

15.12.2020

«Weiterführung Messungen Projekt GEO4DT Lausen»

**Schlussbericht zu
den Temperaturmessungen in EWS
mit Glasfaser-Laser-Technologie
von November 2017 bis Oktober 2020**



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Dr. Andreas Ebert, Benjamin Zürcher

Geo Explorers AG

Wasserturmplatz 1

CH-4410 Liestal

www.geo-ex.ch

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1	Zusammenfassung	4
2	Résumé	5
3	Einleitung	6
4	Zusammenfassung Wärme- und Messsystem	7
5	Kurzfassung aus Schlussbericht vom Sommer 2018	8
6	Temperaturentwicklung im Untergrund.....	8
6.1	Ergebnisse	8
6.2	Interpretation	17
6.2.1	Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von Wärmeentzug und Wärmeeintrag	17
6.2.2	Einfluss der Geologie und des räumlichen Verlaufs der Sonden auf die Temperaturentwicklung in der Kernbohrung / Messsonde	18
6.2.3	Ist die Beeinflussung durch Nachbarsonden nach 4 Messjahren erkennbar?	19
6.2.4	Vergleich Simulation vor Inbetriebnahme und mit realen Werten	20
7	Schlussfolgerungen und wichtigste Erkenntnisse	21

1 Zusammenfassung

Der Ringraum von drei Erdwärmesonden eines Mehrfamilienhauses in Lausen BL wird seit 2016 mittels Temperaturmessungen überwacht und deren Veränderungen im Raum und über die Zeit analysiert. Die Temperatur wird mittels Glasfaser-Laser-Technologie ermittelt. Die Veränderungen werden mit den aufgezeichneten Daten der Wärmepumpe, eines Wärmezählers im Solekreislauf, der Witterung und der Geologie korreliert. Mit Hilfe einer inaktiven Messsonde in einer benachbarten Kernbohrung, welche im Mittel 3 m von einer aktiven EWS entfernt liegt, wird die Ausbreitung der Kältefront um die aktive EWS vermessen.

In einem ersten Schlussbericht 2018 wurden detailliert die vielfältig erhobenen Untergrundparameter, das Wärmesystem mit allen erfolgten Optimierungen und die ersten Erkenntnisse beschrieben. Letztere hatten besonders den Fokus auf kurzfristige und jahreszeitliche Variationen und den Einfluss von veränderten Parametern im Wärmesystem. Im vorliegenden Schlussbericht liegt der Fokus auf der räumlichen Temperaturentwicklung im Untergrund, insbesondere dem Einfluss der Geologie und der Sondengeometrie.

Die Messwerte und Erkenntnisse werden nun im universitären Umfeld vertieft mit Hilfe von Simulationen und Modellierungen weiter ausgewertet. Zusammen mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen sollen Prozesse im Untergrund besser verstanden und quantifiziert werden, damit zukünftige EWS und Wärmesysteme genauer der Realität entsprechend dimensioniert und optimiert werden können. Auch die Effektivität des Freecoolings kann mit den Messdaten genauer quantifiziert werden.

Die Messungen haben gezeigt, dass das Wärmepumpensystem, insbesondere das Freecooling richtig eingestellt werden muss, damit es überhaupt relevante Beiträge leistet. Trotz mehrmaliger Optimierungen des Wärmesystems liegt die Regeneration durch Freecooling bei einem Neubau bei nur einigen Prozent des Wärmeentzugs. Das Sondenfeld ist ausreichend dimensioniert, denn die tiefsten gemittelten Tagestemperaturen sanken nicht unter 4-7°C und während der 4.5 Messjahre kühlte der Untergrund um ca. 2°C ab, wobei sich in den letzten drei Wintern die Temperaturen eingependelt haben. Im Frühsommer regenerierte sich der Untergrund weitgehend wieder. Die Kältefront erreichte messbar die nahegelegene inaktive Messsonde und es wurde eine jährliche Abkühlung von ca. 0.3-0.4°C gemessen. Diese variiert mit der Tiefe und Geologie. Rund 15-20% der Messsonden-Länge werden von der Oberfläche bzw. vom ungenutzten unterlagernden Raum her regeneriert. Eine gegenseitige Beeinflussung der EWS liegt bisher im Bereich von wenigen Zehntel Grad. Die Abstände zwischen den drei Sonden von >10m sind entsprechend ausreichend.

2 Résumé

A Lausen BL, un nouvel immeuble d'habitation est alimenté en chaleur par une pompe à chaleur raccordée sur trois sondes géothermiques. Depuis 2016, l'évolution de la température du sous-sol autour de ces trois sondes, ainsi que les variations spatiales et temporelles de la température, sont contrôlées à l'aide de mesures, et analysées. La mesure de température est réalisée en utilisant la fibre optique laser. Les variations de température sont corrélées avec les données mesurées sur la pompe à chaleur, les données du circuit d'eau des sondes (mesurées à l'aide d'un compteur de chaleur), la météo et la géologie. En outre, la propagation du front froid autour des sondes est mesurée à l'aide d'une sonde de mesure, située dans un forage inactif qui se trouve à 3m des sondes actives.

Un premier rapport datant de 2018 a permis de décrire en détails de nombreux paramètres du sous-sol et du système de chauffage, y compris toutes les mesures d'optimisation qui y ont été apportées, ainsi que les premiers constats qui ont pu être faits. Ces premiers constats concernaient avant tout les variations de température temporelles à court terme et les variations saisonnières, ainsi que l'influence de différents paramètres qui ont été modifiés dans le système de chauffage, sur ces variations. Dans le présent rapport, l'accent est porté avant tout sur l'évolution spatiale de la température dans le sous-sol, et notamment sur l'influence de la géologie et de la géométrie des sondes.

Ces données de mesure et ces constats vont à présent être approfondis au niveau universitaire, grâce à des simulations et des modélisations. Le but de ces constats est de mieux comprendre et mieux quantifier les processus qui se déroulent dans le sous-sol, afin de pouvoir dimensionner et optimiser les sondes et les systèmes de chauffage de manière plus conforme à la réalité du terrain, à l'avenir. Ces mesures permettent également de mieux quantifier l'efficacité du free-cooling.

Les mesures ont permis de montrer qu'un tel système, incluant une pompe à chaleur, doit être réglé correctement, notamment aussi au niveau du free-cooling, si on veut que ce free-cooling contribue efficacement à la régénération du sous-sol. Malgré plusieurs optimisations du système de chauffage, on constate que le free-cooling ne contribue qu'à hauteur de quelques pourcents à la régénération du sous-sol dans une construction nouvelle. Le champ de sondes est suffisamment bien dimensionné, puisque les températures moyennes journalières les plus basses ne sont pas descendues au-dessous de 4-7°C, et durant les 4,5 années de mesures, le terrain s'est refroidi d'environ 2°C, avec une stabilisation au cours des trois derniers hivers. Le sous-sol se régénère en grande partie au début de l'été. Le front froid a atteint la sonde voisine, qui est inactive, de façon mesurable. Un refroidissement annuel d'environ 0.3-0.4°C a pu être mesuré. Ce refroidissement varie en fonction de la profondeur et de la géologie. Près de 15-20% de la longueur des sondes est régénérée par le sol en surface, respectivement par le terrain sous-jacent qui n'est pas exploité. L'influence réciproque des sondes ne représente que quelques dixièmes de degrés. La distance de >10m entre les sondes est par conséquent suffisante.

3 Einleitung

Seit 2016 werden zwei neue Mehrfamilienhäuser in Lausen bei Liestal mit je einer Wärmepumpe geheizt, welche jeweils an drei 145 m tiefe Erdwärmesonden (EWS) angeschlossen sind. Die Sonden werden mit Freecooling teil-regeneriert. Im Fall von einem Haus werden die Untergrundtemperaturen in den 3 Erdwärmesonden EWS A1, EWS A2, EWS A3 und in einer inaktiven Messsonde (Kernbohrung) mittels Glasfasertechnik gemessen. Letztere liegt gemittelt 3 m entfernt von einer aktiven EWS.

Das Forschungsprojekt untersucht die kurz- und langfristige räumliche Änderung der Temperaturverteilung einer Erdwärmesonden-Gruppe in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung (Wärmeentzug und Regeneration durch Freecooling). Dafür wurden die Erdwärmesonden mit einem Glasfaserkabel entlang der Sondenrohre zur Temperaturüberwachung mittels „Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing“ ausgestattet.

Im Sommer 2018 wurde ein Schlussbericht¹ für die Messperiode 2016 und 2017 veröffentlicht. Die Jahre 2016 bis 2018 waren geprägt durch Anpassungen und Optimierungen am Wärmesystem, insbesondere beim Freecooling. Da der Untergrund träge reagiert, die Jahre wetterbedingt unterschiedlich waren und die ersten Jahre unterschiedlich bewirtschaftet wurden, konnte entsprechend noch kein langfristiger Trend insbesondere in Abhängigkeit von Geologie und Sondengeometrie abgeleitet werden. Aus diesem Grund wurde das Projekt von EnergieSchweiz² um weitere 3 Jahre verlängert. Mit den weiteren Messjahren sollten z.B. die gegenseitige Beeinflussung der EWS, die Ausbreitung der Kältefahne um die EWS und der langfristige Einfluss der Regeneration beobachtet werden.

Mit diesem Schlussbericht werden die Messdaten, Chronologie und groben Erkenntnisse der Messjahre 2016-2020 bereitgestellt. Während im Schlussbericht von 2018 verstärkt auf das Wärmesystem und kurzfristige und saisonale Variationen eingegangen wurde, liegt der Fokus im vorliegenden Bericht auf den ursprünglichen Zielen des Projekts, dem Bewerten der längerfristigen räumlichen Temperaturveränderung im Untergrund in Abhängigkeit von Tiefe und Geologie. Für entsprechende Erkenntnisse und Grundlagen bzw. Details zum Mess- und Wärmesystem wird auf den Schlussbericht von 2018 verwiesen.

