

Jahresbericht, Oktober 2021

«Weiterführung Messungen Projekt GEO4DT Lausen»

**Kurzbericht zu
den Temperaturmessungen in EWS
mit Glasfaser-Laser-Technologie**



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Adriaan Visser, Emelie Hägerstedt, Dr. Andreas Ebert

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	3
2	Résumé	4
3	Einleitung	5
4	Zusammenfassung Wärme-, Messsystem.....	6
5	Kurzfassung aus Schlussbericht vom Sommer 2018	7
6	Schlussfolgerungen aus Bericht vom Oktober 2020	7
7	Chronologie	8
8	Messdaten Wärmepumpe / Wärmezähler	10
9	Temperaturentwicklung im Untergrund.....	13
10	Schlussfolgerungen.....	21

1 Zusammenfassung

Der Ringraum von drei Erdwärmesonden eines Mehrfamilienhauses in Lausen BL wird seit 2016 im Untergrund 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 den 5.5 bisher gemessenen Jahren erfolgten einige Anpassungen und Ausfälle an der Wärmepumpen-Anlage, die durch die gemessenen Daten bemerkt wurde. Die wichtigsten Anpassungen erfolgten bzgl. Freecooling, der Anzahl Einschaltungen der Wärmepumpe und der Warmwasser-Produktion. Letztere erfolgte im ersten Messjahr rein elektrisch. Im 2020 erfolgte kein Freecooling weil ein Ventiltrieb defekt war.

Der Hauptzweck des Projektes ist der Messung der 3D-Temperaturverteilung um die drei Erdwärmesonden. Der Einfluss der Geologie, der gegenseitigen Beeinflussung von Nachbarsonden, sowie die Regeneration von unten werden immer deutlicher sichtbar. Der gemittelte Abkühlrend in der inaktiven Sonde in der Kernbohrung beträgt 0.3-0.4°C, der im Ringraum der aktiven Sonden bei 0.55-0.65°C pro Jahr. Es scheint, dass sich die mittlere Sonde stärker abkühlt als die umliegenden. Auch zeigen die verschiedenen Lithologien unterschiedliche Abkühlrends.

Die Soletemperatur des Vorlaufs (bei Austritt aus dem Untergrund) nimmt über die ersten drei Winter leicht ab; pendelt sich dann gemittelt um bzw. über 5°C ein. Die kühlfsten gemittelten Temperaturen in der nicht aktiven Messsonde in der Kernbohrung sind im fünften und sechsten Winter um ca. 3°C kühler als im ersten Heiz-Winter.

2 Résumé

L'anneau de trois sondes géothermiques dans un immeuble à Lausen BL est surveillé sous terre depuis 2016 au moyen de mesures de température et leurs changements dans l'espace et dans le temps sont analysés. La température est déterminée à l'aide de la technologie laser à fibre optique. Les changements sont corrélés avec les données collectées par la pompe à chaleur, un compteur de chaleur dans le circuit d'eau glycolée, les conditions météorologiques et la géologie. La propagation du front froid autour de la SGV active est mesurée à l'aide d'une sonde de mesure inactive dans un forage distant de 3 mètres de la SGV active.

Au cours des 5,5 années mesurées jusqu'à présent, certains ajustements et défaillances ont été apportés au système de pompe à chaleur, ce qui a été constatés dans les données mesurées. Les ajustements les plus importants ont été effectués sur le free-cooling, le nombre d'enclenchements de la pompe à chaleur et la production d'eau chaude sanitaire. Ce dernier était purement électrique la première année de mesure. En 2020, il n'y a pas eu de refroidissement gratuit car un entraînement de vanne était défectueux.

L'objectif principal du projet est de mesurer la distribution de température en 3D autour des trois sondes géothermiques. L'influence de la géologie, l'influence mutuelle des sondes voisines, ainsi que la régénération par le bas deviennent de plus en plus visibles. La tendance moyenne au refroidissement de la sonde inactive dans le forage est de 0,3-0,4 °C, celle dans l'anneau des sondes actives de 0,55-0,65 °C par an. Il semble que la sonde du milieu se refroidisse plus que les sondes environnantes. Les diverses lithologies montrent également différentes tendances de refroidissement.

La température de la saumure du flux (lorsqu'il sort du sous-sol) diminue légèrement au cours des trois premiers hivers ; puis pendule en moyenne autour ou au-dessus de 5 °C. Les températures moyennes les plus fraîches de la sonde de mesure inactive dans le forage sont d'environ 3 °C plus basses au cours du cinquième et du sixième hiver que lors du premier hiver de chauffage.

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 und in einer inaktiven Messsonde mittels Glasfasertechnik gemessen. Letztere liegt 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 Schlussbericht für die Messperiode 2016 und 2017 erstellt. Da die Jahre 2016 - 2018 mit Optimierungen und Anpassungen des Wärmesystems geprägt waren (insbesondere beim Freecooling), die Jahre wetterbedingt unterschiedlich waren und die ersten Jahre unterschiedlich bewirtschaftet wurden, konnte mit nur 2 Messjahren noch kein langfristiger Trend insbesondere in Abhängigkeit von Geologie und Sondengeometrie abgeleitet werden. Aus diesem Grund wurde das Projekt um weitere 3 Jahre verlängert.

Im Herbst 2020 wurde ein Bericht mit den Messdaten, Chronologie und Erkenntnissen der Messjahre 2016 - 2020 erstellt. Der Fokus lag auf den ursprünglichen Zielen des Projekts, z.B. dem Bewerten der längerfristigen räumlichen Temperaturveränderung im Untergrund in Abhängigkeit von Tiefe und Geologie, die gegenseitige Beeinflussung der EWS, die Ausbreitung der Kältefahne um die aktiven EWS und der langfristige Einfluss der Regeneration durch Freecooling, an der Oberfläche und am Sondenfuss.

Mit den weiteren Messjahren soll ein langfristiger und robuster Datensatz gewonnen werden. 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.

Mit dem vorliegenden Bericht werden die Messdaten, Chronologie und groben Erkenntnisse der Messjahre 2016 - 2021 bereitgestellt.

4 Zusammenfassung Wärme-, Messsystem

- Projektstandort:** Im Ergolzthal im Baselland in Lausen bei Liestal, 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%
- Wärmesystem:** Sole-Wasser-WP von CTA Optiheat OH 1-25e, Heizleistung 24.6 kW, COP 4.6 (B0/W35), mit Freecooling, Wärmeentzug aus Untergrund ca. 40'000 kWh, Wärmeeintrag ca. 2000 kWh.
- Messsystem:** Glasfaserkabel in Schlaufenform an Aussenwand der Sondenrohr, 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 Wärmehändler der Sole in Sondenvor- / Rücklauf

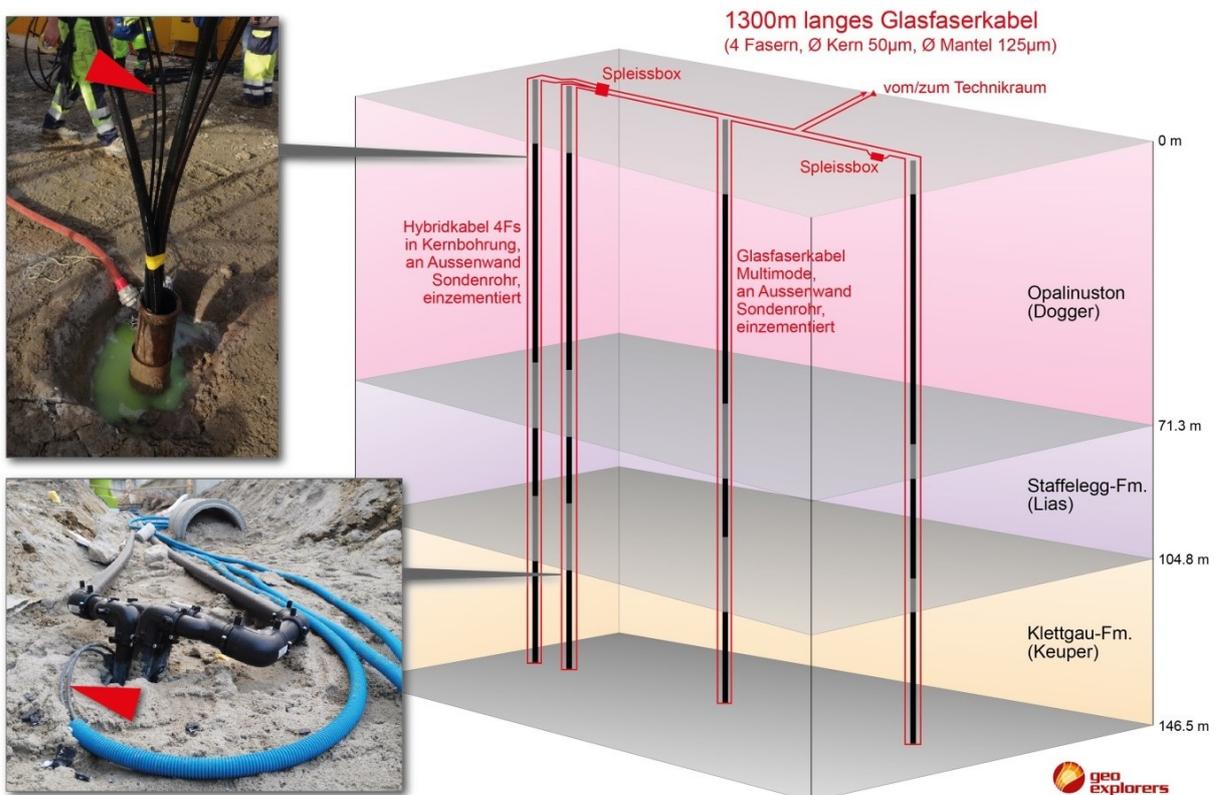


Abb. 1 Ausbau mit Glasfaserkabel (rote Pfeile und Linie)

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 ca. 5%. Die Messungen haben 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 wird erhofft, dass die Laufzeiten der Wärmepumpe, sowie das Freecooling korrekt optimiert wurden.

