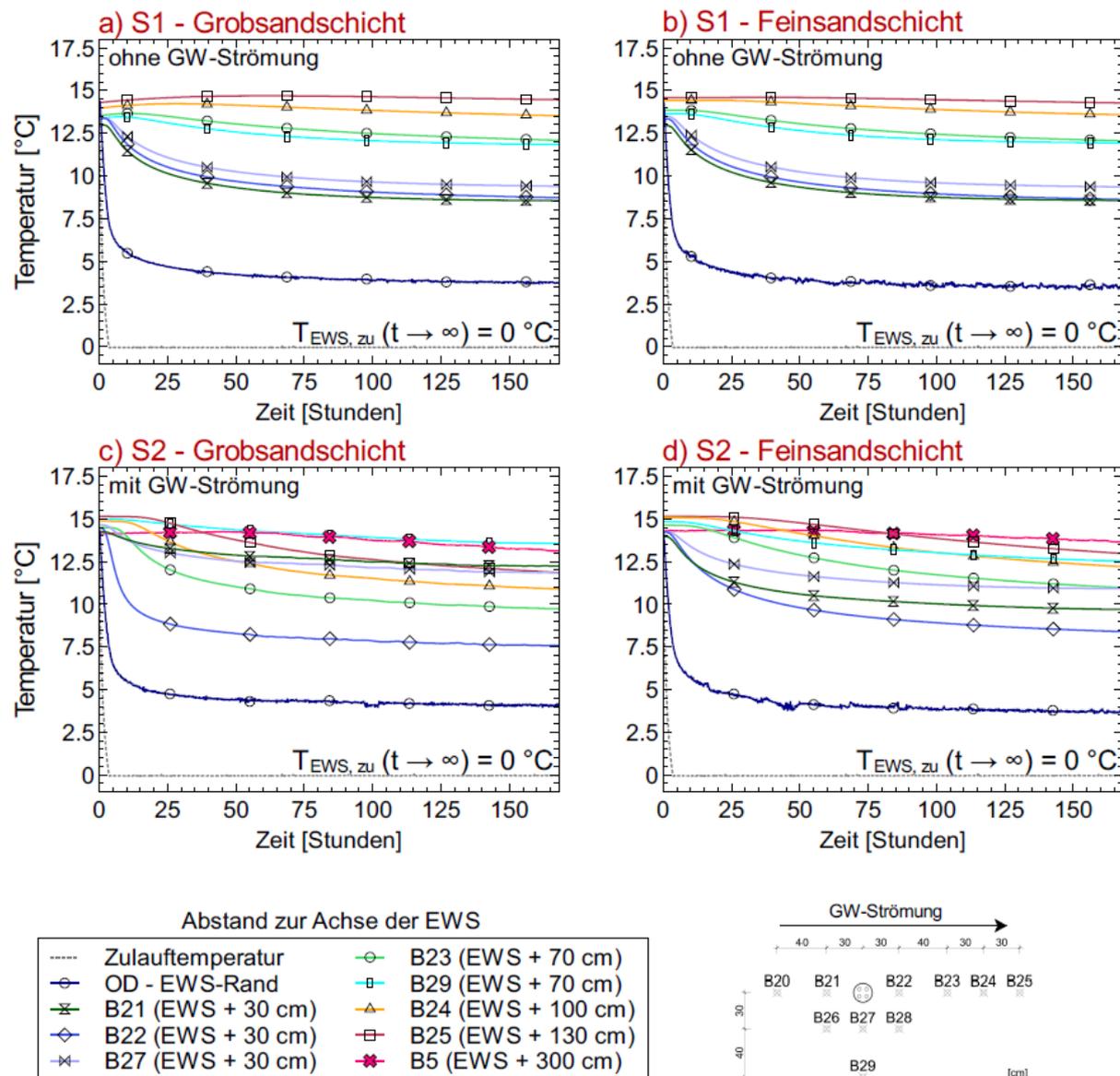


Abbildung 8: Temperatursausbreitung in Schichten verschiedener Durchlässigkeit im Nahfeld einer EWS mit und ohne Grundströmung

4.1.2 Auswirkung des Strömungszustandes in der EWS auf die Temperatursausbreitung

Die Auswirkungen von turbulenter gegenüber transienter Strömung in der EWS auf die Temperatursausbreitung wurde in den Szenarien S5, S8 für stagnierendes Grundwasser (Abbildung 9) und in den Szenarien S9 und S10 für fließendes Grundwasser (Abbildung 10) untersucht. Die entsprechenden Randbedingungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Abbildungen zeigen, dass - unabhängig von der Grundwasserströmung (stagnierend oder fließend) - die Temperatursausbreitung im Nahfeld einer EWS weitestgehend unabhängig vom Strömungszustand innerhalb der EWS ist. Dies gilt jedoch nicht für die Temperatursausbreitung innerhalb des Verfüllmaterials (siehe dazu 4.2).

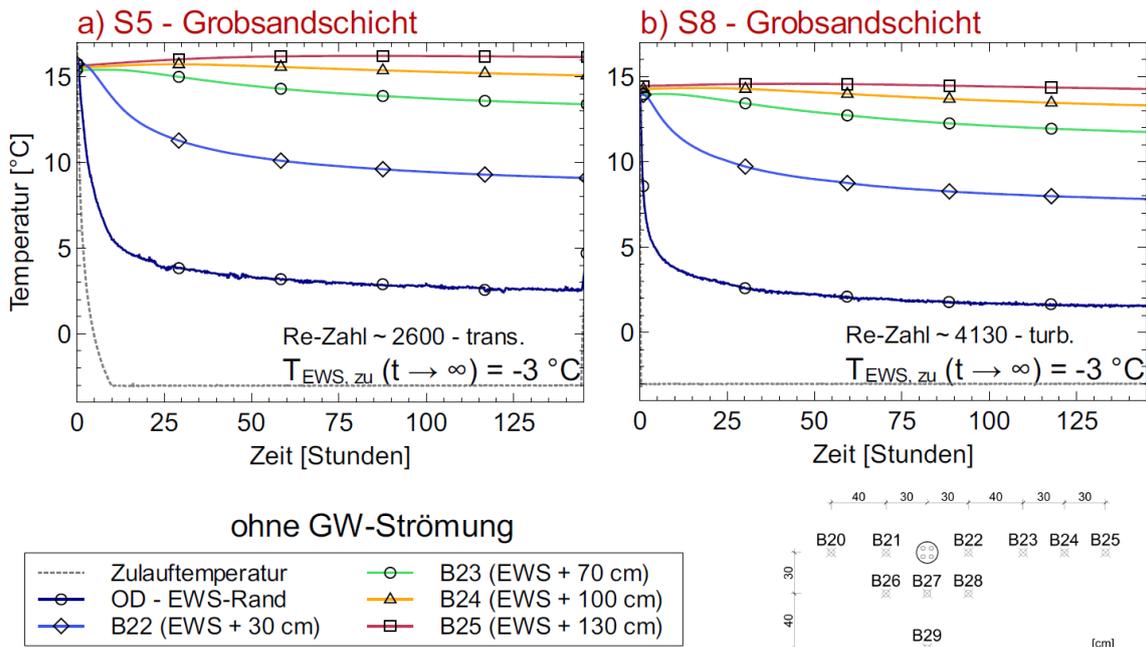


Abbildung 9: Temperaturentwicklung im Nahfeld, Vergleich turbulenter/laminarer EWS Durchströmung, stagnierendes Grundwasser