Die ursprünglichen Fragestellungen sind:

Wie verändert sich das räumliche Temperaturfeld bei teilregenerierten EWS-Feldern – kurzfristig, saisonal, langfristig?

Wie ändert sich das Temperaturfeld im Ringraum – ebenfalls räumlich und zeitlich? Bisher gibt es diesbezüglich nur wenige Modellierungen und keine tatsächlichen Messungen.

Wie beeinflussen die geologischen Unterschiede die räumliche Temperaturentwicklung im EWS-Feld und die Leistungsbilanz? Bisher erfolgte die geologische Aufnahme nur an destruktivem Material mit einer Auflösung im Meterbereich und Anisotropien wurden nicht berücksichtigt.

Kann mit genauem Wissen der Bodenkennwerte, der Temperaturentwicklung eines Feldes und der detaillierten Leistungsbilanz der Aufbau und die **Dimensionierung eines Feldes effizienter dimensioniert werden**? Was ist z.B. bei einer Teilregeneration der optimale Abstand zwischen den EWS? Bisher beruhen die Dimensionierungen auf Modellen und Annahmen.

¹ Der Schlussbericht zum Forschungsprojekt für die Messperiode 2016 und 2017 ist auf der Forschungsdatenbank der Bundesverwaltung veröffentlicht: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=35865>

² Der Schlussbericht zum EnergieSchweiz Projekt für Messperiode 11.2017-10.2020 ist auf der BFE Internetseite bei den Publikationen zur Geothermie veröffentlicht: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/geothermie.html>

4 Zusammenfassung Wärme- und Messsystem

Projektstandort: Mehrfamilienhaus (Neubau) in Lausen bei Liestal im Baselland, Parzellen-Nr.:244, auf 345 m ü.M.

Geologie: Der Untergrund ist wie folgt aufgebaut:
 Lockergestein / Quartär 0 - 6.2 m,
 Opalinuston 6.2 – 71.3 m
 (bis 18 m stark verwittert und durchlässig)
 Staffelegg-Fm. (Lias) 71.3 – 104.8 m
 Klettgau-Fm. (Keuper) 104.8 – 146.5 m
 Der Standort liegt auf einer Horst-Struktur in vergleichsweise ungestörter Lage. Die Schichten liegen nahezu horizontal.

Bohr- und Sondendaten: Bohrtiefe 146 m, Bohrdurchmesser 127 mm, Doppel-U-Sonde von HakaGerodur GEROtherm PE100-RC, PN16, SDR11, 40*3.7 mm, Länge 145 m, hinterfüllt mit Zeo-Therm 2.0 (thermisch verbessert), Sondenfluid Antifrogen N 25%, Sondenabstände 10 bzw. 14 m, inaktive Messsonde in Kernbohrung liegt 2-4 m entfernt von der aktiven EWS A1 (in Abb. 1 links)

Wärmesystem: Sole-Wasser-WP von CTA Optiheat OH 1-25e, Heizleistung 24.6 kW, COP 4.6 (B0/W35), mit Freecooling, geplanter Wärmeentzug aus Untergrund ca. 33'000 kWh/a

Messsystem: Glasfaserkabel in Schlaufenform an Aussenwand der Sondenrohre, Typ Multimode, 4 Fasern, OFDR (optical frequency domain reflectometry) Verfahren mit DTS distributed temperature sensing, Glasfaserkabel als Endlosschleife von Laser durch 4 Sonden und zurück zum Laser (siehe Abb. 1), Länge 1300 m, Temperaturwerte gemittelt aus 20 Minuten dauernder Messung, Messgenauigkeit 0.1°C und 0.1 m zusätzlicher Wärmezähler der Sole in Sondenvor- / Rücklauf

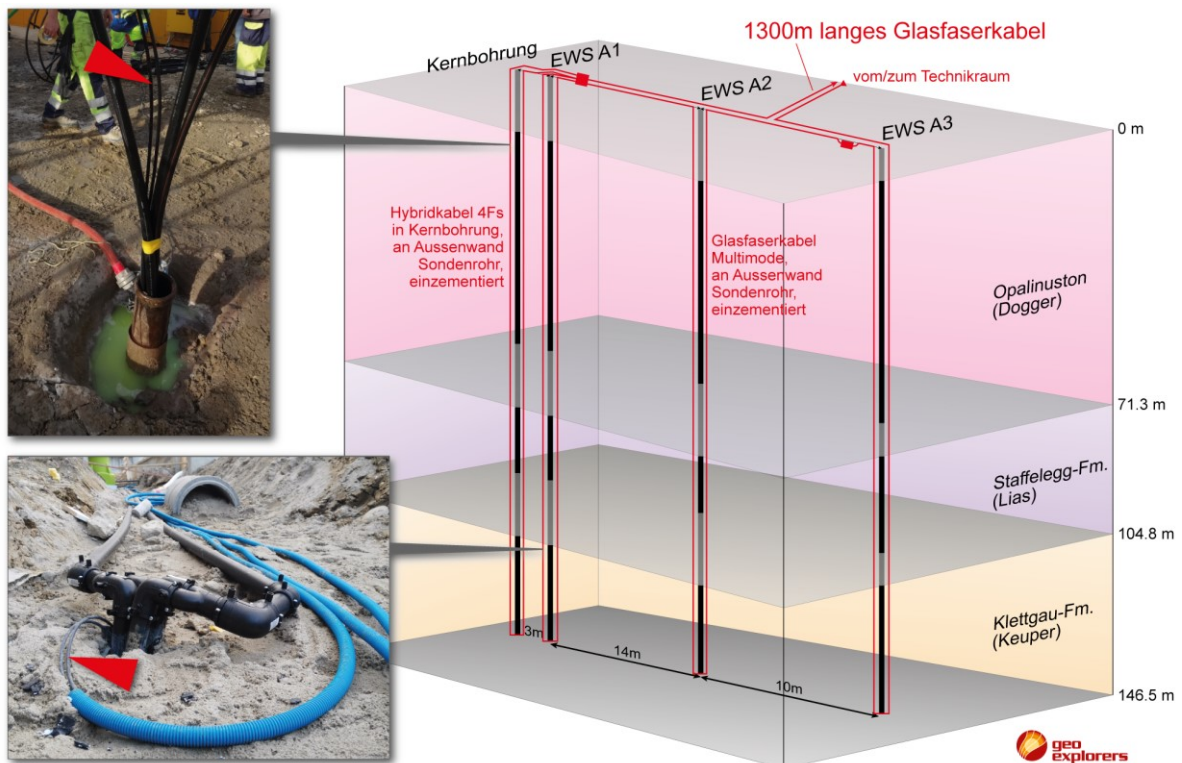


Abb. 1 Ausbau mit Glasfaserkabel (rote Pfeile und Linie)

5 Kurzfassung aus Schlussbericht vom Sommer 2018

Der Wärmeeintrag durch Freecooling war deutlich geringer als ursprünglich angedacht und erreichte erst durch nachträgliche optimale Systemanpassungen überhaupt relevante Werte von bis max. 5%. Die Messungen hatten zudem gezeigt, dass die Wärmepumpe selbst im sehr kalten Januar 2017 nicht mehr als 12 Stunden pro Tag und nur kurzfristig in Betrieb war. Mit nachträglichen Anpassungen im Jahr 2018 wurde erhofft, die Laufzeiten der Wärmepumpe, sowie das Freecooling zu optimieren.

Die Ringraumtemperatur um die Sonden, welche im 1. Winter eine minimale Temperatur von ca. 5°C erreichte, erholte sich bis zur folgenden Wintersaison fast komplett. Es scheint, dass die Kältefahne der aktiven EWS in der benachbarten Messsonde eine Temperaturreduktion von ca. 0.5°C verursacht hatte. Abgesehen vom langjährigen Abkühlungstrend im Untergrund um die EWS erholte sich der Nahbereich bzw. der Ringraum nach Phasen mit mehrtägigem Wärmeeintrag (Freecooling) bzw. Wärmeentzug (Heizen) grösstenteils innerhalb weniger Tage.

6 Temperaturentwicklung im Untergrund

6.1 Ergebnisse

Die Temperaturen beziehen sich auf die „im Glasfaser“ bzw. im Ringraum zwischen Bohrlochwand und Sondenrohr gemessenen Temperaturen. Da die Messsonde in der Kernbohrung nicht aktiv an das Wärmesystem angeschlossen ist, sind die Untergrundtemperaturen in dieser viel homogener als in den aktiven EWS A1 bis A3

Temperaturentwicklung allgemein:

Die Abb. 2 bis Abb. 4 der drei EWS A1-A3 zeigen die räumliche Temperaturentwicklung mit der Tiefe und Messdauer. Sie zeigen eine sehr ähnliche Entwicklung der Untergrundtemperaturen. Die Heizperiode ist mit den Blautönen gut zu erkennen. Dabei wurden die tiefsten gemittelten Untergrundtemperaturen von ca. 4-7°C im Ringraum der Sonden im Januar und Februar erreicht (Abb. 11). Im Sommer regenerierte sich der Untergrund wieder. Bei Wärmeeintrag durch Freecooling wurde der nahe Bohrlochaum rasch auf 18°C erwärmt. Wie die Abbildungen zeigen, hatte das Freecooling aber keine lang anhaltende Wirkung. Im Gegensatz zum Winter mit relativ homogenen Temperaturen über die ganze Tiefe stellte sich im Sommer wieder ein übliches Temperaturgefälle mit der Tiefe ein.