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 hat. Abgesehen vom langjährigen Abkühlungstrend im Untergrund um die EWS erholt sich der Nahbereich bzw. der Ringraum nach Phasen mit mehrtägigem Wärmeeintrag (Freecooling) bzw. Wärmeentzug (Heizen) grösstenteils innerhalb weniger Tage.

6 Schlussfolgerungen aus Bericht vom Oktober 2020

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.

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 jährlich 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.

7 Chronologie

Technische Anpassungen seit Inbetriebnahme

Datum	Anpassung	Auswirkung
03. 2016	Inbetriebnahme Wärmesystem	-
12. 2016	Ausfall Heizsystem für einige Tage (Defekt der Solepumpe) Austausch der Solepumpe	-
04.2016	Ausfall WP, Filtertrockner in WP im Kältekreis ersetzt	-
09.05.2017	Anpassungen an der Anlage, basierend auf den ersten Messdaten. Da im ersten Sommer das Freecooling kaum aktiv war, wurde von Allemann Energietechnik GmbH verschiedene Anpassungen am System vorgenommen	Erhöhung Anteil rückgeführter Energie durch Freecooling
	<ul style="list-style-type: none"> Sperrdauer nach Heizphase von 24 Stunden auf 8 Stunden reduziert Kühlkreis 1 Raumtemperatur Komfortsollwert von 24 auf 23 °C reduziert (interner Parameter 902) Kühlkreis 1 Raumtemperatur Reduziersollwert von 26 auf 23 °C reduziert (interner Parameter 903) Kühlkreis 1 Umstellung von Schutzbetrieb auf Automatik (interner Parameter 969) Kühlgrenze wurde bei 22 °C belassen (interner Parameter 912) 	<ul style="list-style-type: none"> Nach einer Heizphase kann neu bereits nach 8 h (anstatt 24h) Freecooling starten (WW hat keinen Einfluss)* Freecooling schaltet früher ein
25.04.2018	Nachdem in Folge der Auswertung festgestellt wurde, dass die WP mit 8000 Einschaltung viel zu oft einschaltet und nur jeweils kurz in Betrieb ist, wurde mit Fachkräften eine detaillierte Fehlersuche und Optimierungsevaluation durchgeführt. Dabei konnten folgende Punkte optimiert bzw. angepasst werden:	Optimierung Effizienz und Laufzeiten der WP, Erhöhung Anteil Freecooling, effizientere WW-Produktion
	<p>Anpassungen der Parameter / Einstellungen</p> <ul style="list-style-type: none"> Deaktivierung der separaten Boiler-Nachladung (Grund: Legionellenschutz), welcher seit März 2017 scheinbar dauerhaft eingeschaltet war (wer diesen eingeschaltet hat, ist unbekannt). Diese war aktiviert und hat jede Nacht elektronisch das WW auf >60°C nach- / aufgeheizt. Angedacht war, dass der Legionellenschutz bzw. die Boiler-Nachladung periodisch vom Hauswart eingeschaltet wird! Ein entsprechender Schütz wurde aus Kostengründen nicht eingebaut, welcher von der Wärmepumpe angesteuert werden könnte, um die Legionellenschutzfunktion zu automatisieren. Kann und sollte nachgerüstet werden! Automatische Absenkung des Heizbetriebs zw. 5-22:00 – 5:00 wurde ausgeschaltet. Neu erfolgt ein 24-Std. Heizbetrieb. Einstellungen für WW: neu Schaltdifferenz Trinkwasser von 1°C auf 5°C, neu Nennsollwert Trinkwasser von 53°C auf 55°C, WW-Erzeugung 24h/a Kondensator: keine Änderungen Verdampfer: keine Änderungen (Spreizung der Temperatur um 4°C kann nicht geändert werden) Verdichter: minimale Verdichterlaufzeit einhalten von Ein auf Aus gestellt (interner Parameter 2841), Minimum der Verdichterstillstandszeit von 20 min auf 45 min geändert (interner Parameter 2843) Drehzahlregelung: keine Änderungen Pufferspeicher: Schaltdifferenz automat. Erzeugersperre von 3°C auf 5°C geändert Heizkreis1: Temperatur für Sommer-Winter-Umschaltung von gedämpfter Mitteltemperatur 19°C auf 17°C geändert (Dämpfungsintervall bei 48h, interner Parameter 730*); Heizkennlinie bei 0.62 belassen 	<ul style="list-style-type: none"> Neu erfolgt die Produktion von WW wieder überwiegend mit der WP (→ Wärmeentzug aus Untergrund erhöht sich) und WW-Temperatur im Speicher wird nicht mehr so hoch sein. Auf Grund des Minergie-Standards ist eine Absenkung nicht notwendig. Längere Laufzeiten der WP, weniger Einschaltungen Längere Laufzeiten der WP (Heizbetrieb beginnt neu erst wieder nach 45min) WP schaltet ein wenn ΔT um 5°C im Pufferspeicher vom Sollwert abweicht. Dadurch läuft die WP länger. Optimierung Freecooling (Freecooling beginnt früher im Jahr bzw. bei tieferen Raumtemperaturen). Die Heizgrenze wurde jetzt auf

	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlkreis1: Raumtemperatur Komfortzielwert von 23 auf 21 °C reduziert (interner Parameter 902) • Raumtemperatur Reduziersollwert von 23 auf 21 °C reduziert (interner Parameter 903, Reduziersollwert an Komfortsollwert angepasst) • Vorlaufsollwert bei Aussentemperatur 25°C von 20 auf 18°C reduziert (interner Parameter 908), Kühlgrenze bei Aussentemperatur Kühlreis1 von 22 auf 20°C reduziert (interner Parameter 912*), Vorlaufsollwert bei Aussentemp. 25°C bzw. 35°C von 18 auf 13°C reduziert (interner Parameter 923 & 924) 	<p>17°C eingestellt. Wenn WP aus Heizmodus fällt (>17°C), wird nach 8h (siehe Parameter 913) Kühlmodus freigegeben</p> <ul style="list-style-type: none"> • Freecooling-Betrieb wird früher frei gegeben.§ • Wie bereits im Heizbetrieb wird so auch im Kühl-betrieb keine Absenkung bzw. Erhöhung mehr gefahren. # • Damit wird das Freecooling nicht mehr über den Mischer gedrosselt. Sobald Kühlanforderung besteht, wird mit der maximalen Freecooling-Leistung gekühlt.
	Technische Anpassungen: Filtertrockner in WP im Kältekreis ersetzt (auf Grund Verunreinigungen o. Feuchtigkeitsrückstände in Kältemittel)	Beeinflusst Leistung bzw. internen Durchfluss der WP
22.05.2018	Beim Daten-Auslesen bemerkt es keine Daten von der Wärmepumpe ab dem 29.04.2018 aufgezeichnet hat. Daten vom Wärmehändler stürzte PC ab. Schlussendlich möglich Daten herunterzuladen, aber es lädt nicht mehr gleich viele Datentypen herunter wie vorher... (wichtigste sind noch da...) hat jemand was verändert?	
23.05.2018	Daten checken... Wärmepumpe-Daten werden aufgezeichnet. Verdichter startet immer noch sehr viel... ca 40-50 mal am Tag...	
12.06.2018	Andreas Buser CTA vor Ort. Scheint dass Regler WP defekt ist. Regler ausgetauscht 1610: Trinkwassertemperatur-Nennsollwert (=Boilertemp.) Von 55 auf 52°C 1620: Trinkwasserfreigabe von 24h auf Zeitprogramm 4 geändert (WW von 0:00 bis 4:00) 1612: Trinkwasser-Reduziersollwert von 8 auf 45°C geändert (falls doch während Tag WW unter 45 bzw. 40°C mit Pufferdifferenz von 5°C fallen sollte, kann WP WW heizen) 913: Sperrdauer nach Heiz-/Kühlende Kühlkreis von 8 auf 0h geändert (Freecooling kann sofort nach Heizen freigegeben werden, Achtung auch noch 45min Sperrzeit nach jedem WP-Start drin!)	
30.07.2018	Beim Daten auslesen bemerkt, dass Wärmehändler nicht funktioniert. Herr Allemann wurde informiert.	Keine Daten vom Wärmehändler
22/23.08.2018	Termin mit Herrn Allemann in Lausen, Kabel/Kontakt ist fehlerhaft beim Wärmehändler. Ersetzen Kabel beim Wärmehändler	Daten vom Wärmehändler werden wieder aufgezeichnet
03 - 16.07.2020	Einbau Taupunkt wächter und -sensor von Elktro Brönnimann mit CTA	Vermeidung von Schäden bei Unterschreitung Taupunkt während Freecooling
Nov. 2020	Dem Immobilienbewirtschafter wird von uns mitgeteilt, dass die Auswertungen der Messdaten zeigen, dass im Sommer 2020 kein Freecooling erfolgt ist. Evtl. war dies eine Auswirkung des Taupunkt fühlens.	
April 2021	Service durch CTA auf Grund der Probleme: Ein Taupunkt fühlens wurde nicht gefunden. Jedoch wurde ein defekter Elektromotor für ein Freecoolingventil ersetzt. Deshalb funktionierte das Freecooling nicht.	Freecooling funktioniert wieder

8 Messdaten Wärmepumpe / Wärmezähler

Nachfolgend werden die Daten des Wärmezählers im Solekreislauf und die Messdaten der Wärmepumpe grafisch dargestellt. Die Messdaten der Glasfasermessungen in den 4 EWS folgt im anschliessenden Kapitel.