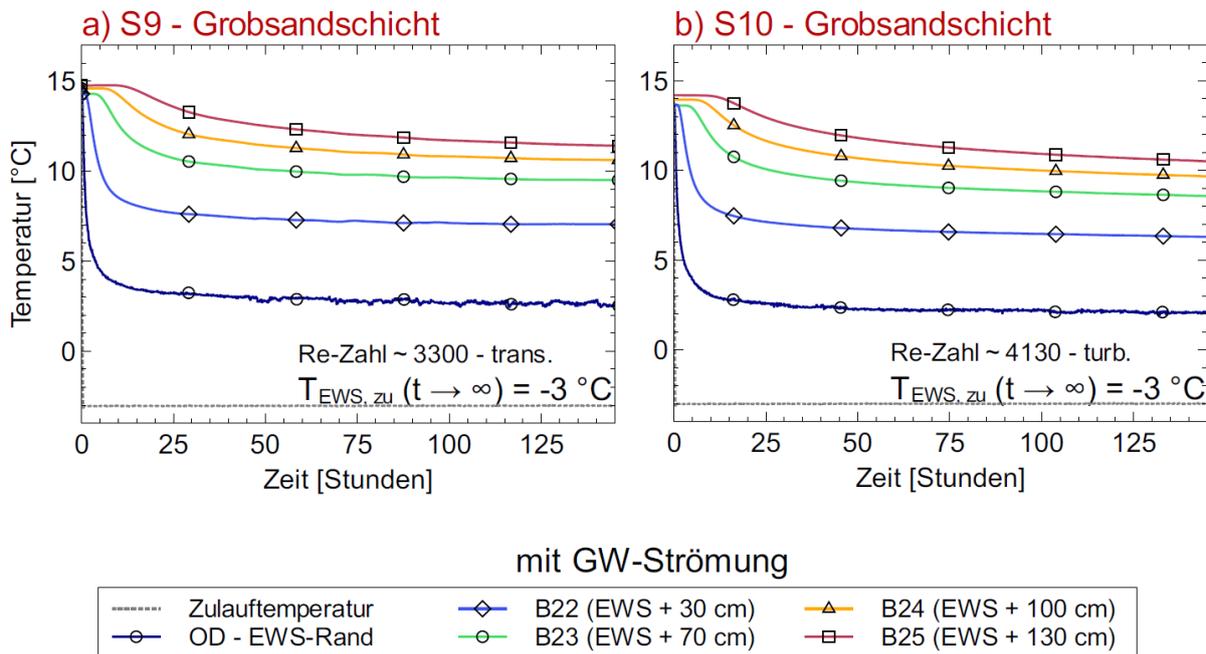


Abbildung 10: Temperaturentwicklung im Nahfeld, Vergleich turbulenter/laminarer EWS Durchströmung, fließendes Grundwasser

4.1.3 Frostausbreitung im Nahfeld einer EWS

Mehrere Versuche wurden zur Frostausbreitung im Nahfeld einer EWS durchgeführt. Abbildung 11 zeigt Ergebnisse von Szenario S7 (transiente EWS-Strömung bei Zulauftemperatur von -5°C , limitierte Kühlleistung, Initialtemperatur in Aquifer ca. 16°C , keine Grundwasserströmung). Während der Dauer des Experiments ($t = 144\text{Std.}$, 6 Tage) konnte keine Frostausbreitung im Nahbereich der EWS beobachtet werden. Selbst die Sonde am Übergang EWS-Aquifer zeigte nach dieser Zeit noch Temperaturen größer null Grad an.

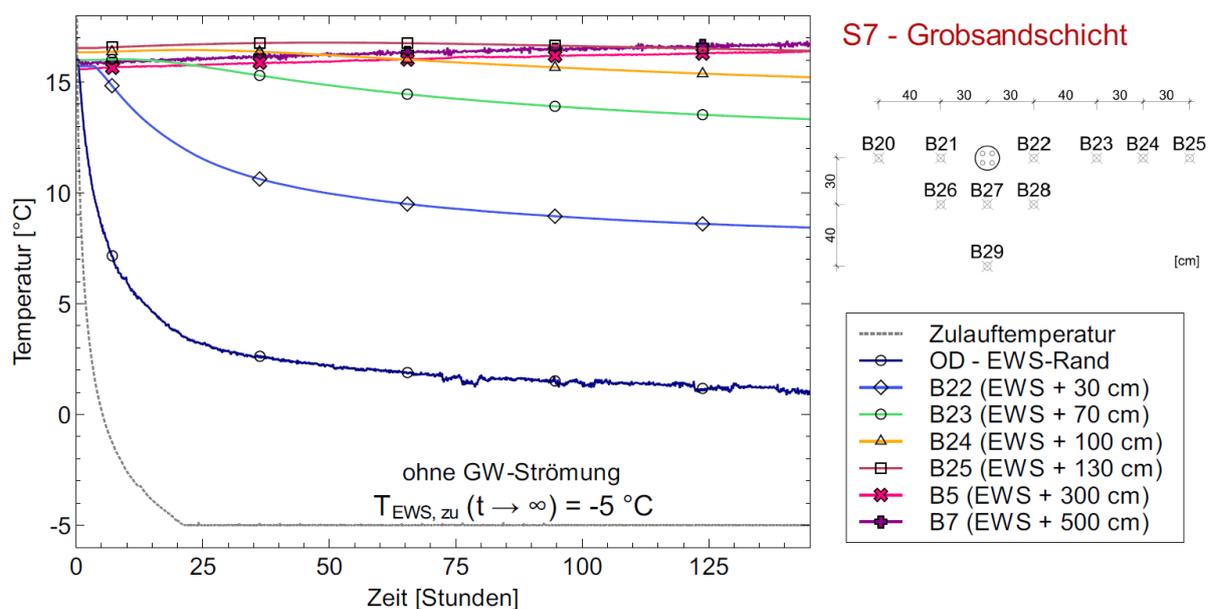


Abbildung 11: Temperaturausbreitung im Nahfeld der EWS bei Zulauftemperatur $T = -5^{\circ}\text{C}$