Die tägliche Variation wird in Abb. 8 ersichtlich. Die Histogramme in Abb. 9 zeigen die Verteilung aller gemessenen Tagestemperaturen im Sommer und Winter im Ringraum der EWS A1 auf 130 m Tiefe. Der Grossteil der Temperaturen variiert zwischen ca. 4 und 18°C. Während der Heizperiode variieren die Ringraum Temperaturen in der EWS A1 zwischen ca. 6 und 15°C. Die Verteilung ist leicht bimodal und rechtsschief mit einem Peak bei 7 bzw. 8°C. Ausserhalb der Heizperiode und während dem Freecooling ist die Verteilung stark linksschief mit Temperaturen zwischen ca. 7 und 16°C und einem Peak bei ca. 13 bzw. 15°C. Gut zu erkennen ist die allgemeine Abkühlung um rund 2°C zwischen 2016/17 und 2019/20. Die gemittelten monatlichen Untergrundtemperaturen in Abb. 11 bestätigen dies, zeigen aber auch, dass sich in den letzten 3 Wintern die Abkühlung nicht wesentlich geändert hat. Interessant wird sein, ob mit zunehmender Messdauer die Abkühlung des Untergrundes linear erfolgt oder sich verlangsamt bzw. einpendelt.

Der Oberflächen-Einfluss durch die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Lufttemperatur kann am besten mit Hilfe der Daten der Messsonde in der Kernbohrung betrachtet werden (Abb. 5). Die Beeinflussung durch die Jahreszeiten reicht wie in den Jahren zuvor ca. 8.5 m tief in den Untergrund.

Ausbreitung Kältefahne um EWS A1:

Der Einfluss der Geologie und die Ausbreitung der Kältefront um die aktive EWS A1 soll mit Hilfe der Messdaten der inaktiven EWS in der Kernbohrung bewertet werden.

Vergleicht man Abb. 2 bis Abb. 5 so wird sofort ersichtlich, dass die Untergrundtemperatur in der Messsonde (Kernbohrung, Abb. 5) viel homogener ist und weniger schwankt. Dies liegt daran, dass die Sonde nicht aktiv an das Wärmesystem angeschlossen ist. Gleichwohl ist eine leichte aber konstante Abkühlung erkennbar. Die mittlere Abkühlrate in der Kernbohrung liegt je nach Tiefe zwischen -0.29 bis -0.42°C pro Jahr und nimmt tendenziell mit der Tiefe zu (Abb. 10). Diese wurde auf Basis der mittleren Steigung der Messwerte pro 2m Teufenintervall über die ganze Messperiode ermittelt. Die Abkühlung kann mit dem Durchschlag der Kältefahne von der benachbarten EWS A1 erklärt werden, welche im Mittel ca. 3 m entfernt liegt. Vergleicht man die jahreszeitliche Eindringtiefe von der Oberfläche her, welche ca. 8.5 m tief reicht, so liegt es nahe, dass die Kältefahne von der Sonde A1 die Messsonde ebenfalls erreicht haben muss.

Ab bzw. unterhalb von 130 m Tiefe kippt der Trend und die Abkühlung ist zunehmend geringer (Abb. 10). Dies kann mit der ausgeprägteren Regeneration aus dem darunterliegenden Halbraum der EWS A1 erklärt werden. Am Sondenfuss fliesst nämlich die Wärme nicht nur horizontal und senkrecht zur Mantelfläche, sondern radialstrahlig aus dem gesamten unterliegenden Halbraum der EWS A1 zu. Dies ist so zu erwarten, wurde bisher aber noch nicht mit Messwerten belegt. Es wird interessant sein, wie sich die Regeneration mit den Messjahren ändert. Auch sollte dieser Effekt mit Simulationen quantifiziert werden. Berücksichtigt man die jahreszeitliche Regeneration von oben und diese am Sondenfuss, so werden im vorliegenden Fall rund 15-20% der Sondenlänge zumindest teilweise regeneriert. Dies wird bisher bei der Dimensionierung von EWS nicht berücksichtigt. Je kürzer die Sonde ist, umso entscheidender ist diese Regeneration.

In Abb. 11 fällt zudem auf, dass die jährlichen gemessenen mittleren Maximal- und Minimalwerte der Temperatur in der Messsonde im Vergleich zu den max. und min. Werten in den aktiven Sonden um einige Monate zueinander versetzt sind. Dies lässt sich mit dem zeitverzögerten Eindringen der Wärme bzw. Kälte erklären. Man kann dies mit dem zeitverzögerten Eindringen der Wärme bzw. Kälte von der Oberfläche her in den Untergrund auf Grund der jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur vergleichen (Abb. 5). Z.B. benötigt die sommerliche Wärme front von der Oberfläche her ebenfalls 2 bis 3 Monate bis sie den Untergrund in 5-8.5 m Tiefe max. erwärmt.

Zusatzbemerkungen:

In den ersten Messjahren gab es zahlreiche Anpassungen / Optimierungen an den Wärmepumpe-Parametern. Diese sind im Schlussbericht von 2018 beschrieben. Diese hatten insbesondere auf das Freecooling und die Warmwasser-Produktion einen Einfluss. Beim Vergleich der jährlichen Messdaten sollten auch die unterschiedlichen klimatischen Winter / Sommer berücksichtigt werden, die zu variierenden Wärmeentzügen und Einträgen führen. Auch scheint es, dass der Abbau und Wiederanschluss des Messgerätes zwischen den beiden Projekten Kantonsschule Olten und Lausen im Frühling und Herbst zu leichten Sprüngen bei den gemessenen Temperaturen führen. Mit Hilfe der inaktiven Kernbohrung lassen sich die Sprünge von bis zu wenigen Zehntel-Grad aber korrigieren, da das Messgerät nur ein bis zwei Wochen bei der Kantonsschule Olten zum Einsatz kommt. Es sei angemerkt, dass diese Sprünge aber keine Auswirkung auf die Aussagen haben, da die langfristigen Veränderungen grösser sind.

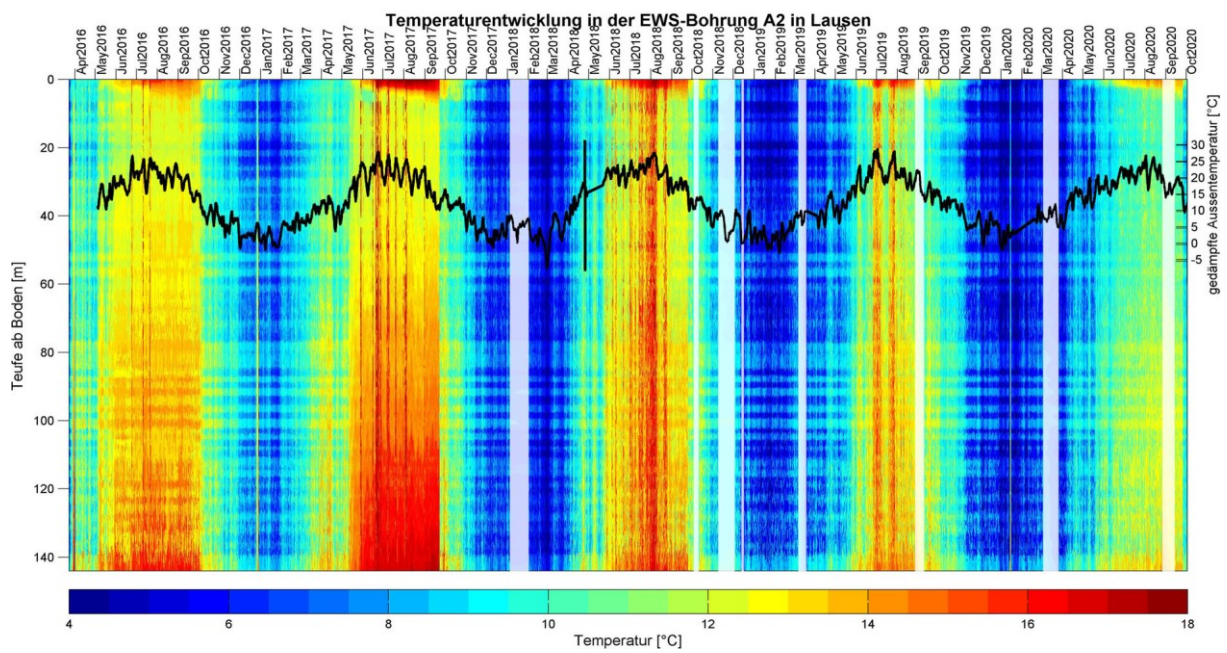


Abb. 2 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A2

Darstellung der Temperatur (blau = kalt bis rot = warm) im Ringraum der EWS A2 über die Zeit (x-Achse) und die Tiefe in der EWS (y-Achse). Die schwarze Kurve zeigt die gedämpfte Aussentemperatur (mit Aussenfühler gemessen). Vertikale rote Linien spiegeln das Freecooling wider. Messlücken in Weiss resultieren durch den Betrieb an der Kantonsschule Olten.