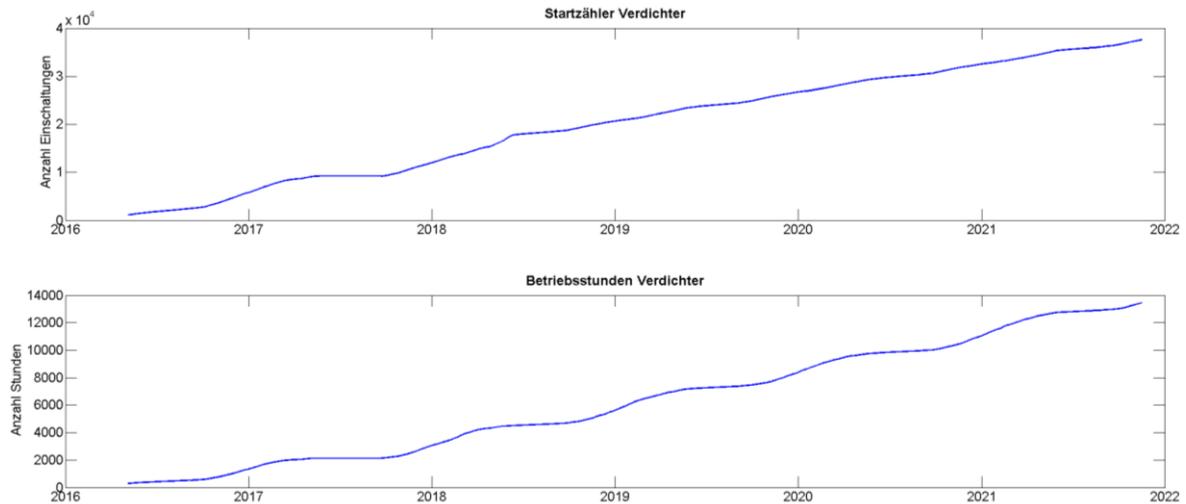


Abb. 2 Anzahl Anschaltungen & Betriebsstunden WP

Bis Anfang drittes Quartal im Jahr 2018 schaltete der Verdichter / die Wärmepumpe zu viel ein und aus. Nach den Änderungen an den Parametern des Wärmepumpensystems im 2018 flacht die Kurve deutlich ab. Die Anzahl Betriebsstunden sind in einem ähnlichen Bereich geblieben.

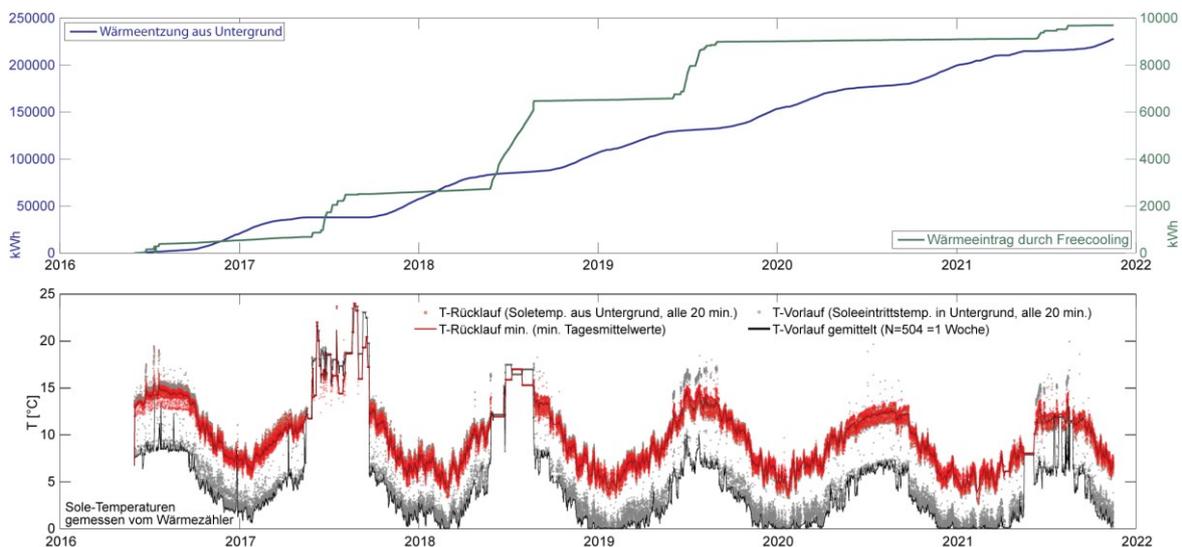


Abb. 3 Oben: Wärmeentzug aus den Untergrund (blau, linke y-Achse) und Wärmerückgabe durch Freecooling (grün, rechte y-Achse) in kWh (siehe auch vorgängige Berichte für weitere Informationen). Unten die Temperaturen, die vom Wärmezähler gemessen wurden. Deutlich sichtbar ist der fehlende Wärmeertrag durch Freecooling im 2020. Auf Grund des kühlen Sommers 2021 war der Freecooling-Eintrag gering.

Der Wärmezähler zeigt, dass im ersten Sommer 2016 fast kein Freecooling (grüne Linie) stattgefunden hat. Daraufhin erfolgten Anpassungen, welche im 2017 zu höheren Wärmeerträgen führten. Zudem erfolgte die Warmwasser-Erwärmung nur elektrisch, da der Legionellenschutz dauerhaft eingeschaltet war. Während der Sommermonate 2018 zeichnete der Wärmezähler den

Durchfluss und die Temperatur nicht oder nur fehlerhaft auf (siehe Chronologie im vorherigen Kapitel). Entsprechend wurde der Wärmeeintrag in Abb. 3 iterativ abgeschätzt. Der vierte Sommer 2019 zeigt dann wieder die zu erwartenden Messdaten auf. Es wurden zirka 2500 kWh Wärme durch Freecooling eingetragen. Während des gesamten Sommers wurde der Untergrund nicht so stark aufgeheizt, sodass das Freecooling durchwegs möglich war (rote Kurve des Vorlaufs / Austritts aus Sonde erreicht keine Temperaturen $>16^{\circ}\text{C}$). Der Komfortgewinn war den ganzen Sommer über gegeben. Dies ist wahrscheinlich auch eine Konsequenz der Warmwasserproduktion, welche unmittelbar immer wieder ein Teil der gespeicherten Energie aufbraucht. Allerdings ist totale Regenerationseffekt durch Freecooling vergleichsweise gering.

Mit der Auswertung der Messungen im 2020 wurde festgestellt, dass im Sommer 2020 kein Freecooling erfolgte. Die Daten zeigen somit die sommerliche Regeneration vom Untergrund ohne Freecooling, aber mit Warmwasser-Erwärmung. Es wurde vermutet, dass das ausbleibende Freecooling in Zusammenhang mit einem im Sommer installierten Taupunktfühlers stehen könnte. Im April 2021 war deshalb ein Techniker vom Wärmepumpenlieferant vor Ort und hat festgestellt, dass ein Elektromotor von einem Freecooling-Ventil defekt war und ersetzt werden musste. Entsprechend funktionierte im Sommer 2021 das Freecooling wieder. Da aber der Sommer 2021 verhältnismässig kühl war, wurden nur zirka 550 kWh Wärme im Boden eingetragen.

Die untere Abbildung in Abb. 3 der Soletemperatur bestätigt, dass im Gegensatz zum Sommer 2017 und 2018 durchgehend Warmwasser produziert wurde. Die Soletemperatur des Vorlaufs nimmt über die ersten drei Winter leicht ab; pendelt sich dann ein und bleibt grösstenteils gemittelt bei $>5^{\circ}\text{C}$. Die Rücklauftemperaturen (Eintritt in Sonde) zeigen eine sehr grosse Spreizung von ca. $5\text{-}7^{\circ}\text{C}$ und erreichen seit dem dritten Winter wiederholt Werte von unter 0°C . Die gleiche Entwicklung zeigen auch die Daten der in der Wärmepumpe gemessenen Quelltemperaturen (siehe nachfolgende Abbildungen). Nachfolgend werden weitere Messdaten, die von der Wärmepumpe aufgezeichnet werden, abgebildet.