Die vorgestellten Untersuchungen wurden mit folgenden Initial- und Randbedingungen durchgeführt:

- transiente Strömungsbedingungen im Sondenrohr (langsamere, ineffizientere Energieübertragung),
- die Kühlleistung des Thermostats nicht maximiert (geringe zeitliche Verzögerung, kaum Prozess/Ergebnis relevant),
- Grundwasser stagnierend (Es kann davon ausgegangen werden, dass fließendes Grundwasser auf Grund des Energieeintrags eine Durchfrostung nicht begünstigt),
- Anfangstemperatur im Großbehälter war ca. 3 bis 4 K über durchschnittlicher Grundwassertemperatur (dies sollte eine zeitliche Verzögerung der Temperaturprofilausbildung mit sich bringen mit entsprechendem Einfluss auf die beobachteten Prozesse/Ergebnisse).
- Sondenbetrieb kontinuierlich (diskontinuierlicher Betrieb eher entlastend)
- Dauerbetrieb über mehrere Wochen (Temperaturgradient ging bereits gegen null, stationäre Bedingungen waren aber noch nicht erreicht)

Vor einer endgültigen Bewertung dieser Untersuchung sollten diese den Untersuchungen zugrundeliegenden Anfangs- und Randbedingungen näher beleuchtet werden.

4.2 Untersuchungen innerhalb der EWS

4.2.1 Temperaturentbreitung in EWS bei transienter Strömung in Sondenrohren

Abbildung 12 zeigt die Temperaturentbreitungen im EWS-Querschnitt für die Szenarien S3 ($T_{EWS, zu} [t \rightarrow \infty] = 0 \text{ °C}$) und S7 ($T_{EWS, zu} [t \rightarrow \infty] = -5 \text{ °C}$) bei transienter Strömung im EWS-Rohr ($Re = 3000$ bzw. 2400). Wie an der Steigung des ersten Teils der Temperaturkurve zu erkennen ist, dauerte eine gewisse Zeit, die Zieltemperatur des Fluid (-5 °C) zu erreichen (Kühlleistung des Thermostats). Aufgrund der kurzen Rohrlänge ($4,5 \text{ m}$) der EWS beträgt der Temperaturunterschied (ΔT) zwischen Zu- und Auslauf zwischen $0,35 \text{ °C}$ und $0,5 \text{ °C}$. Daher kann innerhalb eines beliebigen EWS-Querschnitts, zumindest für stagnierendes Grundwasser, eine quasi-symmetrische Temperaturentbreitung angenommen werden.

In den gezeigten, wie auch in allen anderen durchgeführten Experimenten, verblieb nach sechs Tagen des EWS-Betriebs zwischen den inneren und den äußeren Temperaturentfühlern, obwohl diese nur ca. 3 cm voneinander entfernt liegen, ein signifikanter Temperaturunterschied ($dT \sim 3K$) und damit ein Gradient von $dT/dx \sim 0,8 \text{ K/cm}$.

Während in Szenario S3 ($T_{EWS, zu} [t \rightarrow \infty] = 0 \text{ °C}$) die Temperaturen erwartungsgemäß im gesamten Querschnitt über 0 °C bleiben erreichen in Szenario S7 ($T_{EWS, zu} [t \rightarrow \infty] = -5 \text{ °C}$) die innen liegenden Temperaturentfühler negative Temperaturen und Eisbildung kann beobachtet werden. Auffallend ist jedoch, dass selbst bei EWS-Zielzulauftemperaturen von -5 °C die Temperaturentfühler am Rande des Bohrlochs immer Temperaturwerte über 0 °C zeigen, was die weiter oben aufgestellte „no-frost“ Aussage für den Nahbereich unterstützt. Es kann daher geschlossen werden, dass bei transienter Strömung in der EWS Frostbildung nur innerhalb des Kerns der EWS stattfindet, wo sich die Einflüsse aller vier Sondenrohre überlagern.

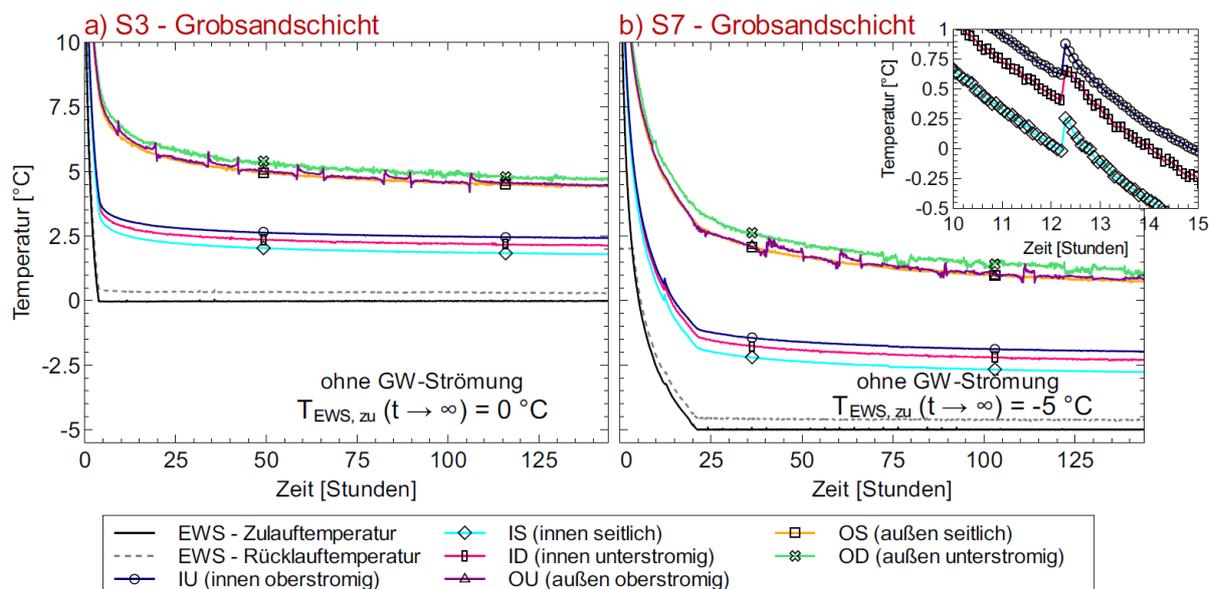


Abbildung 12: Temperaturentbreitung im EWS-Verfüllmaterial bei transienter EWS-Strömung, Szenarien S3 (links) und S7 (rechts)