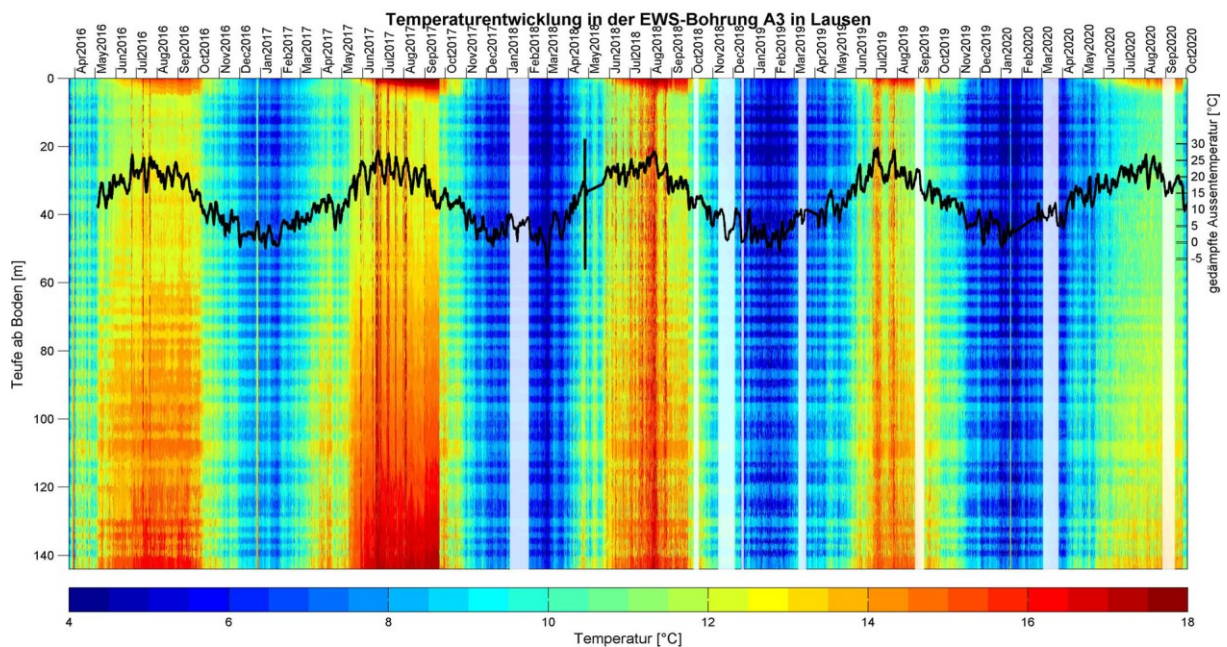


Abb. 3 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A3

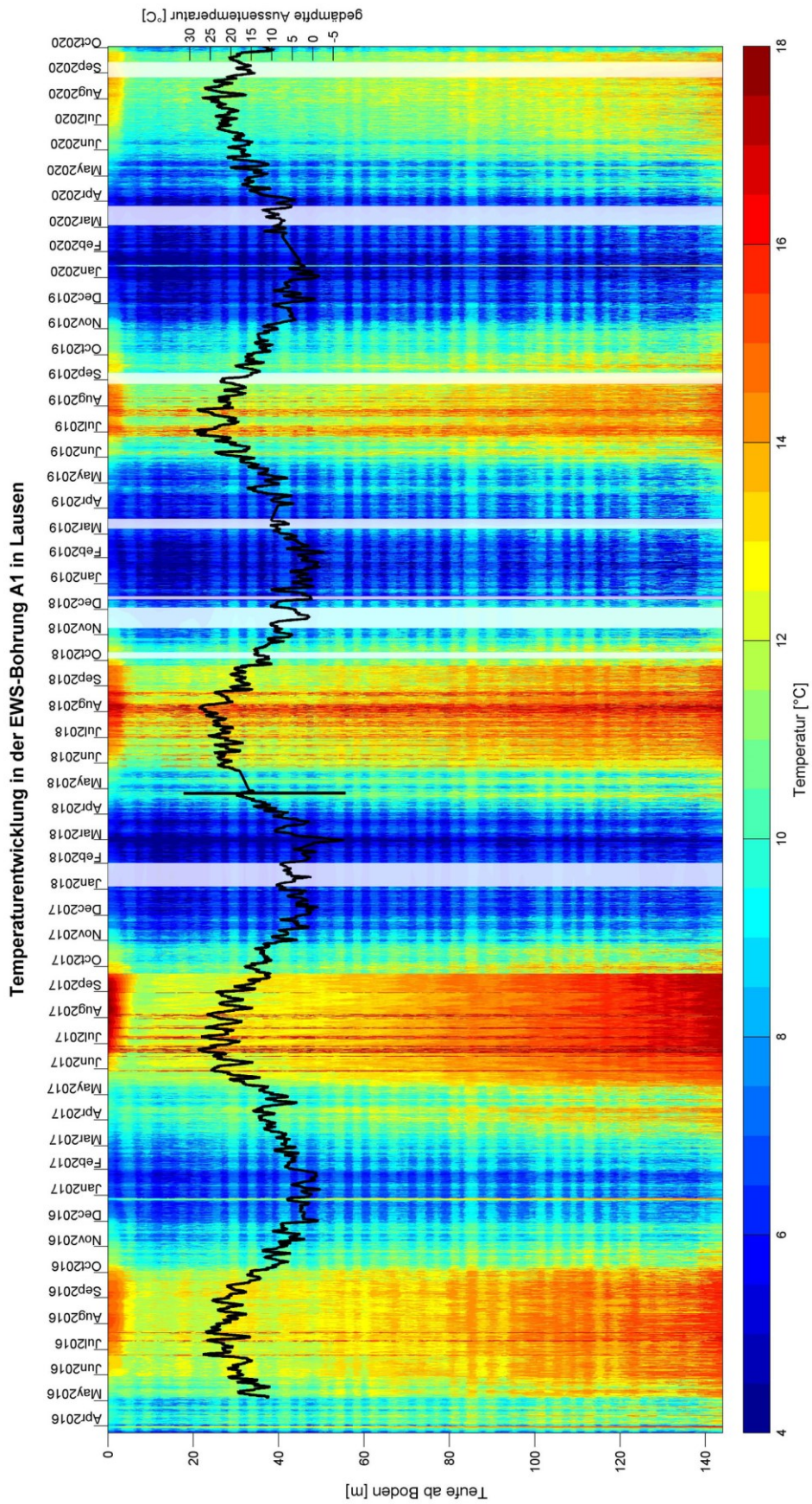


Abb. 4 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A1

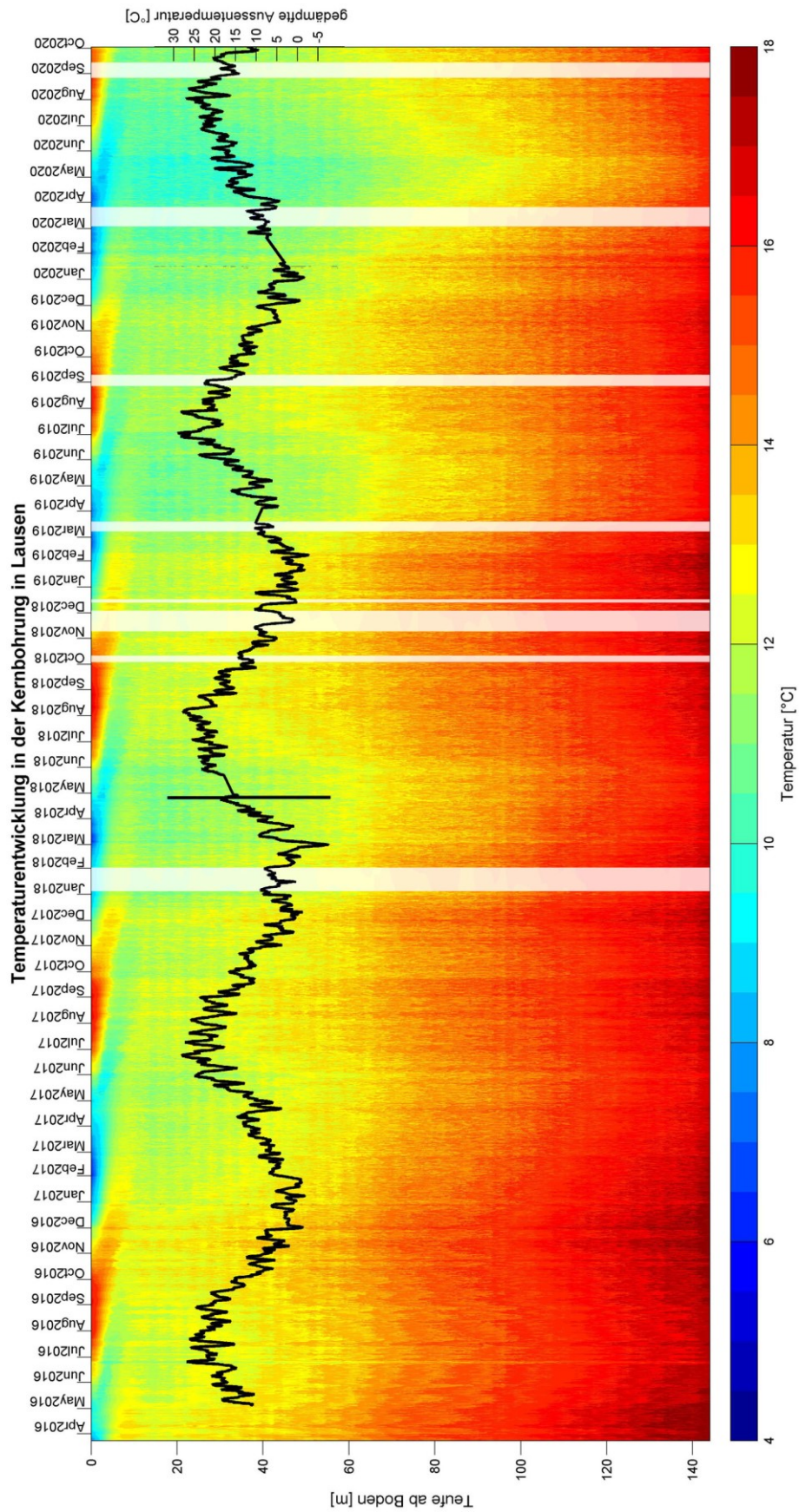


Abb. 5 Entwicklung Untergrundtemperatur in Messsonde der Kernbohrung

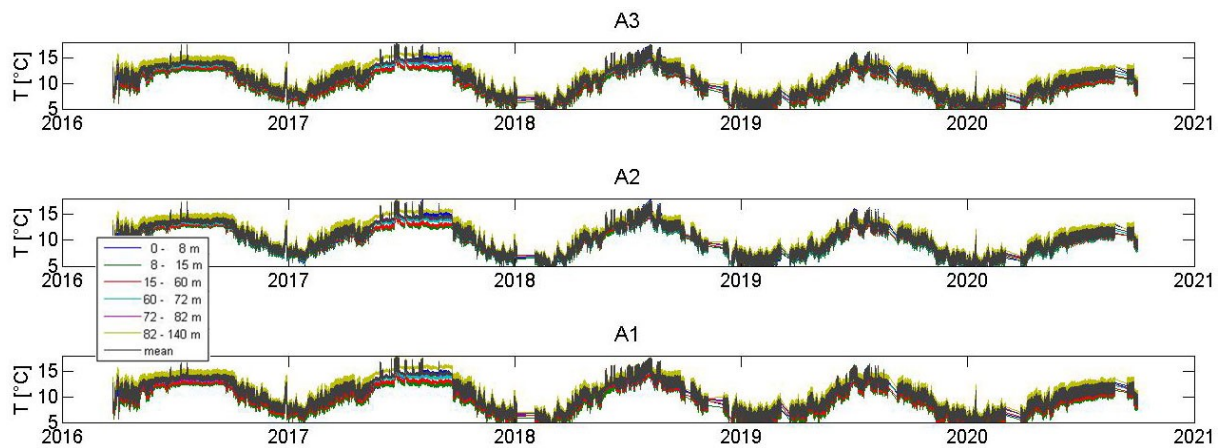


Abb. 6 Temperaturentwicklung pro Tiefenintervall und Sonde

Dargestellt ist die Untergrundtemperatur gemittelt für verschiedene Tiefenintervalle (siehe Legende). Von oben nach unten sind die Temperaturentwicklungen in der Sonde A3, A2 und der zur Kernbohrung nächsten Sonde A1 aufgetragen. Im Sommer 2017 wurde Warmwasser nur elektrisch produziert. Deshalb ist dort die Schwankung minim. Dafür kommen die Wärmeeinträge durch das Freecooling klar zur Geltung.