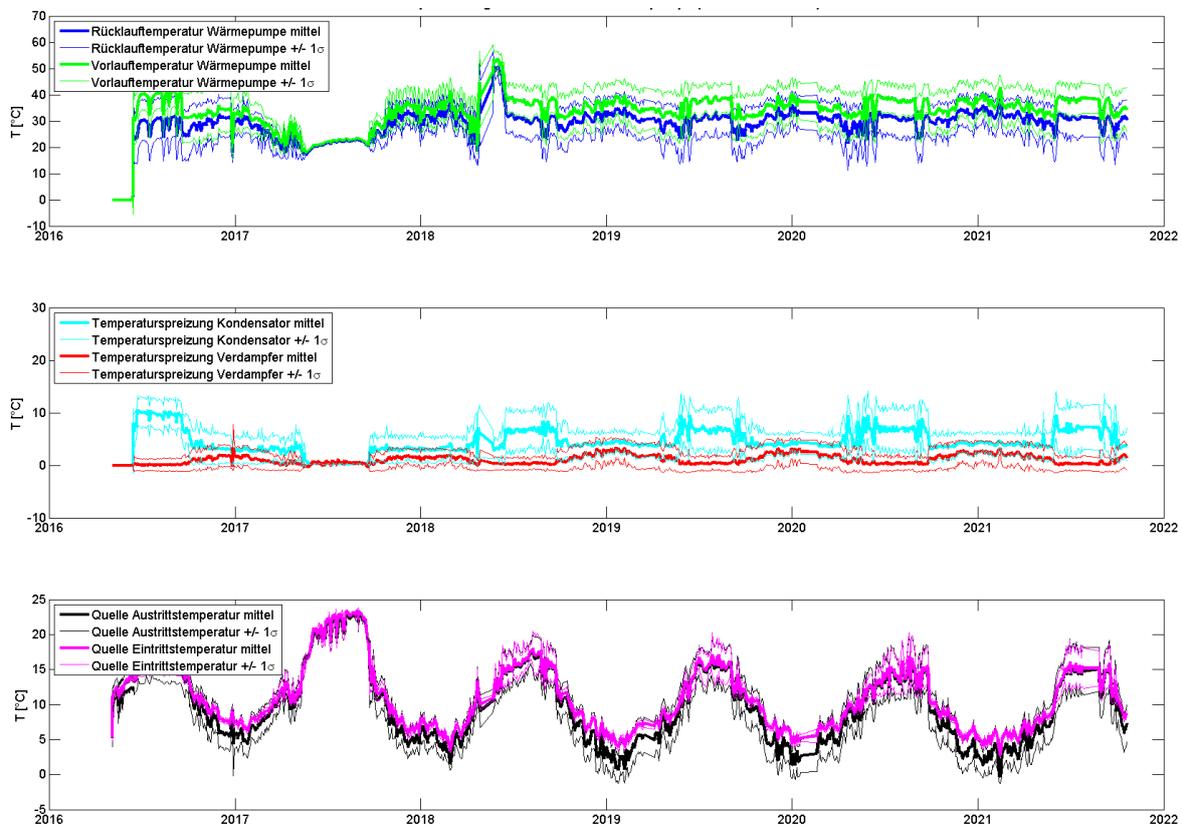


Abb. 4 Messdaten der Wärmepumpe (durchgezogene Linien = geglättete Messdatenkurven, gestrichelt die geglättete Standardabweichung, Glättungsfensterbreite = 1 Woche bzw. $N=504$)

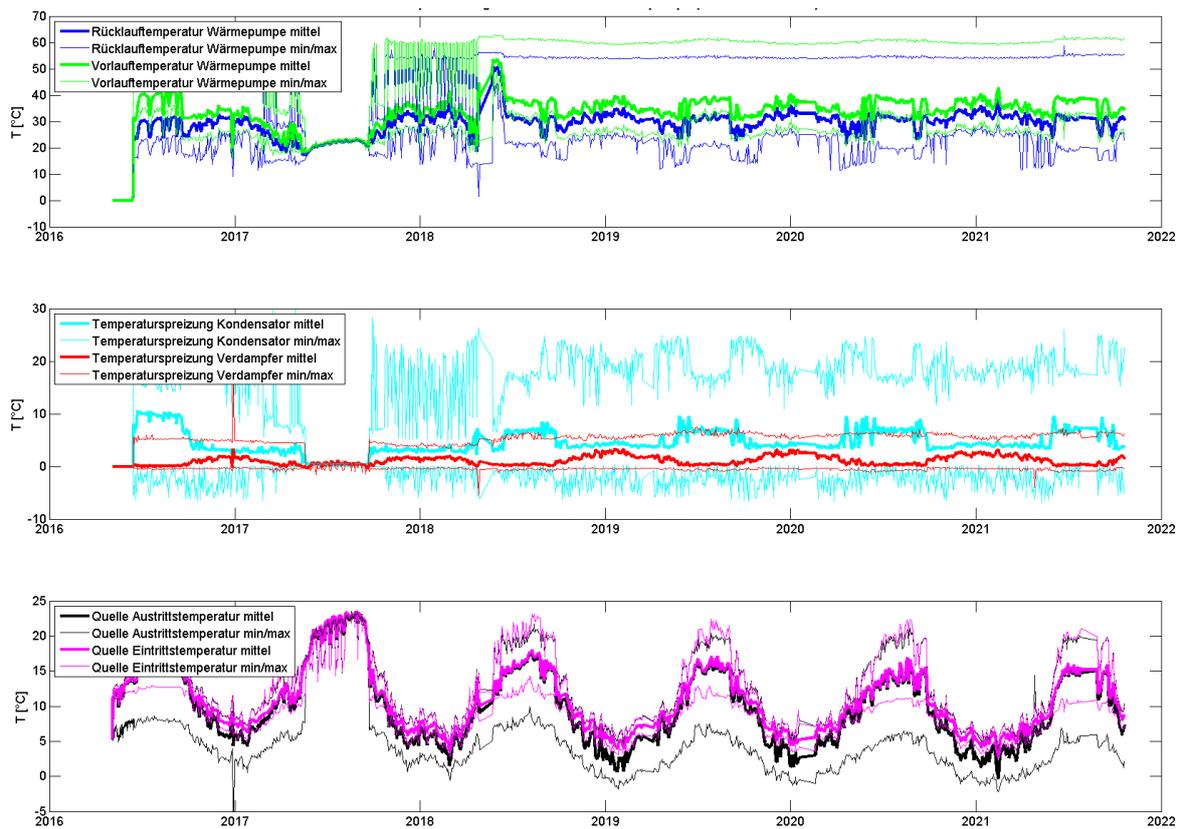


Abb. 5 Messdaten der Wärmepumpe (gleich wie Abb. 4, aber mit gemittelten / geglätteten minimal und maximal Werten pro Woche = gestrichelt Kurve, Glättungsfensterbreite = 1 Woche bzw. N=504)

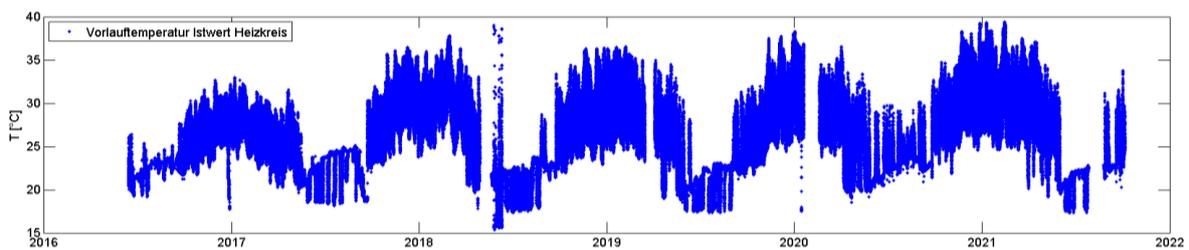


Abb. 6 Temperaturen Heizkreis

Anmerkungen zu Abb. 6: Bei sommerlichen Temperatureusschlägen nach unten ist das Freecooling aktiv, welches auf 18°C limitiert ist (im Sommer 2017 auf 19°C). Gut zu erkennen ist, dass das Freecooling im Sommer 2020 nicht erfolgte. Auch hier nimmt die Temperaturspreizung über die fünf Winter deutlich zu. Auffallend ist auch, dass die Vorlauftemperatur vom Heizkreislauf im Winter 2021 höher ist als in den vorherigen. Zwar war der Januar 2021 etwas kühler als die vorherigen, aber die Wintermonate waren wärmer als z.B. im 2016/2017. Evtl. wurden uns unbekannt Änderungen am Wärmesystem vorgenommen.

9 Temperaturentwicklung im Untergrund

Nachfolgend werden die Temperaturdaten aus dem Untergrund gezeigt. Die Temperaturen beziehen sich auf die „in der 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. Anmerkung: Das Lasermessgerät wird einmal im Frühjahr und einmal im Herbst für ca. 2 Wochen an der Kantonsschule Olten für ähnliche Messungen eingesetzt (ebenfalls mitfinanziert von EnergieSchweiz). Entsprechend zeigen nachfolgende Abbildungen kurze Lücken. Übliche kleine Temperatursprünge von bis zu wenigen Zehntelgrad durch Auf- und Abbau des Lasers wurden mit Hilfe der trägen Kernbohrung mathematisch korrigiert.

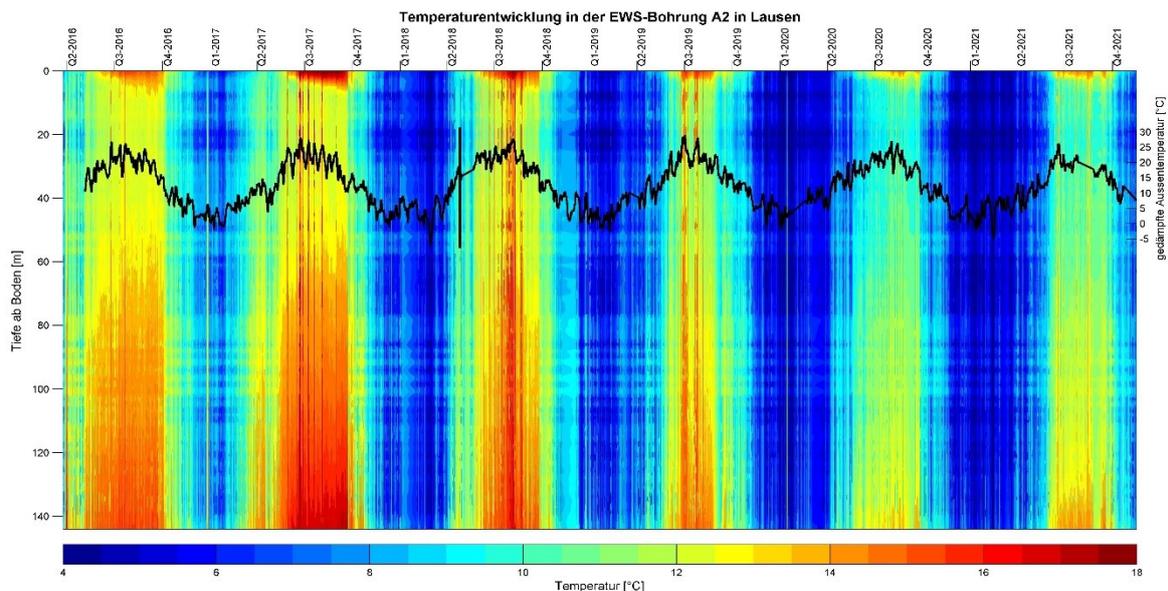


Abb. 7 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A2. Darstellung der Temperatur (dunkelblau = 4°C bis dunkelrot = 18°C) im Ringraum der EWS A2 über die Zeit (x-Achse) und die Tiefe in der EWS (y-Achse). Die schwarze Kurve zeigt die gedämpfte Aussentemperatur (mit Aussenfühler gemessen). Vertikale rote Linien spiegeln das Freecooling im Sommer wider.