4.2.2 Temperaturentwicklung innerhalb des EWS Kerns für $T = -2^{\circ}\text{C}$ und $T = 0^{\circ}\text{C}$

Abbildung 13 zeigt die Temperaturentwicklung im Kern des Verfüllmaterials der EWS für verschiedene Tiefen. Nachdem die Untersuchungen bei stagnierendem Grundwasser durchgeführt wurden, kann angenommen werden, dass die Temperaturentwicklung nicht nur radialsymmetrisch, sondern auch unabhängig von der anstehenden Aquiferdurchlässigkeit stattfindet. Somit wurde die Darstellung pro Aquiferschicht auf einen inneren Temperaturfühler (Sensor I-D) je Querschnitt beschränkt. Zusätzlich wird die, für beide Loops identische, Temperatur in Zu- und Auslauf sowie die Fließgeschwindigkeit in den Sondenrohren dargestellt. Selbst nach 12 Tagen konstanten Kühlbetriebs bei -2°C konnte im Verfüllmaterial keine Frostbildung nachgewiesen werden.

Für transiente EWS-Strömung ist ein Betrieb bei $T = -2^{\circ}\text{C}$ somit als sicher einzustufen.

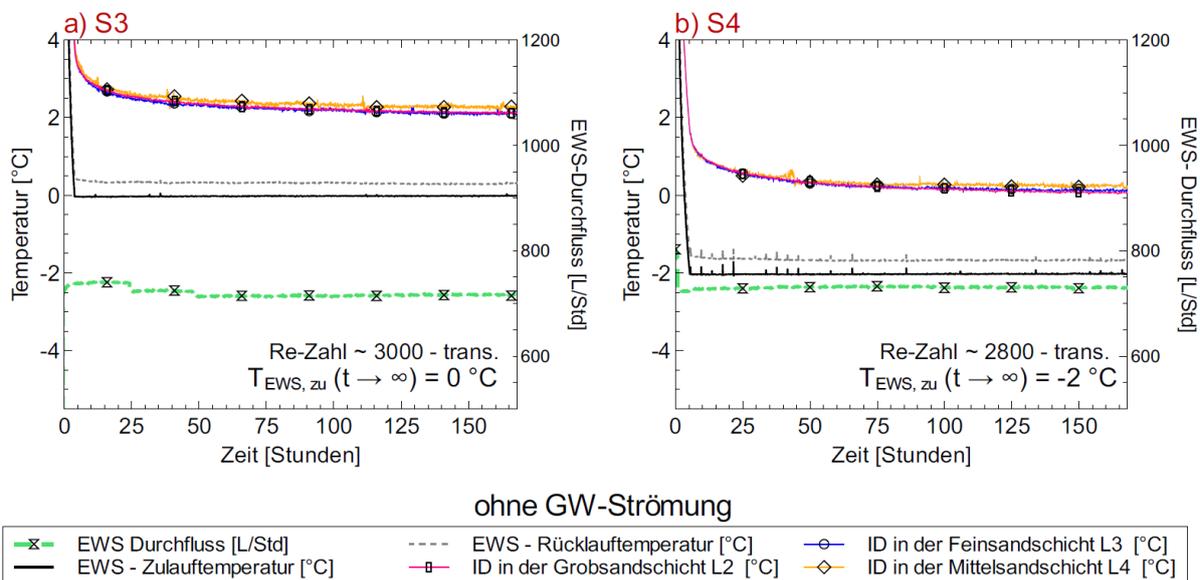


Abbildung 13: Vergleich der inneren Temperaturfühler der EWS für eine Zielzulauftemperatur von 0°C (S3, links) und von -2°C (S4, rechts)

4.2.3 Temperaturentwicklung innerhalb des EWS Kerns für $-5^{\circ}\text{C} \leq T \leq -3^{\circ}\text{C}$

Wenn die Zielzulauftemperaturen auf -3°C , -4°C und -5°C verringert werden zeigen die Temperaturkurven der inneren Temperaturfühler Spitzen (Abbildung 14), das heißt, Frostbildung im Kern der EWS beginnt. In den Szenarien 6 und 7 (Zielzulauftemperatur $T = -4^{\circ}\text{C}$ bzw. $T = -5^{\circ}\text{C}$) war der Zeitpunkt der Keimbildung (Erscheinen von Eis in den Poren) nach ca. 10 bzw. 12 Stunden, wenn eine Zulauftemperatur von ca. $T = -3,5^{\circ}\text{C}$ erreicht war. In Szenario 5 (Zulauftemperatur -3°C) stellte sich die Frostbildung erst nach ca. 100 Stunden (~ 4 Tagen) ein, bzw. 90 Stunden nach Erreichen der Zieltemperatur von -3°C .

Dies zeigt, dass selbst unter transienten Strömungsbedingungen in den Sondenrohren ein Betrieb mit einer Zielzulauftemperatur von $T \leq -4^{\circ}\text{C}$ innerhalb weniger Stunden zu Frost im Verfüllmaterial führt; bei turbulenter Strömung ist der Effekt verstärkt. Ein EWS Betrieb mit einer Zielzulauftemperatur von $T \leq -4^{\circ}\text{C}$ ist somit als nicht frostsicher einzustufen.

Eine endgültige Aussage hinsichtlich des Betriebs bei $T = -3\text{ °C}$ konnte basierend auf diesen Szenarien noch nicht getroffen werden, daher wurden weitere Untersuchungen bei einer Zielzulauftemperatur bei veränderten Randbedingungen durchgeführt.