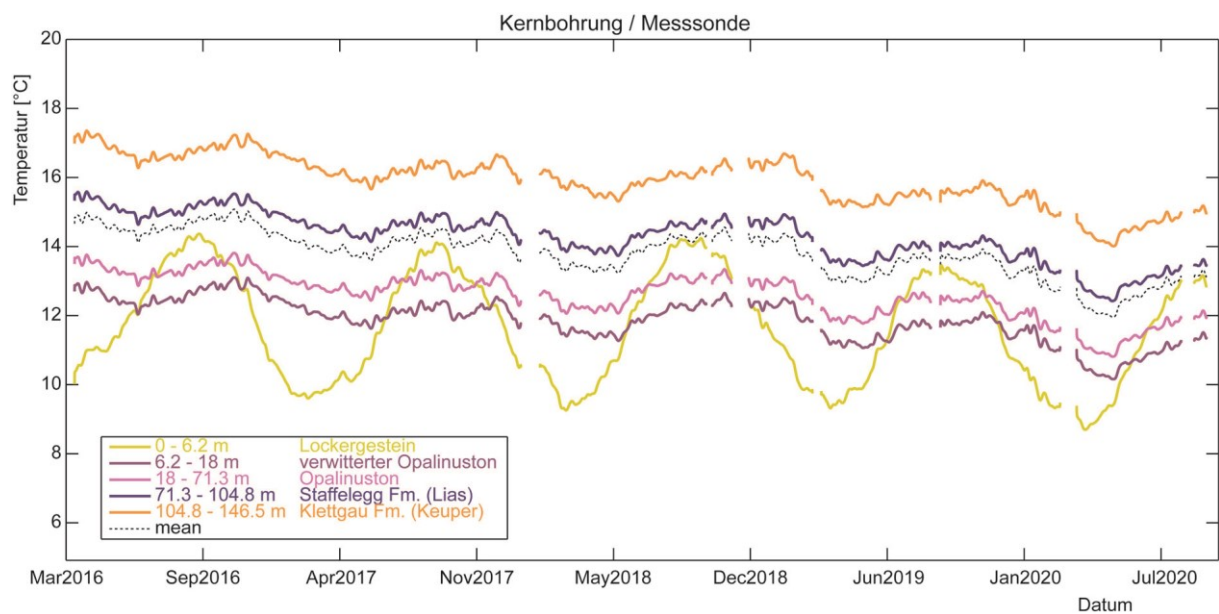


Abb. 7 Temperaturentwicklung pro Formationsintervall in der Kernbohrung

Dargestellt ist die Untergrundtemperatur gemittelt für verschiedene lithostratigraphische Tiefenintervalle (siehe Legende).

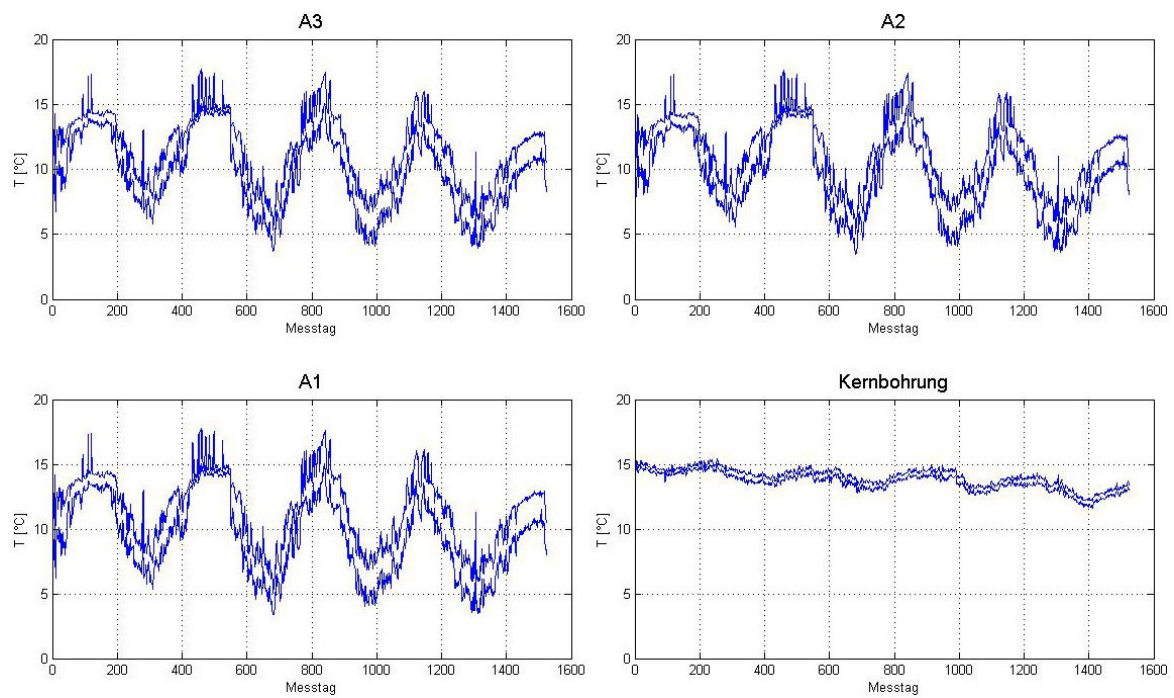


Abb. 8 Min. und max. Temperaturen im Ringraum

Berechnet wurden pro Tag 72 gemittelte Temperaturwerte von der ganzen Sondenlänge pro EWS. Von diesen ist der minimalste und maximalste Wert pro Tag dargestellt. Im Winter spiegeln z.B. die min. Werte somit Phasen mit maximalem Entzug wider. Bei der Kernbohrung spiegeln die min. und max. Werte den Messfehler wieder, wenn man nur Einzelmesswerte betrachtet.