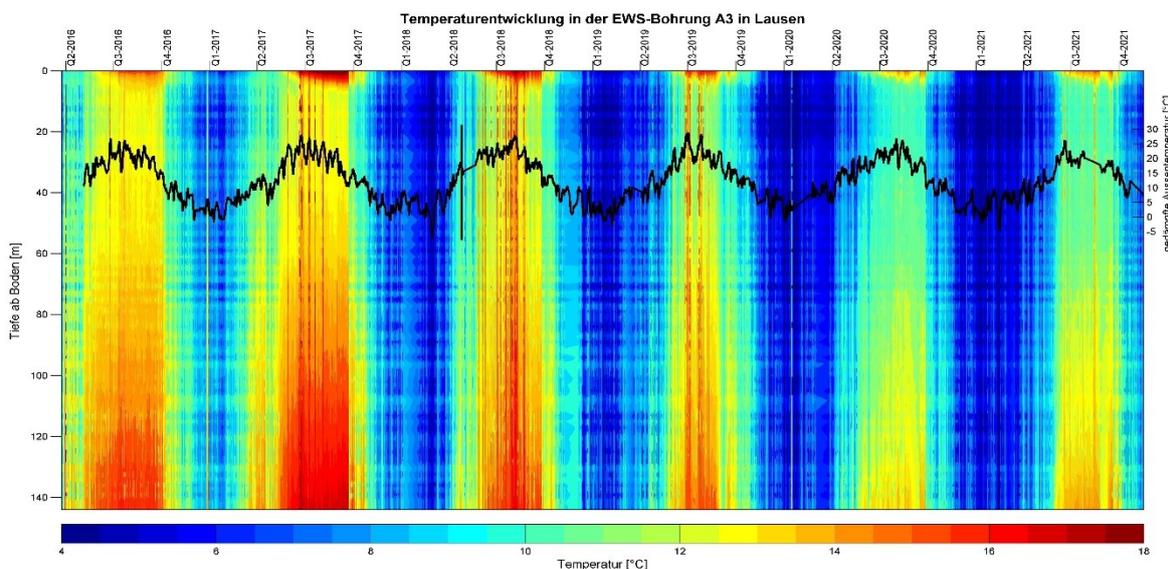


Abb. 8 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A3. Beschriftung wie in Abb. 7.

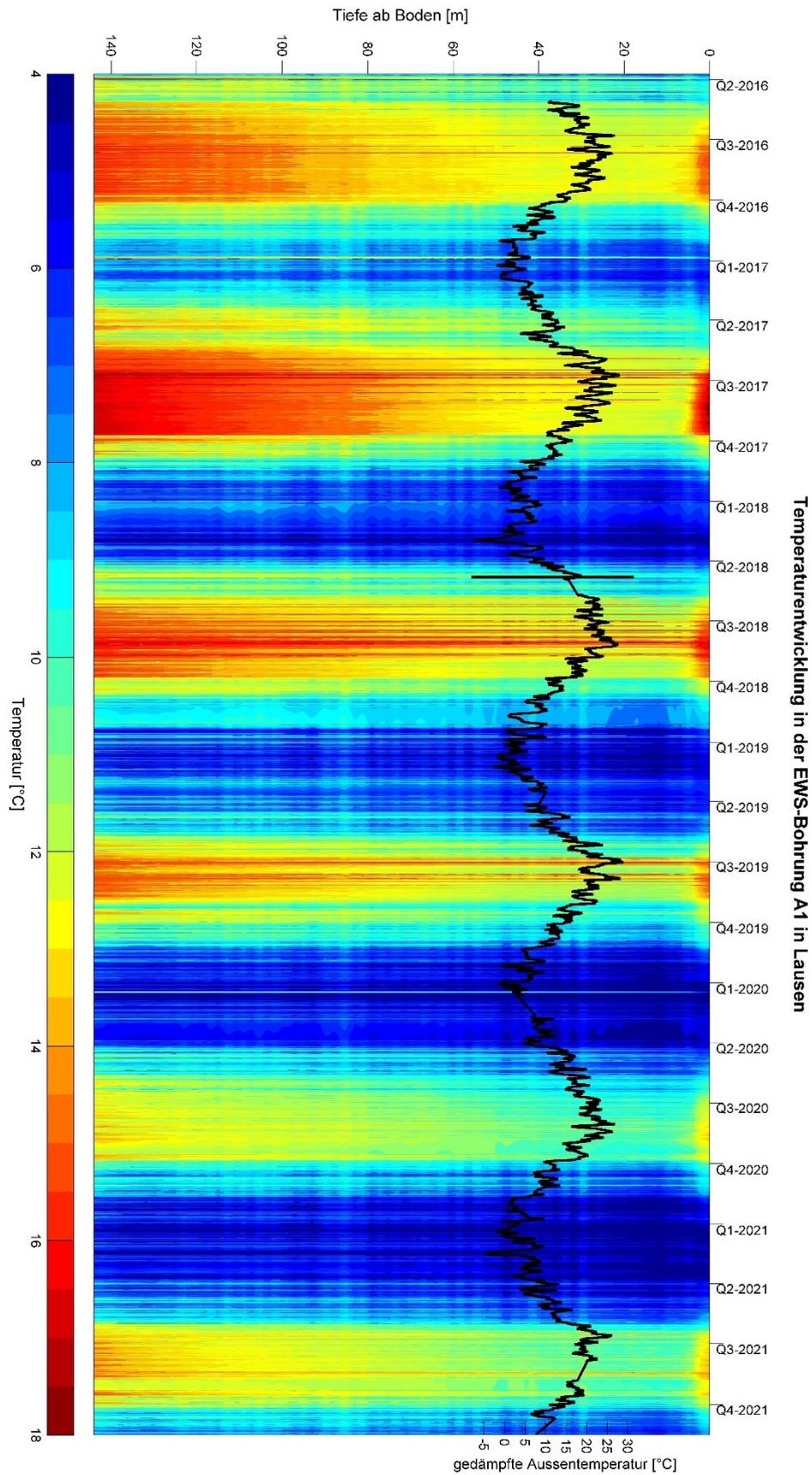


Abb. 9 Entwicklung Untergrundtemperatur in EWS A1. Beschriftung wie in Abb. 7.