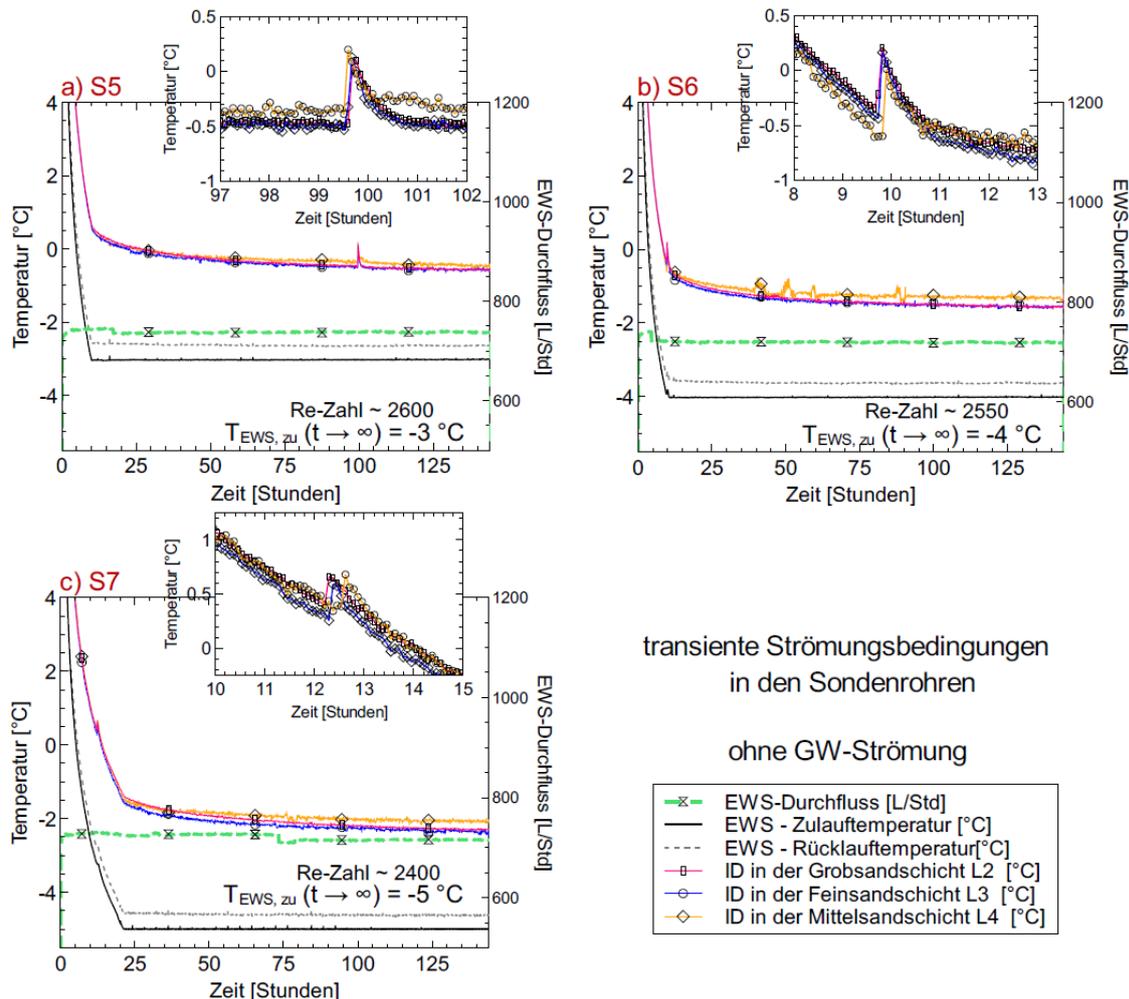


Abbildung 14: Vergleich der inneren Temperaturfühler der EWS für Szenarien S5, S6 und S7 (Zielzulauftemperaturen $T = -3\text{ °C}$, $T = -4\text{ °C}$, und $T = -5\text{ °C}$) bei transienter Strömung in den Sondenrohren.

4.2.4 Einfluss von Reynoldszahl und Kühlleistung auf die Durchfrostung bei Zieltemperatur $T = -3\text{ °C}$

In den Szenarien S8 und S11 (Abbildung 15) wurde der Thermostat auf maximale Kühlleistung gestellt, so dass die Zieltemperatur in der Sonde sofort erreicht wurde. Gleichzeitig wurde die Strömungsgeschwindigkeit in den Sondenrohren erhöht um turbulente Verhältnisse ($Re = 4130$) zu erreichen Um ein „worst-case-szenario“ zu erhalten wurden die Versuche bei kontinuierlichem Betrieb der EWS und ohne Grundströmung durchgeführt. Ein Vergleich dieser Szenarien mit S5 (Abbildung 14) zeigt, dass bei turbulenter Strömung und maximaler Kühlleistung die Temperaturspreizung zwischen Zu- und Auslauf der EWS-Rohre verringert wird. Gleichzeitig setzt im Verfüllmaterial nun bereits nach 21 Stunden (S8) bzw 13 Stunden (S11) Frostbildung ein ($t_{\text{Frost}(S5)} = 100$ Stunden).

Es konnte somit gezeigt werden, dass der Strömungszustand in den EWS-Rohren (Reynolds-Zahl) einen großen Einfluss auf die Temperaturentwicklung und damit den Zeitpunkt der Frostbildung innerhalb des Verfüllmaterials hat.

Der Betrieb einer EWS bei $T = -3\text{ °C}$ kann somit bei Betrachtung eines Worst-Case-Szenarios potentiell zu Frostbildung im Verfüllmaterial führen.

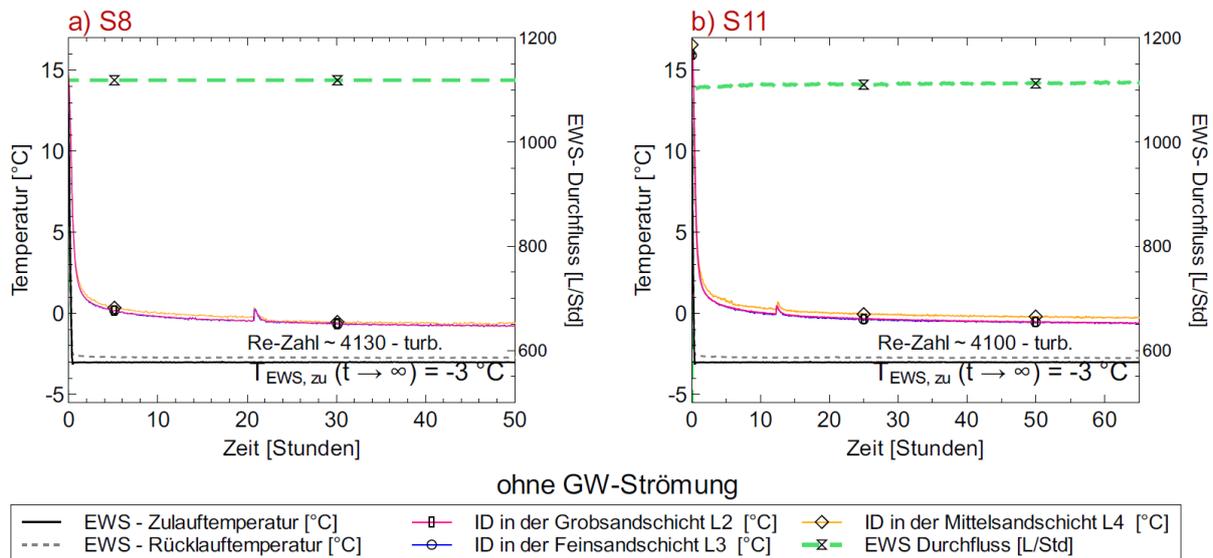


Abbildung 15: Einfluss von Kühlleistung und Reynoldszahl

4.2.5 Einfluss des Kühlbetrieb auf die Durchfrostung bei Zieltemperatur $T = -3\text{ °C}$ mit turbulenter Strömung in Sondenrohren