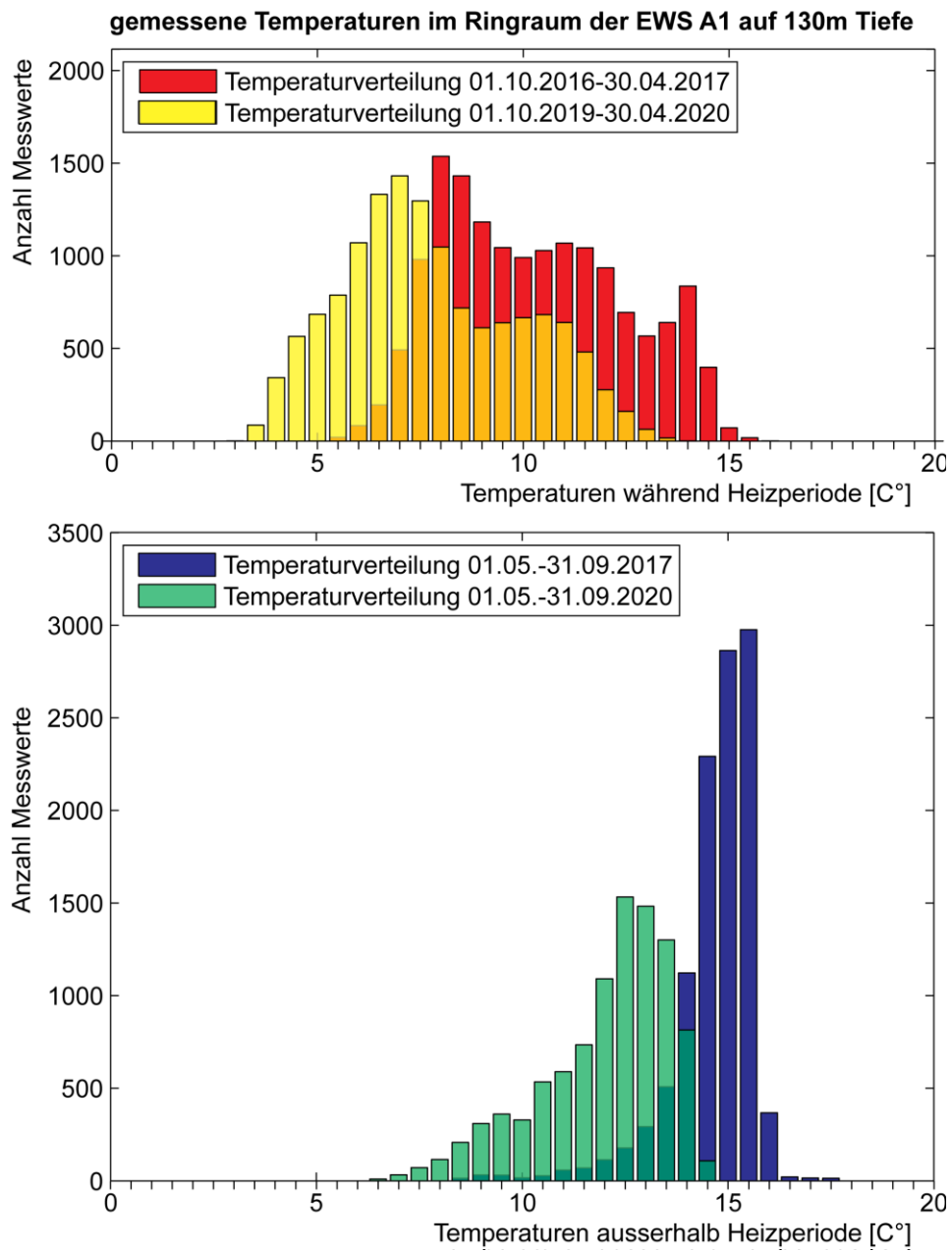


Abb. 9 Histogramm der gemessenen Temperaturen in EWS A1 auf 130 m Tiefe

Während der Heizperiode (oben) variieren die Ringraum-Temperaturen in der EWS A1 zwischen ca. 6 und 15°C. Ausserhalb der Heizperiode und während dem Freecooling (unten) ist die Verteilung stark linksschief mit Temperaturen zwischen ca. 7 und 16°C. Gut zu erkennen ist die allgemeine Abkühlung um rund 2°C zwischen 2016/17 und 2019/20.

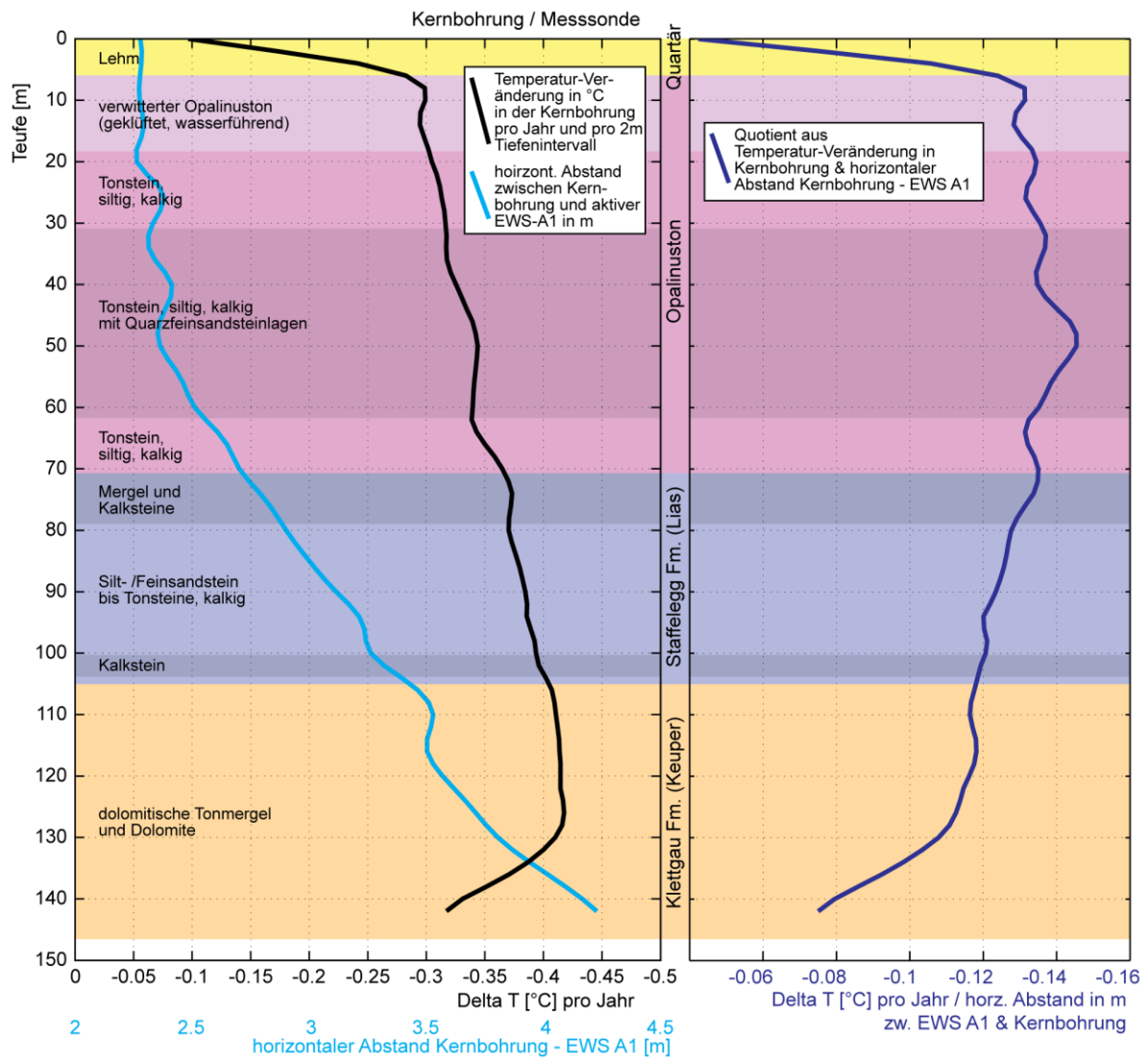


Abb. 10 Temperaturveränderung in der Kernbohrung

Dargestellt sind die Temperaturveränderung pro Jahr mit der Tiefe in der Kernbohrung (schwarze Kurve), der horizontale Abstand zwischen der Kernbohrung und der aktiven EWS A1 (blaue Kurve) welcher von ca. 2.3 m auf über 4 m mit der Tiefe ansteigt und dem Quotienten der Temperaturänderung und dem horizontalen Abstand (rechts). Die Geologie ist farblich hinterlegt.

6.2 Interpretation

6.2.1 Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von Wärmeentzug und Wärmeeintrag

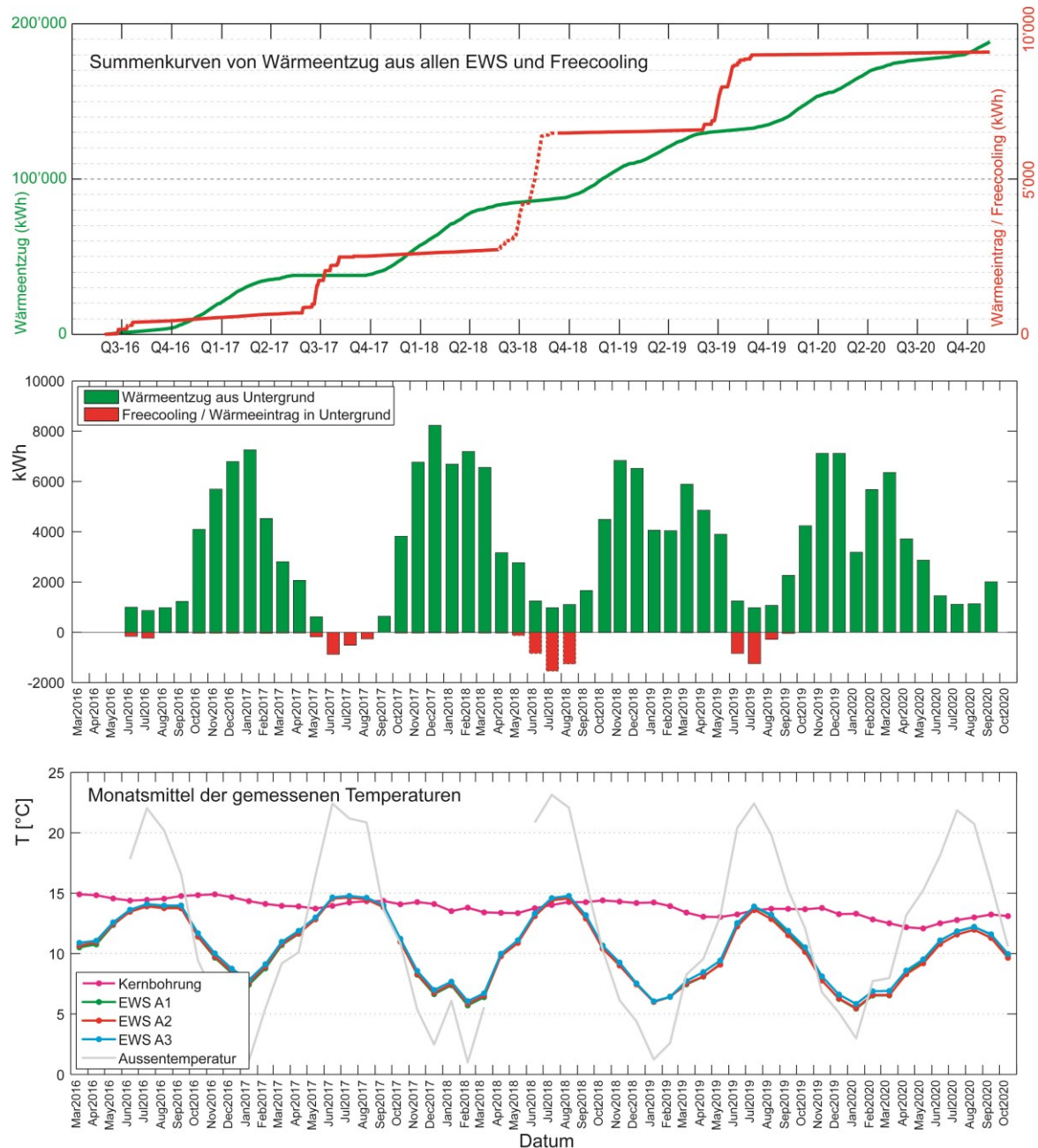


Abb. 11 Korrelation Monatsmitteltemperaturen mit Wärmeentzug / –eintrag

Unten sind die über einen Monat und über die ganze Tiefe gemittelten Untergrundtemperaturen von jeder Sonde, welche mit dem Laser-Glasfaser-Messsystem erhoben wurden, dargestellt. Zusätzlich ist zum Vergleich die gemittelte Aussentemperatur in Grau aufgetragen.