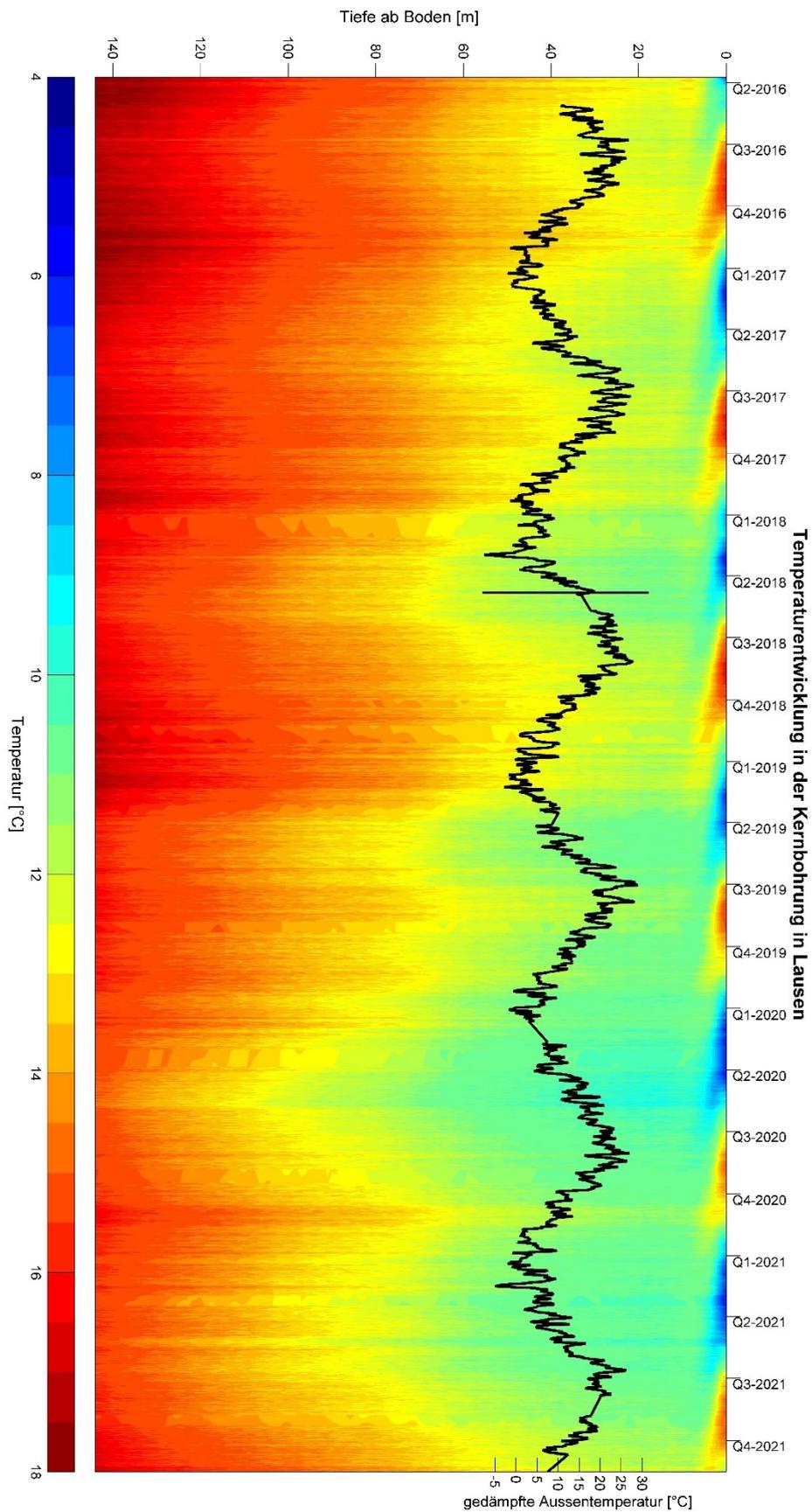


Abb. 10 Entwicklung Untergrundtemperatur in Messsonde der Kernbohrung. Die verzögerte jahreszeitliche Temperaturfront von der Oberfläche her reicht bis in eine Tiefe von ca. 8.5 m. Beschriftung wie in Abb. 7.

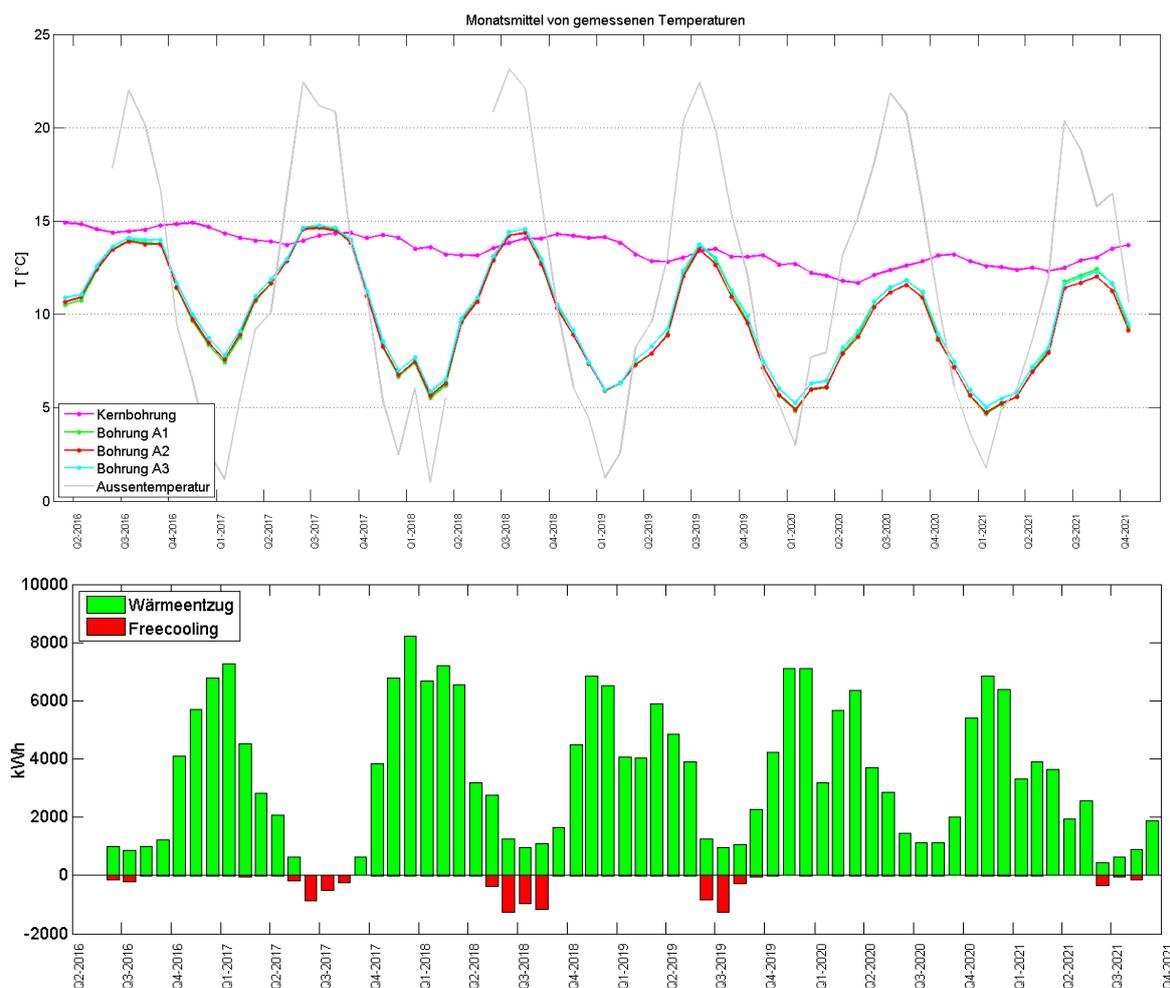


Abb. 11 Korrelation Monatsmitteltemperaturen mit Wärmeentzug / –eintrag. Oben: Monatsmittel von gemessenen Temperaturen in allen Bohrungen und der Aussentemperatur. Unten: Wärmeentzug bzw. Freecooling pro Monat.

In Abb. 11 oben, sind die über einen Monat und über die ganze Tiefe gemittelten Untergrundtemperaturen von jeder Sonde dargestellt, welche mit dem Laser-Glasfaser-Messsystem erhoben wurden. Zusätzlich ist zum Vergleich die gemittelte Aussentemperatur in Grau aufgetragen. Die kältesten gemittelten Temperaturen in der nicht aktiven Messsonde in der Kernbohrung (pink), welche ca. 3 m von der EWS A1 entfernt liegt, sind im fünften und sechsten Winter um ca. 3°C kühler als im ersten Heiz-Winter.

Im unteren Diagramm werden der Wärmeentzug in kWh aus dem Untergrund (grün) und die Wärmerückgabe durch Freecooling (rot) gegenübergestellt. Dargestellt sind die Daten seit Inbetriebnahme der Wärmepumpe und der Messungen im März 2016 bis Anfang November 2021. Leider gab es im Sommer 2018 einen Ausfall bzw. Fehlmessungen des Messgerätes, sodass dort iterativ korrigiert werden musste. Deutlich zu sehen ist, dass im Sommer 2020 kein Freecooling stattgefunden hat (siehe oben). Der Grund für den geringeren Wärmeeintrag im Boden im Sommer 2021 kann wahrscheinlich auf den vergleichsweise kühlen Sommer zurück geführt werden.

Wärmeentzug und Temperaturentwicklung allgemein:

Die Abb. 7 bis Abb. 9 der drei EWS zeigen eine sehr ähnliche Entwicklung der Untergrundtemperaturen. Die Heizperiode ist mit den Blautönen gut zu erkennen. Dabei erreicht die Untergrundtemperatur im Ringraum der Sonden im Winter gemittelte minimale Monats-Temperaturen von ca. 5°C (Abb. 11). Der gemittelte Unterschied in der Untergrundtemperatur zwischen dem 1. und 5. Winter liegt bei ca. 3°C. Die Unterschiede der letzten 4 Winter sind mit ca. 1°C vergleichsweise gering. In ca. 15 m Tiefe wurden die kurzfristig kältesten Temperaturen von ca. 4°C im Ringraum gemessen. Das fehlende Freecooling im Sommer 2020 zeigt sich deutlich in den geringeren gemittelten Untergrundtemperaturen von ca. 2-3°C im Sommer. Der letzte kühle

Sommer mit geringem Wärmeeintrag zeigt zwar höhere Untergrundtemperaturen, aber geringere als in den Sommern davor. Trotz der fehlenden Regeneration durch das ausbleibende Freecooling im Sommer 2020 waren die Wintertemperaturen trotz kälterem Winter nicht unwesentlich tiefer. Dies zeigt, dass auch in den Vorjahren die Regeneration durch Freecooling gering war und in den Herbstmonaten mit den ersten Heiztagen die eingebrachte Energie "aufgebraucht" war.

In allen Messjahren erholte sich der Untergrund mit abnehmenden Heizbetrieb rasch und erreicht Anfang Sommer wieder ähnliche gemittelte Temperaturen wie im Anfangsjahr (siehe Abb. 11).

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. 10). Die Beeinflussung durch die Jahreszeiten reicht wie in den Jahren zuvor ca. 8.5 m tief in den Untergrund. Die vergleichsweise scharfe Grenze der jahreszeitlichen Beeinflussung am Top vom Opalinuston bei ca. 8.5 m, welche bei umliegenden Messungen generell tiefer liegt (10-20 m), sowie die fehlende typische Temperaturkurve auf Grund der Klimaerwärmung (T-Abnahme von Oberfläche bis mehrere Zehner Meter Tiefe und dann Einbiegen in den normalen geothermischen Gradienten), lassen vermuten, dass das fließende Grundwasser im verwitterten Opalinuston einen Einfluss auf die Untergrundtemperatur hat bzw. die von oben zugeführte Wärme kontinuierlich abführt.