Erdwärmesonden werden in der Regel abhängig vom Bedarf diskontinuierlich mit wechselnden Ein-/Auszeiten betrieben. Für Szenario 12 wurden dieselben worst-case Bedingungen wie bei den oben diskutierten S8/S11 eingestellt. Der Einfluss diskontinuierlichen Betriebs wurde anhand von vier Lastfällen untersucht. Bei Szenario S12a wurde die EWS 171 Stunden im Wechselbetrieb (2,5 Stunden Kühlung, 0,5 Stunden Erholung) gefahren. Bei konstanten Kühlintervallen wurden während der nächsten 21 Stunden (Szenario S12b) die Relaxationsintervalle auf 1,0 Stunde und in den darauf folgenden 25 Stunden (Szenario S12c) auf 2,5 Stunden erhöht. Bei Szenario S12d wurden die ein/aus-Zeiten von S12c beibehalten, jedoch die Zulaufftemperatur auf $-2,5\text{ °C}$ erhöht.

Bei Szenario 12a (Abbildung 16; 2,5 Std. ein / 0,5 Std. aus, 57 Zyklen) bildet sich, wie bei den Szenarien S8 und S11 bereits nach kurzer Zeit (13 Stunden, 5 Zyklen) Eis im Porenraum des Verfüllmaterials. Danach sinkt die Sondentemperatur weiterhin langsam, die Sonde bleibt gefroren, die Relaxationszeit reicht nicht aus, das Eis zu tauen.

Nach 171 Stunden wurden die Relaxationszyklen auf 1 Stunde verlängert (Szenario 12b, Abbildung 16b). Bereits während des ersten Relaxationszyklus konnte ein Auftauen der EWS beobachtet werden; in den darauf folgenden fünf Zyklen wurde ebenfalls jeweils ein Frost-Tau-Wechsel nachgewiesen. Ein weiteres Absinken der Minimaltemperatur war kaum mehr nachweisbar.

192 Stunden nach Beginn des Experiments wurde die Relaxationszeit auf 2,5 Stunden erhöht (Szenario 12c, Abbildung 16c). Während der darauf folgenden 25 Stunden konnte ein leichter Anstieg der Minimaltemperatur gemessen werden. Der Gefrierzeitpunkt innerhalb der Zyklen verschob sich dabei; z.T. konnte keine Frostbildung nachgewiesen werden. Dieser Fall kann somit als Grenzfall zwischen gefrieren und nicht gefrieren betrachtet werden.

Für Szenario S12d (Abbildung 16d) wurden die Ein-/Ausschaltintervalle beibehalten, dabei wurde die Zulauftemperatur auf $-2,5^{\circ}\text{C}$ erhöht. Für dieses Szenario konnte keine Frostbildung nachgewiesen werden. (Nach 240 Stunden wurde die Relaxationszeit systembedingt einmalig um eine 1,5 Stunden verkürzt, was deutlich in der verminderten Temperatur am Ende der Relaxationszeit ersichtlich ist.)

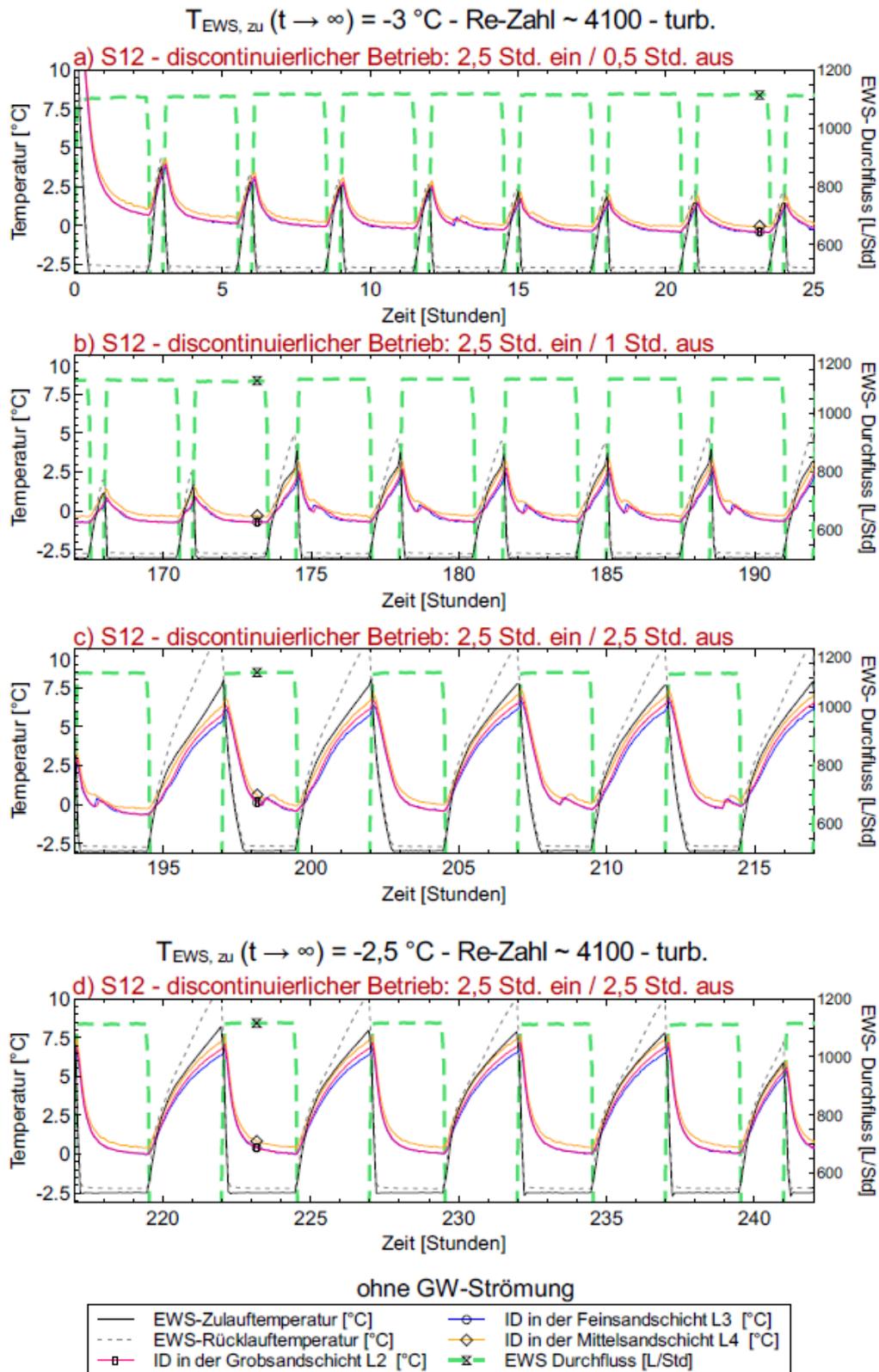


Abbildung 16: Einfluss des Kühlbetriebs auf Durchfrostung des Hinterfüllmaterials