Im mittleren und oberen Diagramm werden der Wärmeentzug in kWh aus dem Untergrund (grün) und die Wärmerückgabe durch Freecooling (rot) gegenübergestellt. Diese Werte wurden mit Hilfe eines Wärmehählers im Sondenfluid ermittelt. Leider gab es im Sommer 2018 einen Ausfall bzw. Fehlmessungen des Messgerätes. Hier wurden die Daten aus den Wärmepumpendaten abgeschätzt (gestrichelt). Im ersten Messsommer 2017 wurde Warmwasser nur elektrisch erzeugt (Grund: Dauerschaltung Legionellen-Schutz). Warum im Sommer 2020 kein Freecooling erfolgte, war zum Zeitpunkt des Berichtes noch nicht geklärt.

Total lag der gemessene Wärmeentzug (Kälteenergie Heizen und WW) aus dem Untergrund seit Sommer 2016 bei 190'000 kWh. In den letzten drei Jahren lag dieser bei rund 45'000 kWh/a (siehe Abb. 11). Die Planungswerte für Heizen und WW gemäss Energienachweis lagen bei rund 33'000 kWh/a Kälteenergie. Im ersten Winter haben die geplanten und gemessenen Wärmeentzüge gut übereingestimmt. Seitdem ist der gemessene Wärmeentzug deutlich höher als wie geplant. Im Fall von Freecooling wurde von rund 20'000 kWh/a ausgegangen. Damals gab es keine Erfahrungswerte und wurden gängige Meinungen von Fachplanern übernommen. Tatsächlich variiert aber der Wärmeeintrag zwischen 0 und rund 7'500 kWh. Nur durch mehrmalige Anpassungen durch Wärmepumpen-Experten konnten relevante Freecooling-Beiträge erreicht werden. Die Regeneration durch Freecooling lag somit bei 0% bis 15%. Da zum frühen Zeitpunkt der Dimensionierung der EWS von höheren Entzugswerten für Heizen und WW (ca. 48'500 kWh) und einem normalen geothermischen Temperaturgradienten ausgegangen wurde, scheinen die Sonden trotz der nun höheren Entzugswerte nicht unterdimensioniert zu sein. Es sei hier nochmals auf den Schlussbericht von 2018 verwiesen.

Vergleicht man die Messjahre, so sehen die gemessenen monatlich gemittelten Untergrundtemperaturen der ersten drei Sommer ähnlich aus (Abb. 11). Die letzten beiden Sommer zeigen zunehmend kältere Untergrundtemperaturen. Sicher spielt hier das Freecooling und die Warmwasserproduktion neben der Witterung eine Rolle. Die Sommer können aber nicht eins zu eins miteinander verglichen werden: Im ersten Sommer 2017 wurde Warmwasser nur elektrisch erzeugt und im zweiten Sommer war der Wärmeeintrag durch Freecooling ausgeprägter als in den anderen Jahren. Im Sommer 2020 erfolgte überhaupt kein Wärmeeintrag. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen noch keine Antworten vor, ob es im Frühjahr/Sommer 2020 zu Anpassungen im Rahmen der Installation eines Taupunktfühlers oder zu Defekten am Wärmesystem kam, die evtl. dafür verantwortlich sind.

Umgekehrt zeigen bis auf den ersten Winter 2016/17 alle Winter ähnliche gemittelte Untergrundtemperaturen bei vergleichsweise ähnlichen Wärmeentzugsmengen. Die weniger starke Abkühlung im ersten Winter kann auf geringere Entzugsmengen und auf das erste Entzugsjahr zurückgeführt werden. Die Daten zeigen, dass die Sondenlängen ausreichend sind. Interessant wird sein, wie sich die Temperatur langfristig ändert, insbesondere weil der Wärmeentzug höher und der Wärmeeintrag tiefer als wie geplant sind.

Da die Parameter der Wärmepumpe bis 2018 mehrmals geändert wurden sind Vergleiche schwierig. Dazu braucht es weitere Messjahre mit den gleichen Wärmepumpen-Einstellungen.

6.2.2 Einfluss der Geologie und des räumlichen Verlaufs der Sonden auf die Temperaturentwicklung in der Kernbohrung / Messsonde

Um den Einfluss der Geologie definieren zu können, muss der Abstand zwischen der Messsonde in der Kernbohrung und der aktiven EWS A1 bekannt sein, denn beide haben auf die Temperaturentwicklung in der Messsonde einen Einfluss. Die Variation ist in Abb. 10 ersichtlich. Es zeigt sich, dass der horizontale Abstand zwischen der Messsonde / Kernbohrung und der aktiven EWS A1 bis ca. 50 m Tiefe bei konstant ca. 2.3 m liegt und dann kontinuierlich auf ca. 4 m ansteigt. Da der Wärmestrom von der Wärmeleitfähigkeit, der durchströmten Fläche, dem Temperaturgefälle und der Distanz abhängt, wird der variierende Abstand zwischen den Sonden auch einen Einfluss auf die Temperaturentwicklung in der Kernbohrung haben.

Abb. 10 zeigt, wie sich die Temperaturen in der Tiefe über die Messzeit verändert haben. Dargestellt ist, um wieviel sich der Untergrund pro Teufe in der Kernbohrung abkühlt. Zudem ist in Blau der horizontale Abstand zwischen der Kernbohrung und EWS A1 aufgetragen. Die Temperaturabnahme liegt im Bereich von 0.29 bis 0.42°C pro Jahr. Sie nimmt mit der Tiefe zu. Zudem zeigen sich Sprünge und Änderungen in der Steigung.

Allgemein würde man erwarten, dass mit zunehmendem Abstand zwischen der Kernbohrung und EWS A1 die Abkühlung geringer ist. Folglich müsste eigentlich eher mit der Tiefe ein kleineres Δ Temperatur erwartet werden (vgl. mit Abb. 10). Umgekehrt nimmt mit der Tiefe auf Grund des geothermischen Gradienten die Temperatur zu und entsprechend auch der Temperaturgradient zur aktiven EWS A1. Folglich wirkt dieser Effekt dem grösseren Abstand entgegen. Die Sprünge und verschiedenen Steigungen in der Kurve, welche vergleichsweise gut mit der Lithologie korrelieren, lassen wiederum vermuten, dass die verschiedenen Lithologien mit ihren unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten auch einen dominanten Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben. Dolomite und Kalksteine haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Tonsteine. Dies spiegelt sich auch im Δ Temperatur wieder. Selbst innerhalb des Opalinustons zeigen die quarzreicheren

Tonsteine ein höheres ΔT , was auf die höhere Wärmeleitfähigkeit von Quarz zurückgeführt werden kann.

Simulationen, welche in einem Folgeprojekt auf universitärer Basis erfolgen werden, werden hier mehr Aufschluss geben, in welchem Umfang die Parameter das ΔT beeinflussen.

Die Grundwasser führende Schicht am Top des verwitterten Opalinustons scheint verantwortlich zu sein, für die vergleichsweise scharfe Grenze der jahreszeitlichen Beeinflussung bis in eine Tiefe von ca. 8.5 m. In umliegenden EWS liegt diese generell tiefer (10-20 m). Auch die typische Temperaturkurve auf Grund der Klimaerwärmung fehlt im Ruhe-Temperatur-Tiefenprofil (T-Abnahme von Oberfläche bis mehrere Zehner Meter Tiefe und dann Einbiegen in den normalen geothermischen Gradienten). Der Sprung in der Temperaturabnahme am Top vom Opalinuston in Abb. 10 bestätigt, dass das fließende Grundwasser die von oben zugeführte jahreszeitliche Wärme / Kälte kontinuierlich abführt.

6.2.3 Ist die Beeinflussung durch Nachbarsonden nach 4 Messjahren erkennbar?

Wie die oben beschriebenen Daten der Kernbohrung zeigen, ist das Ausmass der eindringenden Kältefront nach 4 Jahren bei einem Abstand von 2 bis 4 m mit zirka 1.5°C noch nicht gross. Entsprechend wird die gegenseitige thermische Beeinflussung der 3 aktiven Sonden mit Abständen von 10 bzw. 14 m nach nur 4 Messjahren gering sein. Gleichwohl scheinen sich Unterschiede abzuzeichnen. Die mittlere EWS A2 scheint kontinuierlich stärker abzukühlen, als die beiden äusseren EWS A1 und A3. Die Differenzen in Abb. 12 zwischen A2-A1 und A2-A3 bestätigen dies. Die EWS A2 zeigt nach den 4 Jahren eine um ca. 0.2°C stärkere Abkühlung als die EWS A1 und A3. Die Differenz von EWS A1 und A3 schwankt zwar, bleibt aber über die Jahre ähnlich, insbesondere wenn man die tiefsten Temperaturen im Winter betrachtet. Auch dieser Befund soll mit einer längeren Messdauer und Simulationen, welche in einem Folgeprojekt auf universitärer Basis erfolgen werden, näher beziffert und quantifiziert werden.