Für weitere Erkenntnisse wird auf die vorherigen Berichte verwiesen.

Ausbreitung Kältefahne um EWS A1:

Der Einfluss der Geologie oder der benachbarten Sonden und der Ausbreitung der Kältefront um die aktive EWS soll mit Hilfe der Messdaten der inaktiven EWS in der Kernbohrung quantifiziert werden.

Vergleicht man Abb. 7 bis Abb. 11 so wird sofort ersichtlich, dass die Untergrundtemperatur in der Messsonde (Kernbohrung, Abb. 10) viel homogener ist und weniger schwankt. Dies liegt daran, dass die Sonde nicht aktiv an das Wärmesystem angeschlossen ist. Es ist ein Abkühlungstrend der Untergrundtemperatur in der Kernbohrung zu erkennen (Abb. 11). Dies kann mit dem Durchschlag der Kältefahne von der benachbarten EWS A1 erklärt werden, welche 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 sollte. Da aber das Gesteinsvolumen um die Sonde A1 mit der Entfernung im Quadrat zunimmt, verteilt sich die Kälte auf immer mehr Gesteinsvolumen und entsprechend wird das Gestein mit zunehmendem Radius immer weniger abgekühlt, sodass die Abkühlung in der 3 m entfernten Messsonde nur langsam erfolgt.

In Abb. 12 ist die gemittelte jährliche Abkühlung im Ringraum der aktiven und in der inaktiven Sonde dargestellt. Aus allen Messdaten im Ringraum wurde pro Teufe die Abkühlung über die gesamte Messperiode ermittelt (linearer Fit). Während die jährliche Abkühlung im Untergrund bei den aktiven Sonden bei rund 0.55-0.65°C liegt, so lag diese in der Kernbohrung bei 0.3-0.4°C pro Jahr. Die Variation mit der Tiefe und Geologie, sowie die Regeneration am Sondenfuss und an der Erdoberfläche ist deutlich erkennbar und wird nachfolgend diskutiert.

Der im Bericht von 2020 geäußerte Verdacht, dass die Beeinflussung der Nachbarsonden erkennbar ist, scheint sich zu bestätigen. Abb. 12 zeigt, dass die mittlere Sonde A2 in der Zwischenzeit eine leicht stärkere Abkühlung zeigt als die beiden äusseren benachbarten Sonden A1 und A3. Es scheint, als dass die Regeneration von unten und oben den Einfluss der gegenseitigen Beeinflussung mindert.

Bei der Interpretation sollten die zahlreichen Anpassungen an den Wärmepumpe-Parametern sowie unterschiedliche klimatische Winter / Sommer nicht vergessen werden. Auch scheint es, dass der regelmässige Abbau und Wiederanschluss des Messgerätes zwischen den beiden Projekten Kanti Olten und Projekt Lausen evtl. zu leichten Shifts / Sprüngen bei den gemessenen Temperaturen führt. Hier ist es deshalb wichtig, dass der langfristige Trend bewertet wird.

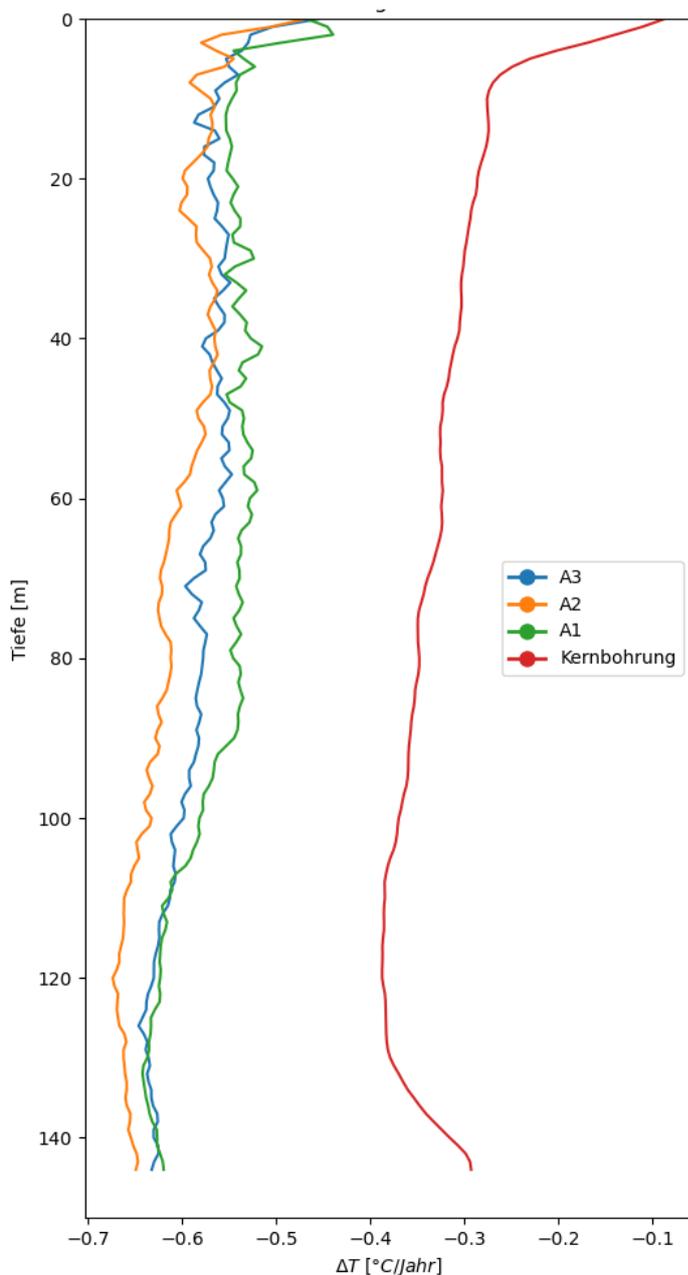


Abb. 12 Gemittelte jährliche Abkühlung im Ringraum pro Tiefenintervall. Die Abkühlung wurde mit einem linearen Trend aus allen Messdaten über die gesamte Periode von 2016 bis 2021 ermittelt.

Einfluss Geologie:

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. Dies wurde im Bericht 2020 diskutiert. 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, hat der variierende Abstand zwischen den Sonden auch einen Einfluss auf die Temperaturentwicklung in der Kernbohrung haben.

Abb. 12 zeigt, wie sich die Temperaturen in der Tiefe über die Messzeit 2016 – 2021 verändert haben. Dargestellt ist, um wieviel sich der Untergrund pro Teufe und Jahr in der Kernbohrung und in den aktiven Sonden abkühlt. Die Temperaturabnahme (siehe oben) zeigt Unterschiede, Sprünge

und Änderungen in der Steigung. Die Abkühlung im Keuper scheint in den aktiven Sonden mit 0.65°C pro Jahr klar stärker zu sein als im Opalinuston mit 0.55°C pro Jahr (Abb. 14). Die "Sprünge" in der Abkühlung korrelieren z.T. mit Schichtwechseln, wie z.B. zwischen 60 und 80m (Übergangszone zwischen Basis Opalinuston und Top Lias), sowie bei 105m (Übergang Lias zu Keuper). Die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten sind wahrscheinlich dafür verantwortlich. Dolomite und Kalksteine haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Tonsteine. Dies spiegelt sich auch innerhalb des Opalinustons wider, was auf die höhere Wärmeleitfähigkeit von Quarz zurückgeführt werden kann. Die grössere Abkühlung der Sonde A2 im Lias (ca. 70-105 m Tiefe) kann vermutlich auch auf lithologische Effekte zurückgeführt werden. Allerdings muss der Einfluss der Regeneration von unten und oben, wie auch der variierende Abstand zwischen Kernbohrung und Sonde A1 ebenfalls berücksichtigt werden, wie im Bericht 2020 diskutiert.

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 (Abb. 14). In umliegenden EWS liegt diese generell tiefer (10-20 m). Auch die typische Temperaturkurve auf Grund der Klimaerwärmung fehlt im Ruhe-Temperatur-Tiefenprofil. Der Sprung in der Temperaturabnahme am Top vom Opalinuston bestätigt, dass das fließende Grundwasser die von oben zugeführte jahreszeitliche Wärme / Kälte kontinuierlich abführt.

Abb. 13 zeigt das Abkühlverhalten über die Jahre in der Kernbohrung im Bereich von lithologischen Wechsell. Dargestellt sind die Temperaturdifferenzen der gemittelten Monatswerte zum Vorjahresmonat in unterschiedlichen Teufen im Bereich des Gesteinswechsels. Während die Lithologiewechsel im Temperatur-Tiefenprofil Abb. 14 sichtbar sind, liegen die Abkühlraten in Abb. 13 im Fehlerbereich und Unterschiede sind nicht oder noch nicht erkennbar.