4.3 Zusammenfassung und Fazit

Parallele Temperatur- und TDR-Messungen an einem Betonprobekörper zeigen eine direkte Korrelation des Beginns der Eisbildung (Keimbildung) mit einem lokalen, kurzzeitigen Temperaturanstieg (Temperaturspitze). Somit konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen eine Methode entwickelt werden, mit Hilfe derer erstmals die Eisbildung innerhalb einer EWS für verschiedene Szenarien experimentell nachgewiesen werden konnte. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Keimbildung im Zentrum der Sonde (zwischen den Sondenrohren) stattfindet. Ob diese Eisbildung zu Schäden an der EWS führt, und wenn ja, wie diese Schäden aussehen, konnte im Rahmen der Experimente nicht nachgewiesen werden, da dies einen Ausbau der Sonde erfordert hätte. In kleinskaligen Rinnenexperimenten (hier nicht dargestellt) bei denen ähnliche Temperaturganglinien gefahren wurden, konnte ein Zusammenhang zwischen Keimbildung und strukturellen Schädigungen des Hinterfüllmaterials (Rissbildung) gezeigt werden. Diese Experimente sind, aufgrund des unterschiedlichen Drucks, jedoch nicht direkt übertragbar, da sich bei der EWS das umliegende Aquifermaterial auf Grund des passiven Erddrucks stabilisierend auf die Sonde auswirken wird und damit die Rissbildung vermindern (verhindern?) könnte.

Ein VEGAS Großbehälter mit einem Schichtaquifer unterschiedlicher Durchlässigkeiten wurde mit einer extern hergestellten EWS sowie einem dichten Netz von PT100 Temperaturfühler in deren Nahfeld ausgestattet. Die EWS wurde dann mit unterschiedlichen Zulaufszszenarien betrieben (Leistung der Kühlanlage, Zulauftemperatur und Strömungsverhältnisse im Sondenrohr, Kühlbetrieb) und deren Einfluss auf den Nahbereich der Sonde sowie das Verfüllmaterial der Sonde betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

1. Bei Zulauftemperaturen zwischen 0°C und -2 °C (S1, S2, S3, S4) konnte, unabhängig von den weiteren Randbedingungen, im Verfüllmaterial keine Frostbildung nachgewiesen werden.
2. Bei Zulauftemperaturen von -3 °C und *transienten* Strömungsbedingungen in der Sonde wurde bei unterschiedlicher Kühlleistung des Thermostats (0,6 kW, 2kW) eine Frostbildung erst nach 100 (94) Stunden Dauerbetriebs nachgewiesen (S5, S9). Dieser Lastfall kommt in der Praxis wohl äußerst selten vor.
3. Bei Zulauftemperaturen von -3 °C, *turbulenten* Strömungsbedingungen in der Sonde, stagnierendes Grundwasser, maximaler Kühlleistung wurde eine Frostbildung nach 21/13 Stunden Dauerbetrieb (S8/S11) nachgewiesen.
4. Wenn bei den in 3) beschriebenen Bedingungen eine Grundwasserströmung angelegt wurde, stellte sich im Verfüllmaterial bereits nach 4 Stunden Dauerbetrieb (S10) Frost ein.
5. Wenn die EWS bei den in 3) beschriebenen Bedingungen intermittierend betrieben wird, dann gefriert die Hinterfüllung ähnlich wie bei Dauerbetrieb. Bei kurzen Relaxationszeiten (S12a) bleibt die Hinterfüllung gefroren. Bei längeren Relaxationszeiten (S12b) stellt sich in der Hinterfüllung ein Frost-Tau-Wechsel ein. Eine weitere Verlängerung der Relaxationszeit (S12c) resultiert in einer Situation, in der nur noch teilweise Frostbildung nachgewiesen werden kann. Bei einer leichten Zunahme der Kühltemperatur auf -2,5 °C (S12d) bleibt die Sonde frostfrei.
6. Im Nahbereich der Sonde konnte bei keinem der durchgeführten Szenarien Frostbildung nachgewiesen werden.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse (F/T = Frost-Tau-Wechsel)

Initial- und Randbedingungen	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12a	S12b	S12c	S12d
Grundströmung	ja	x							x	x					
	nein		x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
Kühlleistung des Thermostats	0,6 kW	x	x	x	x	x									
	maximal (2 kW)						x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zieltemperatur	0 °C	x	x												
	-2 °C			x											
	-2,5 °C														x
	-3 °C				x			x	x	x	x	x	x	x	
	-4 °C					x									
	-5 °C						x								
Strömung	transient		x	x	x	x	x		x						
	turbulent	x						x		x	x	x	x	x	x
Betrieb	Dauerbetrieb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	2,5 Std an / 1 Std aus											x			
	2,5 Std an / 1,5 Std aus												x		
	2,5 Std an / 2,5 Std aus													x	x
Eisbildung (Zeitpunkt)	in EWS Nahbereich														
	in EWS Verfüllung				100h	10h	12h	21h	94,5h	4h	13h	13h	F/T	F/T	

Generelle Bewertung:

1. Beim Betrieb einer EWS bei Temperaturen kleiner -3 °C ist Frostbildung im Verfüllmaterial zu erwarten.
2. Beim Betrieb einer EWS bei Temperaturen größer -3 °C wurde keine Frostbildung nachgewiesen.
3. Beim Betrieb einer EWS bei einer Temperatur von -3 °C ist die Gefahr der Frostbildung im Hinterfüllmaterial gegeben, außer es werden lange Relaxationszeiten erlaubt.
4. Untersuchungen im Nahfeld legen dort Frostfreiheit nah; um tragfähige Aussagen machen zu können müsste Experimente von erheblich längerer Laufzeit durchgeführt werden.
5. Der Einfluss der Grundwasserströmung sollte als dämpfend angenommen werden. Dies wird von einem Szenario (S10) nicht bestätigt. Ausreißer? Einfluss von im Grundwasser transportierten Partikeln auf die Keimbildung/Eisbildung?