Es sei angemerkt, dass im Schlussbericht von 2018 bereits vermutet wurde, dass evtl. die gemessenen Unterschiede bei den Durchflussprüfungen an den 3 Sonden und/ oder die unterschiedlichen Zulaufängen einen Einfluss haben könnten. Mit den neuen Daten scheint der allgemein stärkeren Abkühlung der mittleren EWS A2 durch die gegenseitige Beeinflussung der damals erkannte Unterschied überlagert zu sein. Dies macht sich dadurch ersichtlich, dass nicht die Differenzen von A2-A3, sondern nur die Differenzen mit A1-A3 und A2-A1 jahreszeitliche und gegensätzliche Schwankungen aufzeigen (Abb. 12). Die Durchflussprüfungen hatten ergeben, dass der Durchfluss in der Sonde A1 bessere Werte als in den EWS A2 und A3 zeigte. Auf Grund der besseren Durchflusswerte von A1 wird diese Sonde mehr belastet, insofern der Durchfluss nicht mit den Tacosettern ausgeglichen wurde. Dies ist insbesondere im Winter mit einer stärkeren Abkühlung in der Sonde A1 verbunden, wie die Differenzen A1-A3 und A2-A1 klar zeigen. Im Sommer ist dieser Trend gegensätzlich und ebenso klar ersichtlich. Die Sonden A2 und A3 die ähnliche Durchflussqualitäten zeigten, weisen keine solchen Trends auf.

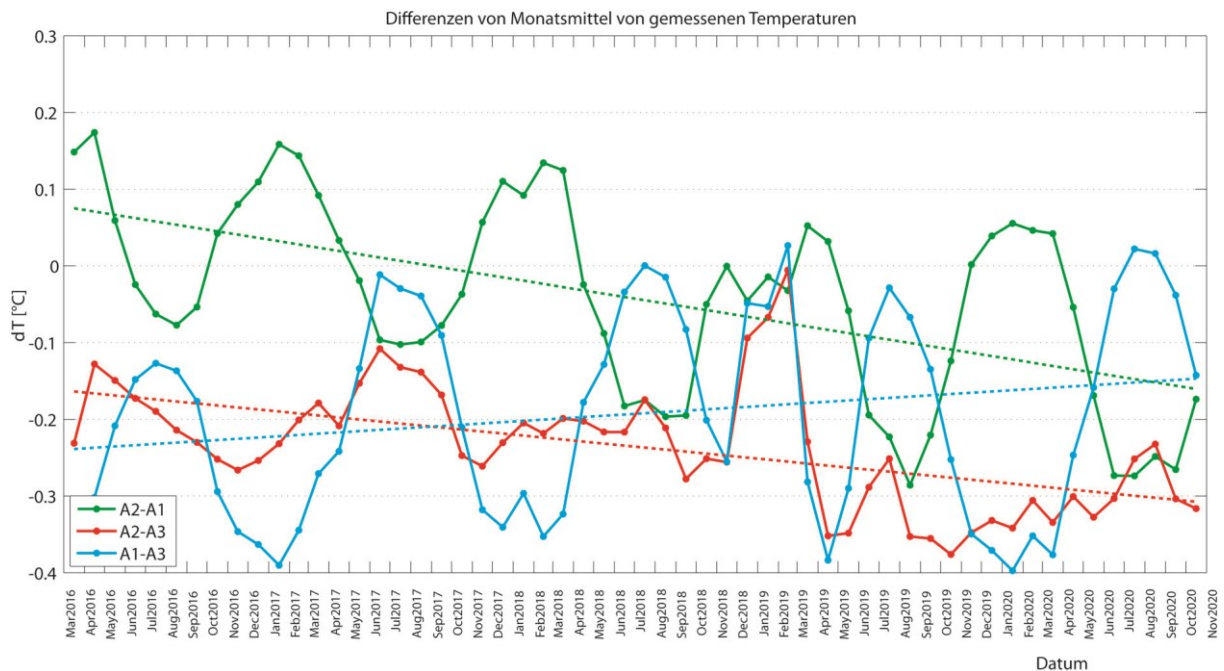


Abb. 12 Vergleich Temperaturentwicklung in EWS A1, A2 und A3

Dargestellt ist die Differenz der gemittelten monatlichen Ringraumtemperaturen zwischen den drei Sonden über den Zeitraum März 2016 bis Oktober 2020. Gestrichelt ist die Trendlinie dargestellt.

6.2.4 Vergleich Simulation vor Inbetriebnahme und mit realen Werten

Auf Grund des sehr komplexen Zusammenspiels vieler Faktoren wie Geologie, variierender Sondenabstände mit der Tiefe, variierendem Wärmeentzug und –eintrag über die Jahre hinweg usw. wurde entschieden, die Fragestellung von diesem Abschnitt mit umfassenden Simulationen und Modellierungen in einem nun startenden universitären Folgeprojekt genau zu quantifizieren. Dabei sollen auch die gängigen Tools für die Dimensionierung bewertet werden. Ziel ist es, dass die gewonnenen Erkenntnisse helfen, die Dimensionierungstools für EWS zu verifizieren und zu optimieren. Die oben beschriebenen ersten Erkenntnisse helfen, bei welchen Parametern mit Simulationen und Modellierungen angesetzt werden kann. Der Datensatz ist insbesondere mit der nahen Messsonde in der Kernbohrung einmalig. Die umfangreichen Hintergrunddaten zu Geologie und Wärmesystem erlauben es, Modellierungen realitätsnah aufzusetzen und mit Daten über einen langen Messzeitraum zu vergleichen.

7 Schlussfolgerungen und wichtigste Erkenntnisse

Mit den einmaligen Messdaten konnte die Temperaturentwicklung von einem kleinen EWS-Feld während 4 Messjahren in Abhängigkeit von Geologie, Wärmeentzug und Wärmeeintrag und gegenseitiger Beeinflussung aufgezeigt werden. Da auf Grund verschiedenster Messungen und geologischen Analysen im Zusammenhang mit der Kernbohrung der Aufbau des Untergrundes und dessen physikalische Parameter, sowie der räumliche Verlauf der Bohrungen sehr genau definiert wurden, lassen sich die Messwerte und Folgerungen im Detail evaluieren. Der grosse Mehrerfolg ist, dass zudem in einer benachbarten inaktiven Sonde die Temperaturentwicklung in wenigen Metern Entfernung zu einer aktiven EWS gemessen werden konnte. Die Messwerte und Erkenntnisse werden nun im universitären Umfeld vertieft mit Hilfe von Simulationen und Modellierungen weiter ausgewertet. Dies soll helfen, Prozesse im Untergrund besser zu verstehen und zu quantifizieren, damit zukünftig EWS genauer dimensioniert werden können, insbesondere angepasst an die tatsächliche Bewirtschaftung.

Die Messungen haben gezeigt, dass das Wärmepumpensystem richtig eingestellt werden muss, damit es optimal läuft (Anzahl Einschaltungen, Temperatur-Grenzwerte, Sperrzeiten, Warmwasser-Produktion, Legionellen-Schutz usw.). Nur so kann z.B. das Freecooling überhaupt zur Regeneration beitragen. Die Messungen haben aber gezeigt, dass trotz optimierter Einstellungen der Beitrag des Freecoolings bei einem Neubau mit nur wenigen Prozent im Vergleich zum Wärmeentzug viel tiefer ausfällt, als wie oft angenommen. Bzgl. Erkenntnissen und Optimierungen zum Wärmesystem selber wird auf den Schlussbericht vom Jahr 2018 verwiesen.

Folgende Erkenntnisse werden stichpunktartig aufgelistet:

- Die tiefsten gemittelten Temperatur-Monatswerte im Januar und Februar lagen im Ringraum der aktiven EWS bei ca. 4-7°C.
- Die minimalen und maximalen Tagestemperaturen im Sommer und Winter variieren im Ringraum zwischen ca. 3 und 18°C.
- Während der Heizperiode ist die Temperaturverteilung leicht bimodal und rechtsschief. Ausserhalb der Heizperiode ist diese stark linksschief, wahrscheinlich auf Grund des Freecoolings.
- Die gemittelte monatliche Untergrundtemperatur nahm vom 1. zum 4. Messjahr um ca. 2°C ab.
- Die mittlere Abkühlrate in der 2-4 m entfernten Messsonde in der Kernbohrung liegt je nach Tiefe zwischen -0.29 bis -0.42°C pro Jahr und nimmt tendenziell mit der Tiefe zu.
- Ca. 15-20% der Sondenlänge werden im vorliegenden Fall von der Oberfläche und vom unteren Halbraum her regeneriert. Die jahreszeitliche Eindringtiefe liegt bei ca. 8.5 m Tiefe.
- Die jährlichen gemessenen mittleren Maximal- und Minimalwerte der Temperatur in der Messsonde hinken im Vergleich zu den max. und min. Werten in den aktiven Sonden um einige Monate hinterher.
- Sprünge und Änderungen in der Steigung der Abkühlrate in der Messsonde mit der Tiefe korrelieren mit der Lithologie / Geologie. Diese legen nahe, dass neben dem Abstand zur aktiven EWS A1 und dem natürlichen Temperaturgefälle die Ausbreitung der Abkühlfront stark von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins beeinflusst wird.
- Die gegenseitige thermische Beeinflussung der Sonden kann trotz der grossen Abstände von >10m bereits gemessen werden. Sie liegt aber bisher bei 0.1-0.2°C.
- Die im Schlussbericht von 2018 bereits vermutete Beeinflussung durch unterschiedliche Durchflussqualitäten der Sonden scheinen sich zu bewahrheiten und überlagern die allgemeinen Abkühlrends.
- Grundsätzlich scheint das System ausreichend dimensioniert zu sein.

Die Messungen werden weitergeführt, um einen langfristigen und robusten Datensatz zu erhalten. Dieser wird zeigen, ob die Trends und Erkenntnisse tatsächlich bestehen und wie sich diese verändern oder einpendeln. Insbesondere für die Evaluation der gegenseitigen thermischen Beeinflussung ist ein mehrjähriger Datensatz notwendig.