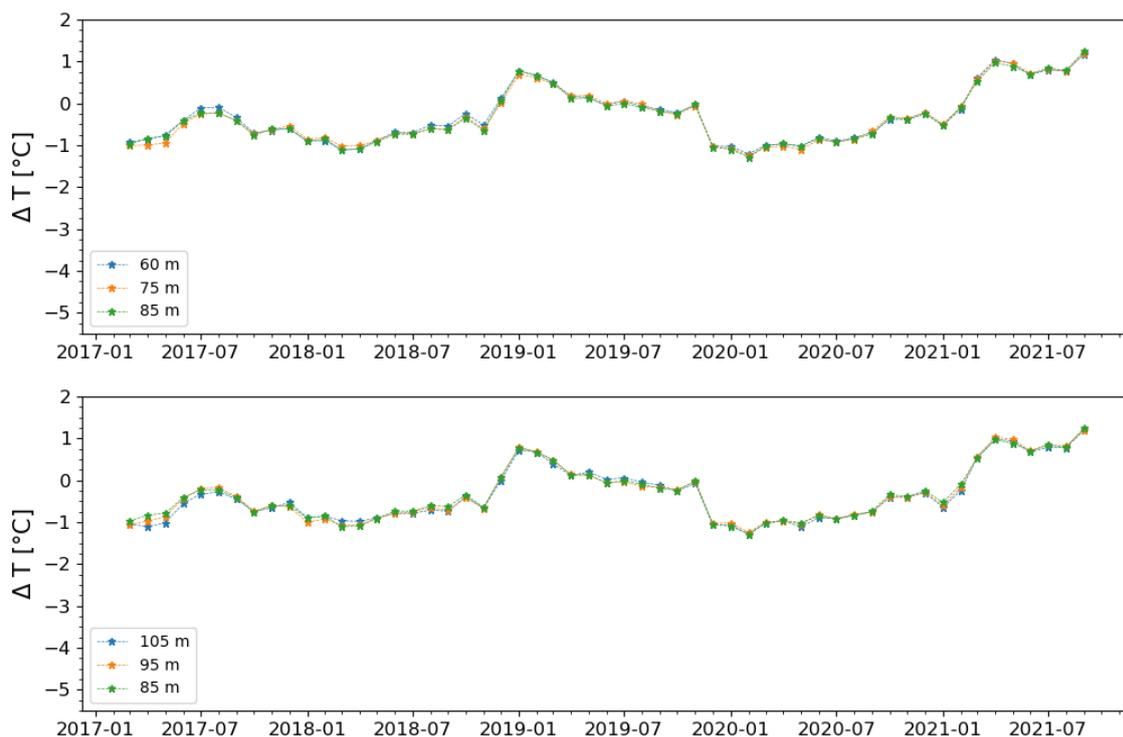


Abb. 13 Veränderung der gemittelten Monatstemperatur in bestimmter Tiefe zum Vorjahresmonat in der Kernbohrung. Z.B. zeigt der Y-Achsenwert im Mai 2019 die Differenz der gemittelten Monatstemperatur im Mai 2019 zu Mai 2018. Es wurden Teufen um Schichtwechsel mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten ausgewählt. Vergleicht man z.B. die kältesten Monate in der Kernbohrung ca. im Mai, so ist "noch" kein Trend zu erkennen, der eine verstärkte Abkühlung in Gesteinen mit höherer Wärmeleitfähigkeit erkennen lassen würde. Vielmehr liegt alles noch im Fehlerbereich.

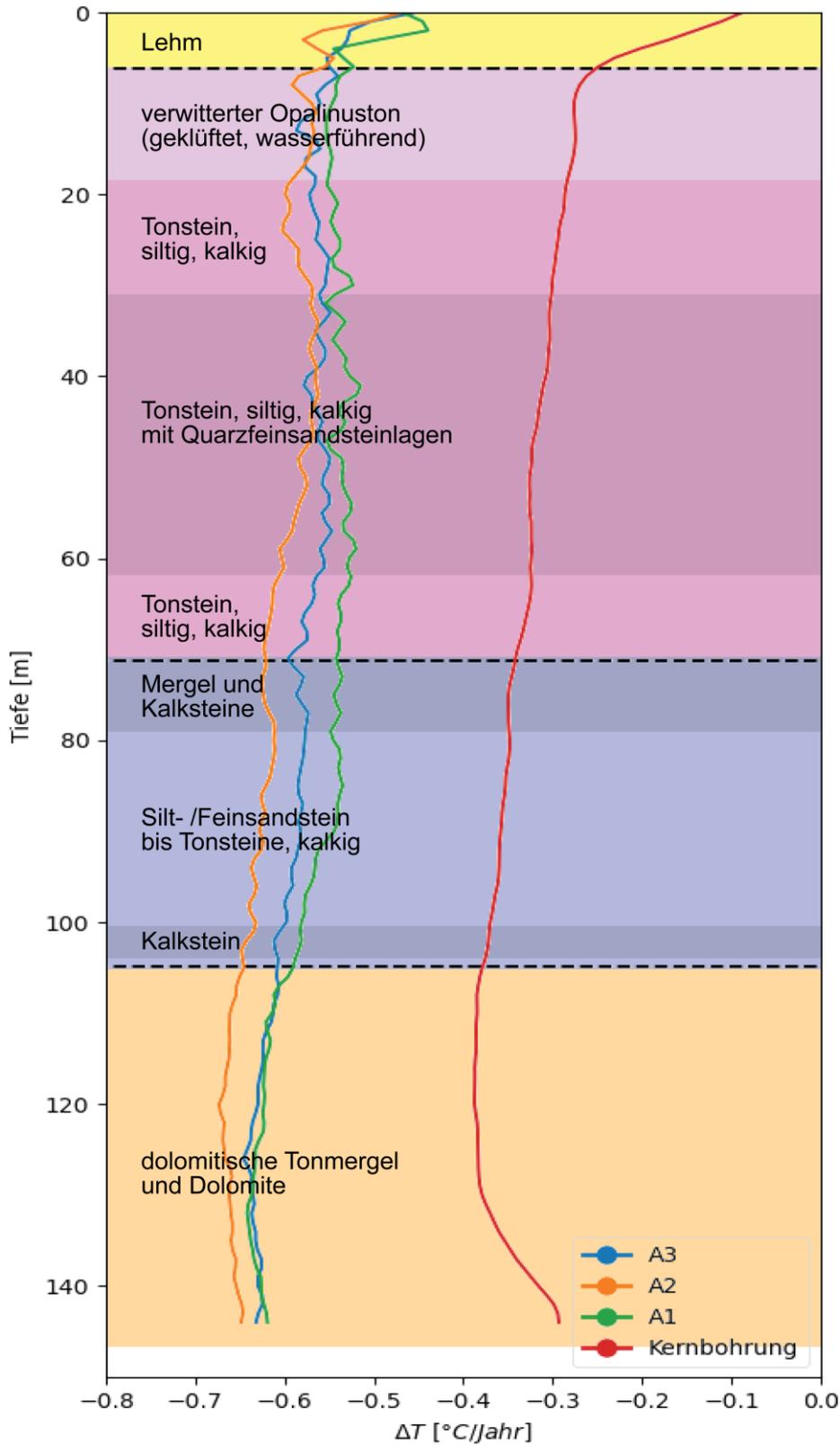


Abb. 14 Gemittelte jährliche Abkühlung im Ringraum pro Tiefenintervall und hinterlegter Geologie. Die Abkühlung wurde mit einem linearen Trend aus allen Messdaten über die gesamte Periode von 2016 bis 2021 ermittelt.

10 Schlussfolgerungen

In den 5.5 Jahren Betrieb wurden einige Anpassungen / Optimierungen getätigt. Die Änderungen wie auch einzelne Ausfälle wie z.B. der Wärmepumpe oder des Freecoolings erlauben zusätzliche Erkenntnisse zu sammeln. Auf Grund der Messungen wurden die Probleme wie z.B. der Ausfall des Freecoolings erkannt.

Der Trend der Temperaturabnahme des Untergrundes in der benachbarten inaktiven EWS scheint sich fortzusetzen. Grundsätzlich scheint das System ausreichend dimensioniert zu sein, denn die gemittelte Untergrundtemperatur hat sich im Winter bei ca. 5°C eingependelt. Das Freecooling ist minim und wie der Ausfall im 2020 zeigt, trägt das Freecooling nur marginal zur Regeneration bei.

Der Einfluss der Geologie, der gegenseitigen Beeinflussung von Nachbarsonden, sowie die Regeneration von unten scheinen sich immer mehr "durchzupausen", sodass diese in Zukunft evtl. auch quantifiziert werden können. Die Abkühlung im Keuper scheint mit 0.65°C pro Jahr klar stärker zu sein als im Opalinuston mit 0.55°C pro Jahr. Die "Sprünge" in der Abkühlung im Temperatur-Tiefenprofil korrelieren z.T. mit Schichtwechseln und damit mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, wie z.B. zwischen 60 und 80m (Übergangszone zwischen Basis Opalinuston und Top Lias-Kalke), sowie bei 105m (Übergang Lias zu dolomitische Keuper-Mergel). Die grössere Abkühlung der mittleren Sonde A2 im Lias (ca. 70-105 m Tiefe), welche durch die Nachbarsonden beeinflusst wird, kann vermutlich auch auf die lithologischen Effekte zurückgeführt werden. Allerdings sind unterschiedliche Abkühlraten im Bereich von Gesteinswechseln zumindest im Jahresvergleichen nicht oder noch nicht feststellbar.

Es stellen sich ein paar neue Fragen:

Warum ist die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf so gross (ca. 7°C)? Es scheint, dass diese sukzessive zunimmt. Dies könnte z.B. am Durchfluss liegen. Ändert sich der Durchfluss schleichend bzw. ist dieser nicht optimal eingestellt?

Warum ist der Sole-Eintrittstemperatur in die Sonden so kalt und erreicht im Winter Minusgrade, wobei die Soletemperaturen aus dem Untergrund bei minimal ca. 5-7°C liegen? Ist der Durchfluss korrekt eingestellt?

Warum ist die Vorlauftemperatur im Heizkreislauf im letzten Winter viel höher als zuvor, selbst gegenüber kälteren Wintern.