Übertragung der Ergebnisse auf einen Feldfall:

Folgende Faktoren könnten eine Feldanwendung *ungünstiger* als die gezeigten Ergebnisse gestalten:

1. Die untersuchte Sonde wurde extern und extrem sorgfältig mit hoch wärmeleitendem Zement hergestellt.
Sonden im Feld haben zum Teil ein Hinterfüllmaterial mit deutlich niedrigerer Wärmeleitung und sind weiterhin schlechter an das anstehende Aquifermaterial angebunden. Somit sind die gezeigten Ergebnisse nicht notwendigerweise „worst-case“.
2. Obwohl das Grundwasser gekühlt war, war die Initialtemperatur im Versuchsstand größer als im Feld (ΔT ca 3-5 K)
Dies würde bedeuten, dass im Feld tiefere Temperaturen in der Hinterfüllung schneller erreicht werden. Ob die dort bei stationären Verhältnissen (sehr lange Kühldauer) erreichten Minimaltemperaturen bei gleicher Beaufschlagung der Sonde tiefer sein werden als im Experiment müsste untersucht werden.
3. Die untersuchte Sonde wurde extern und extrem sorgfältig hergestellt, das heißt, die Sondenrohre waren über die gesamte Sondenlänge zentriert.
Im Feldfall werden die Sonden, auch bei größter Sorgfalt, nicht immer zentriert sein, das heißt, der mit Hinterfüllmaterial gefüllte Abstand zwischen Sondenrohr und anstehendem Aquifer wird stellenweise nicht vorhanden sein. Entsprechend kann es im anstehende Aquifermaterial eher zu Frostbildung kommen als im Experiment nachgewiesen.
4. Obwohl der VEGAS-Container sehr groß ist, ist er klein im Bezug auf wirkliche Aquiferspeicher. Randeinflüsse (Labortemperatur) haben somit einen dämpfenden Einfluss auf die Temperaturabsenkung.

Folgende Faktoren könnten eine Feldanwendung *günstiger* als die gezeigten Ergebnisse gestalten:

1. Sondenlänge im Experiments war 4,5 m, Temperaturunterschied zwischen Zu- und Rücklauf war kleiner als 0,3K. Somit überlagerten sich in der Sonde die Einflüsse aller vier Rohre mit ähnlich niederer Temperatur.
Im Feld mit Sondenlängen von über 100 m ist mit weit größeren Temperaturunterschieden zu rechnen, d.h. die Temperatur im Rücklauf wird den Effekt der Zulaufemperatur dämpfen.
2. Im Experiment war der anstehende Aquifer 0,5 m unter GOK.
Im Feldfall wird der Aquifer erstens tiefer liegen, zweitens sind die potentiellen Gefahrstellen, also die Durchdringung einer wasserstauenden (oder einer anhydridhaltigen) in noch größerer Tiefe, sodass sich die Zulauftemperaturen bis zum Erreichen dieser Schichten bereits merklich erhöht haben werden. Eine tiefenabhängige Risikoabschätzung wäre jedoch basierend auf weitergehenden Untersuchungen, verbunden mit numerischer Modellrechnung möglich.
3. Die Experimente wurden mit einer hohen spezifischen Entzugsleistung (für turbulente Strömungsbedingungen in der Sonde und stagnierendes Grundwasser ca. 83 W/m) durchgeführt, die Einflüsse auf die Temperaturprofile im Hinterfüllmaterial waren somit teilweise extrem schnell.
Im Feld sind spezifische Entzugsleistungen geringer, somit werden im Feld die Einflüsse des Sondenbetriebs verzögert und auch gedämpfter sein.

5 Erreichte Fortschritte für die Wissenschaft und/oder Technische Anwendungen

Von einem wissenschaftlichen Standpunkt aus konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen eine Methode entwickelt werden, mit Hilfe derer erstmals die Eisbildung innerhalb einer EWS für verschiedene Szenarien experimentell nachgewiesen werden kann. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Keimbildung im Zentrum der Sonde (zwischen den Sondenrohren) stattfindet. Weiterhin wurden das erste Mal Temperaturgradienten innerhalb einer Erdwärmesonde sowie in ihrem Nahbereich experimentell bei verschiedenen Randbedingungen und mit hochauflösenden Geräten untersucht. Auf der einen Seite wurden die Zulauftemperaturen in die EWS (konstant, intermittierend) und auf der anderen Seite auch die Aquiferbedingungen (keine Strömung, verschiedene Strömungsraten in den Schichten mit verschiedenen Durchlässigkeiten) geändert.

Technische Anwendungen: Die Ergebnisse zeigen, dass die „-3°C Regel“ für den EWS-Zulauf keine absolute Frostsicherheit garantiert. Weitere Untersuchungen, insbesondere von Worst-Case-Szenarien sind notwendig.

6 Vorteile und praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse

Die experimentellen Ergebnisse des Großversuchs zeigen, dass die derzeit verwendete minus 3°C Regel für die EWS auf der Grenze zwischen frostsicher und frostgefährdet liegt. Ob bei einer Feldanwendung die konservativen oder doch die weniger konservativen Rahmenbedingungen der Experimente maßgeblich sind sollte durch weiterführende Untersuchungen ermittelt werden.

7 Konzept zum Transfer der Ergebnisse auf die Anwendung

Nach weiteren Untersuchungen zu Worst-Case Szenarien könnten/sollten die Ergebnisse dazu verwendet werden, die Standsicherheit verschiedener EWS im Land nachträglich zu untersuchen. Die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse über potentielle Frosttiefen verbunden mit dem Wissen über den (historischen) Betrieb einer EWS, den in der EWS verbauten Komponenten (insbesondere dem Hinterfüllmaterial) und dem anstehenden Gebirge (Lage der GW-Stauer) könnten Hinweise auf potentiell problematische EWS ergeben.

Die Ergebnisse könnten also, nach einigen weiteren Untersuchungen, zu einem Werkzeug entwickelt werden, welches den Genehmigungsbehörden erlauben würde individuelle Vorlaufemperaturen festzulegen wenn, Standortbedingt (Geologie, GW-Strömung, Lage der zu schützenden Schichten,...), die Einhaltung der hohen Anforderungen an die EWS nachgewiesen werden können. Dies könnte dazu beitragen, eine bestimmte EWS oder ein Sondenfeld effizienter zu betreiben.

8 Referenzen

- LQS-EWS. 2015, Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Geothermie/LQS_EWS/1509_Leitlinien_Qualitaetssicherung_Erdwaermesonden.pdf
- Bisch, G., Klaas, N, und Braun, J. 2014: geomatrix.bw, Teil 3: „Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmenutzung“ Schlussbericht BWPLUS <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/113222/zo4e28002.pdf?command=downloadContent&filename=zo4e28002.pdf&FIS=203&highlight=geomatrix>